



TESIS - RC 5401

**PEMODELAN *HEADED BAR* PADA HUBUNGAN BALOK-KOLOM
INTERIOR AKIBAT BEBAN STATIK NON LINEAR
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

YOHANES G. G. L. DURAN
03111750020003

DOSEN PEMIMBING
Harun Alrasyid, S.T., M.T., Ph.D
Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D

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

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

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

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Yohanes Gualbertus Guswanto Lesu Duran

NRP: 03111750020003

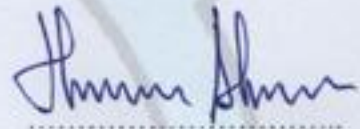
Tanggal ujian : 21 Januari 2020

Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.
NIP: 19830808 200812 1 005



2. Data Iranata, ST., MT., Ph.D.
NIP: 19800430 200501 1 002



Penguji:

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



2. Prof. Dr. Ir. Triwulan
NIP: 19510309 197412 2 001



Kepala Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan



Dra. Henny Emboro Lasminto, ST., M.Sc.

NIP: 19721202 199802 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

Tesis yang berjudul: "Pemodelan *Headed Bar* pada Hubungan Balok-Kolom Interior Akibat Beban Statik Non Linear Menggunakan Metode Elemen Hingga" ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tulisan untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tulisan yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tulisan orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah disertasi maupun daftar pustaka.

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

Surabaya, Januari 2020



Yohanes Gualbertus Guswanto Lesu Duran

NRP: 03111750020003

PEMODELAN *HEADED BAR* PADA HUBUNGAN BALOK-KOLOM
INTERIOR AKIBAT BEBAN STATIK NON LINEAR
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Yohanes G. G. L. Duran
NRP : 03111750020003
Pembimbing : 1. Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.
2. Data Iranata, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Penggunaan *Headed bar* pada hubungan balok-kolom eksterior bangunan menggantikan kait standar 90 derajat dan 180 derajat terus diteliti. Berdasarkan hasil telaah literatur ditemukan bahwa kajian hubungan balok-kolom menggunakan *headed bar* masih sebatas kajian eksperimental dengan mutu beton maupun besi tulangan masih sebatas mutu normal. Peneliti kemudian tertarik menggunakan metode numerikal untuk meninjau perilaku hubungan balok-kolom interior dengan menggunakan program bantu vector2. Penelitian ini melibatkan 8 grup spesimen dengan variabel mutu beton, besi tulangan dan panjang penjangkaran.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *headed bar* pada hubungan balok-kolom interior tetap menghasilkan perilaku yang daktail, semakin pendek panjang pengangkuran *headed bar* maka semakin kecil pula gaya geser, penggunaan tulangan dengan mutu normal ($f_y=400$ MPa) menghasilkan perilaku yang lebih daktail dibandingkan menggunakan tulangan mutu tinggi ($f_y=625$ MPa), semakin tinggi mutu beton maka semakin daktail pula perilakunya dan *headed bar* dapat digunakan pada hubungan balok-kolom interior namun diperlukan kajian eksperimental.

Kata Kunci : *hubungan balok-kolom interior, konvensional, headed bar, metode elemen hingga, vector2, gaya geser, daktail*

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

HEADED BAR MODELING IN INTERIOR BEAM-COLUMN JOINT DUE TO NON LINEAR STATIC LOAD USING FINITE ELEMENT METHODS

Researcher : Yohanes G. G. L. Duran
NRP : 03111750020003
Supervisor : 1. Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.
2. Data Iranata, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

The use of headed bar in the building's beam-column joint to replace the standard 90 degree and 180 degree hooks continues to be studied. Based on the results literatures review, it was found that the study of beam-column joints using the headed bar still limited to an experimental study using normal quality reinforced concrete. The researcher interested in using numerical methods to review the behavior of the interior beam-column joint using vector2. This research involved 8 groups of specimens with variable quality of concrete, reinforcement and anchor length.

The results showed that the use of headed bars in the interior beam-column joint still produces ductile behavior, the shorter the length of headed bar anchoring the smaller the shear force, the use normal reinforcement quality ($f_y = 400$ MPa) produces higher ductile behavior than using high quality reinforcement ($f_y = 625$ MPa). The higher concrete quality, the higher ductile behavior can be gained. The headed bar can be used in the interior beam-column relationship but an experimental study is needed to gain the best result.

Keywords : *beam-column joint, conventional, headed bar, finite element methode, vector2, shear force, ductile*

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis mampu menyelesaikan penulisan Thesis dengan judul “Pemodelan *Headed Bar* pada Hubungan Balok-Kolom Interior Akibat Beban Statik Non Linear Menggunakan Metode Elemen Hingga”.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan penulisan Thesis ini, penulis mendapat bantuan dari berbagai pihak secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada :

1. Allah Yang Maha Esa yang selalu memberikan rahmat dan karunia-Nya.
2. Orang tua dan keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan dalam setiap kegiatan belajar sehingga Thesis ini dapat diselesaikan.
3. Bapak Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D., dan Bapak Data Iranata, ST., MT., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan Thesis ini.
4. Bapak Dr. Ir, Djoko Irawan, M. S., selaku dosen wali yang selalu memberi arahan dalam masa perkuliahan.
5. Seluruh dosen pengajar dan staff karyawan di Program Pascasarjana Departemen Teknik Sipil FTSLK-ITS, terima kasih atas ilmu dan kebaikan yang telah diberikan.
6. Teman-teman Pascasarjana Teknik Sipil bidang Struktur ITS 2017 yang turut serta membantu dan memberikan semangat kepada penulis.
7. Teman-teman futsal Pascasarjana ITS yang selalu memberikan doa dan dukungan kepada penulis.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang turut membantu penulis secara langsung maupun tidak langsung selama masa perkuliahan dan penulisan Thesis ini, semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas jasa dan kebaikan anda.

Penulisan Thesis ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis membutuhkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak dalam perbaikan Thesis ini. Semoga Thesis ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.1 Rumusan Masalah.....	6
1.2 Batasan Masalah	7
1.3 Tujuan.....	7
1.4 Manfaat	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Pendahuluan	9
2.2 Penyaluran Tulangan.....	9
2.2.1 Penyaluran Kait Standar dalam Kondisi Tarik	12
2.2.2 Penyaluran Tulangan Berkepala (<i>Headed Bar</i>) dalam Kondisi Tarik.	13
2.3 Pengertian <i>Headed Bar</i>	15
2.4 Jenis <i>Headed Bar</i>	15
2.5 Sejarah Penggunaan <i>Headed Bar</i>	23
2.6 Penggunaan <i>Headed Bar</i> pada Hubungan Balok-Kolom.....	25
2.7 Program Vector2.....	54
BAB III METODOLOGI.....	57
3.1 Umum.....	57
3.1 Persiapan Data.....	58
3.2 Tinjauan Pustaka.....	58
3.3 Validasi Model Spesimen Eksperimental.....	58

3.3.1	Eksperimental Chun dan Kim (2004)	59
3.3.2	Eksperimental Yang et al (2018)	60
3.4	Validasi Hasil	62
3.4.1	Eksperimental Chun dan Kim (2004)	62
3.4.2	Eksperimental Yang et al (2018)	66
3.5	Spesimen Hubungan Balok-Kolom Interior	69
3.6	Pemodelan Hubungan Balok-Kolom Interior dengan Program Vector2..	78
3.6.1	<i>The Job Data</i>	78
3.6.2	Data Struktur	79
3.6.3	<i>Define and Mesh Structure</i>	81
3.6.4	<i>The Load Case Data</i>	83
3.6.5	<i>Running Vector</i>	83
3.7	Kesimpulan	83
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN		85
4.1	Umum	85
4.2	Detail Spesimen dan Properti Material	85
4.3	Pemodelan Numerik	86
4.4	Hasil dan Pembahasan	89
4.4.1	Kurva Beban dan Drift	90
4.4.2	Hubungan Daktilitas dengan Panjang Penjangkaran	96
4.4.3	Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran <i>Headed Bar</i> dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran	101
4.4.4	Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran <i>Headed Bar</i> dengan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran	106
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		111
5.1	Kesimpulan	111
5.2	Saran	111

DAFTAR PUSTAKA	113
BIODATA PENULIS	115
LAMPIRAN	117

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Panjang penyaluran tulangan ulir pada kondisi tarik (SNI 2847:2013 Pasal 12.2.2)	11
Tabel 2. 2 T-headed Bars HRC 100 dan HRC 200 (HRC Hight Standard & Hight Performance T-Headed Bar 2009).....	19
Tabel 2. 3 Ukuran Headed Bar Terminator D6 (Erico n.d.)	20
Tabel 2. 4 Ukuran Headed Bar Terminator D16 (Erico n.d.).....	21
Tabel 2. 5 Data Acuan Eksperimental S. Chun and Kim (2004)	28
Tabel 2. 6 Hasil Pengujian Eksperimental S. Chun and Kim (2004).....	30
Tabel 2. 7 Kekuatan Lateral dan Perpindahan Ultimit Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)	36
Tabel 2. 8 Hasil Pengujian Displacement ductility factor dari Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)	37
Tabel 2. 9 Kekakuan Hasil Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)	38
Tabel 2. 10 Mutu Beton Hasil Pengujian Eksperimental Yang et al (2018)	41
Tabel 2. 11 Mutu Baja Tulangan Hasil Pengujian Eksperimental Yang et al (2018)	41
Tabel 2. 12 Evaluasi gaya geser horizontal pada join eksperimental Yang et al (2018)	44
Tabel 3. 1 Properti material specimen JM-1	60
Tabel 3.2 Properti material specimen CL-3	61
Tabel 3. 3 Validasi hasil eksperimental dan output vector2 spesimen JM-1	65
Tabel 3.4 Validasi hasil eksperimental dan output vector2 spesimen CL-3	68
Tabel 3. 5 Data geometri dan property beton balok	74
Tabel 3. 6 Data geometri dan property tulangan longitudinal balok	75
Tabel 3. 7 Data geometri dan property kolom.....	76
Tabel 3. 8 Perhitungan mode kegagalan pada balok	77
Tabel 4. 1 Data Properti Spesimen	86

Tabel 4. 2 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=25$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa).....	94
Tabel 4. 3 Hasil Analisa Spesimen-spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=40$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa).....	95
Tabel 4. 4 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa).....	95
Tabel 4. 5 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=100$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa).....	95
Tabel 4. 6 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=25$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa).....	95
Tabel 4. 7 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=40$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa).....	96
Tabel 4. 8 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Ttinggi ($f_c'=70$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa).....	96
Tabel 4. 9 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=100$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa).....	96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Konsep <i>Headed Reinforcement Bar</i> (Alrasyid et al. 2017).....	2
Gambar 1. 2 Detail pengangkuran. Dari kiri ke kanan: <i>friction welding, threaded connection, forging dan tradisional weld</i> (Alrasyid et al. 2017).....	3
Gambar 2. 1 Detail batang tulangan dengan penyaluran kait standar (SNI 2847 2013 2013)	12
Gambar 2. 2 <i>Headed Reinforcement Bar</i> (Marchetto 2015).....	15
Gambar 2. 3 Konsep <i>Headed Reinforcement Bar</i> (Alrasyid et al. 2017).....	15
Gambar 2. 4 Proses <i>Friction-welding technology</i> (Francesco Mrachetto 2015)	16
Gambar 2. 5 <i>T-headed Bars HRC 100 series – performance</i> (HRC Hight Standard & Hight Performance T-Headed Bar 2009)	17
Gambar 2. 6 <i>HRC 200 series – T-headed Bars for Fatigue Load</i> (HRC Hight Standard & Hight Performance T-Headed Bar 2009)	17
Gambar 2. 7 ERICO Lenton Terminator: versi standar dan yang dilengkapi dengan ring perantara, untuk batang besar (Francesco Mrachetto 2015).....	20
Gambar 2. 8 <i>Headed Bar</i> produksi Dextra Group (Francesco Mrachetto 2015).....	22
Gambar 2. 9 BPI-Grip Buttonhead (Francesco Mrachetto 2015)	22
Gambar 2. 10 Detail Spesimen Eksperimental S. Chun and Kim (2004).....	27
Gambar 2. 11 <i>Test Setup and Loading Schedule</i> Eksperimental S. Chun and Kim (2004).....	28
Gambar 2. 12 <i>Load versus Displacement</i> Eksperimental S. Chun and Kim (2004) ...	30
Gambar 2. 13 Kondisi Akhir Pengujian Spesimen Eksperimental S. Chun and Kim (2004).....	31
Gambar 2. 14 Detail Dimensi dan Pengangkuran Spesimen Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014).....	33
Gambar 2. 15 Detail Kombinasi Hubungan Balok-Kolom Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014).....	33

Gambar 2. 16 Pengujian Spesimen Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)	34
Gambar 2. 17 Kurva Histeresis Benda Uji Grup I Eksperimental Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)	35
Gambar 2. 18 Kurva Histeresis Benda Uji Grup II Eksperimental Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)	36
Gambar 2. 19 Grafik <i>Stiffness vs Displacement</i> Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)	37
Gambar 2. 20 Pola Retak Spesimen Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)	38
Gambar 2. 21 Metode pengujian Hubungan Balok-Kolom Interior Eksperimental Yang et al (2018)	40
Gambar 2. 22 Geometri, dimensi dan detail penulangan Eksperimental Yang et al (Yang et al. 2018)	40
Gambar 2. 23 Spesimen Hubungan Balok-Kolom Interior Eksperimental Yang et al (2018)	42
Gambar 2. 24 <i>Loading History</i> Eksperimental Yang et al (2018)	42
Gambar 2. 25 kurva hisrteresis <i>force vs displacement</i> eksperimental Yang et al (2018)	43
Gambar 2. 26 Pengamatan Retak Spesimen Eksperimental Yang et al (2018)	45
Gambar 2. 27 <i>Equivalent viscous dumping dan stiffness degradation</i> eksperimental Yang et al (2018)	46
Gambar 2. 28 Kurva histeristis <i>joint shear stress vs joint shear strain</i> grup I dan IV eksperimental Yang et al (2018)	48
Gambar 2. 29 Perbandingan envelope deformasi geser join eksperimental Yang et al (2018)	48
Gambar 2. 30 Perbandingan kurva <i>joint shear deformation-feature points</i> eksperimental Yang et al (2018)	49

Gambar 2. 31 Perbandingan envelope dari slip tulangan balok eksperimental Yang et al (2018)	51
Gambar 2. 32 Perbandingan slip tulangan longitudinal balok-beberapa titik puncak eksperimental Yang et al (2018)	52
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	57
Gambar 3. 2 Detail Spesimen JM-1 Eksperimental Chun dan Kim (S. Chun and Kim 2004)	59
Gambar 3. 3 Detail spesimen CL-3 eksperimental Yang et al (Yang et al. 2018)	61
Gambar 3. 4 Metode perletakan dan pembebanan spesimen JM-1	63
Gambar 3. 5 Desain spesimen JM-1 dengan program bantu vector2	63
Gambar 3. 6 Kurva <i>force vs drift</i> hasil eksperimental dan <i>output</i> vector2	64
Gambar 3. 7 Pola retak hasil eksperimental (kiri) dan <i>output</i> vector2 (kanan)	65
Gambar 3. 8 Metode pembebanan dan perletakan spesimen CL-3 eksperimental Yang et al (Yang et al. 2018)	66
Gambar 3. 9 Desain spesimen CL-3 dengan program bantu vector2	67
Gambar 3. 10 Kurva <i>force vs drift</i> hasil eksperimental dan <i>output</i> vector2 spesimen CL-3	68
Gambar 3. 11 Pola retak hasil eksperimental (kiri) dan pola retak <i>output</i> vector2 (kanan)	69
Gambar 3. 12 Penamaan Spesimen Konvensional (kiri) dan Spesimen <i>Headed Bar</i> (kanan)	70
Gambar 3. 13 Dimensi Kolom	70
Gambar 3. 14 Dimensi Balok	70
Gambar 3. 15 Detail Penulangan Hubungan Balok-Kolom Interior Konvensional	71
Gambar 3. 16 Detail Penulangan Hubungan Balok-Kolom Interior Menggunakan <i>Headed Bar</i>	71
Gambar 3. 17 Detail Spesimen BC-25-400-HB-0,25-150; BC-40-400-HB-0,25-150; BC-70-400-HB-0,25-150; BC-100-400-HB-0,25-150; BC-25-625-HB-	

0,25-150; BC-40-625-HB-0,25-150; BC-70-625-HB-0,25-150 dan BC-25-625-HB-0,25-150.....	72
Gambar 3. 18 Detail Spesimen BC-25-400-HB-0,25-176; BC-40-400-HB-0,25-176; BC-70-400-HB-0,25-176 dan BC-100-400-HB-0,25-176.....	72
Gambar 3. 19 Detail Spesimen BC-25-625-HB-0,25-128; BC-40-625-HB-0,25-128; BC-70-625-HB-0,25-128 dan BC-25-625-HB-0,25-128.....	72
Gambar 3. 20 Detail Spesimen BC-25-400-HB-0,25-334,4; BC-40-400-HB-0,25-264,37; dan BC-70-400-HB-0,25-199,84 (dari kiri ke kanan).....	73
Gambar 3. 21 Detail Spesimen BC-100-400-HB-0,25-167,2; BC-25-625-HB-0,25-380; dan BC-40-625-HB-0,25-300,42 (dari kiri ke kanan).....	73
Gambar 3. 22 Detail Spesimen BC-70-625-HB-0,25-227,09 dan BC-100-625-HB-0,25-190 (dari kiri ke kanan).....	73
Gambar 3. 23 <i>The Job Control Page</i>	78
Gambar 3. 24 <i>The Models Page</i>	79
Gambar 3. 25 <i>Define Reinforced Concrete Material Dialog Box</i>	80
Gambar 3. 26 <i>Define Reinforcement Material Dialog Box</i>	80
Gambar 3. 27 <i>Defining Nodes Dialog Box</i>	81
Gambar 3. 28 <i>Mesh Structure Dialog Box</i>	82
Gambar 3. 29 <i>Apply Support Displacement Dialog Box</i>	83
Gambar 4. 1 Model material spesimen.....	87
Gambar 4. 2 Metode pembebanan spesimen.....	87
Gambar 4. 3 Hasil desain spesimen BC-25-400-C-0,25 dengan program bantu vector2.....	88
Gambar 4. 4 Perilaku <i>Displacement</i> Spesimen BC-25-400-C-0,25 (Output Vector2).....	89
Gambar 4. 5 Kurva Beban dan <i>Drift Output</i> vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=25$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa).....	90

Gambar 4. 6 Kurva Beban dan <i>Drift Output</i> vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=40$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa)	90
Gambar 4. 7 Kurva Beban dan <i>Drift Output</i> vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa)	91
Gambar 4. 8 Kurva Beban dan <i>Drift Output</i> vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=100$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa)	91
Gambar 4. 9 Kurva Beban dan <i>Drift Output</i> vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=25$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa).....	92
Gambar 4. 10 Kurva Beban dan <i>Drift Output</i> vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=40$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa).....	92
Gambar 4. 11 Kurva Beban dan <i>Drift Output</i> vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa).....	93
Gambar 4. 12 Kurva Beban dan <i>Drift Output</i> vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=100$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa).....	93
Gambar 4. 13 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Tulangan Longitudinal 400 MPa....	97
Gambar 4. 14 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Tulangan Longitudinal 625 MPa....	98
Gambar 4. 15 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu beton 25 MPa	99
Gambar 4. 16 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Beton 40 MPa.....	99

Gambar 4. 17 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Beton 70 MPa.....	100
Gambar 4. 18 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Beton 100 MPa.....	100
Gambar 4. 19 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran <i>Headed Bar</i> dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Tulangan Mutu normal($f_y=400$ MPa)	101
Gambar 4. 20 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran <i>Headed Bar</i> dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Tulangan Mutu Tinggi($f_y=625$ MPa)	102
Gambar 4. 21 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran <i>Headed Bar</i> dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=25$ MPa)	103
Gambar 4. 22 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran <i>Headed Bar</i> dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran Beton Mutu Normal ($f_c'=40$ MPa)	104
Gambar 4. 23 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran <i>Headed Bar</i> dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Tinggi($f_c'=70$ MPa)	104
Gambar 4. 24 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran <i>Headed Bar</i> dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Tinggi($f_c'=100$ MPa)	105
Gambar 4. 25 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran <i>Headed Bar</i> dan Gaya Geser Maksimum Spesimen	

	Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Tulangan Mutu Normal ($f_c' = 400$ MPa).....	106
Gambar 4. 26	Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran <i>Headed Bar</i> dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Tulangan Mutu Tinggi ($f_c' = 625$ MPa)	107
Gambar 4. 27	Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran <i>Headed Bar</i> dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 25$ MPa).....	108
Gambar 4. 28	Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran <i>Headed Bar</i> dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 40$ MPa).....	108
Gambar 4. 29	Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran <i>Headed Bar</i> dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c' = 70$ MPa).....	109
Gambar 4. 30	Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran <i>Headed Bar</i> dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c' = 100$ MPa)	109

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan gedung bertingkat tinggi semakin banyak ditemukan di segala penjuru dunia. Pada tahun 2016 menjadi tahun pembangunan gedung pencakar langit yang paling gencar. Tercatat 128 bangunan gedung yang selesai dibangun pada tahun 2016. Jumlah gedung pencakar langit yang dibangun pada tahun 2016 melebihi jumlah gedung pencakar langit yang dibangun pada tahun-tahun sebelumnya. Selama 2016 Benua Asia sukses membukukan jumlah terbanyak pembangunan gedung pencakar langit yaitu sebanyak 107 gedung. Indonesia menjadi salah satu negara yang hampir setiap tahun dibangun gedung-gedung tinggi. Indonesia berhasil mengungguli Filipina, Qatar, Malaysia, Singapura, Thailand, Uni Emirat Arab dan Australia dalam hal pembangunan gedung bertingkat tinggi atau pencakar langit pada tahun 2016 (Gabel et al. 2018).

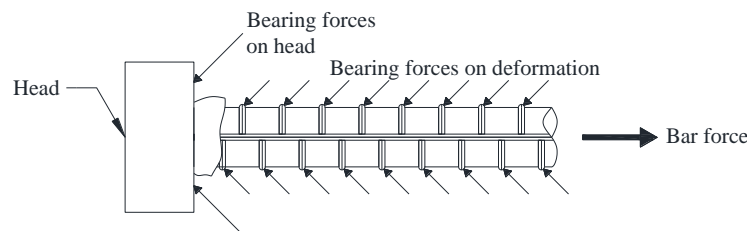
Gedung-gedung bertingkat tinggi di Indonesia memiliki tingkat resiko yang tinggi terhadap gempa. Hampir di setiap wilayah Indonesia merupakan daerah rawan gempa. Hal ini disebabkan karena letak geografis Indonesia di pertemuan 3 lempeng tektonik yaitu lempeng Australia, lempeng Pasifik dan lempeng Euroasia (Suharjanto 2013).

Kondisi Indonesia yang menjadi daerah langganan gempa ini tidak menyurutkan pembangunan gedung bertingkat tinggi selaras dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang teknik sipil. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya eksperimen pada bagian-bagian struktur bangunan yang rawan terhadap gempa dan program bantu dalam merencanakan sebuah struktur gedung yang tahan terhadap gempa. Salah satu bagian yang menjadi bagian struktur yang paling rawan apabila terjadi gempa yaitu hubungan balok-kolom.

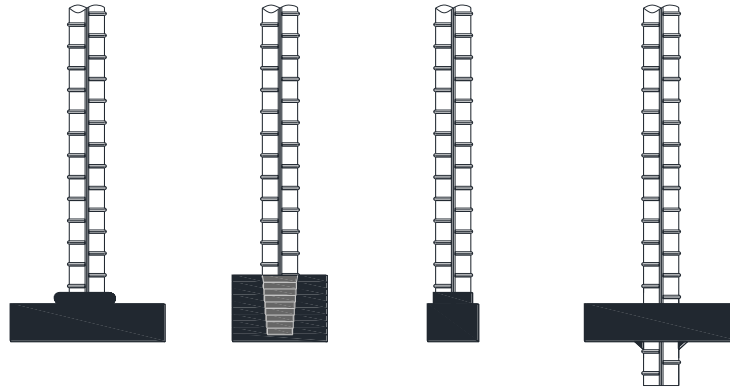
Pengankuran menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi kekuatan hubungan balok-kolom. Persyaratan pengankuran kait 90 derajat, 135 derajat dan 180 derajat ini pun sudah diatur dalam peraturan SNI-2847-2013 untuk di Indonesia. Persyaratan pengankurannya pun sudah dijelaskan sangat detail dalam SNI-2847-2013.

Seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, pengankuran kait 90 derajat, 135 derajat dan 180 derajat tidak lagi menjadi opsi tunggal pengankuran. *Headed bar* muncul dengan memberikan kinerja yang serupa dengan kait 90 derajat dan 180 derajat pada hubungan balok-kolom eksternal. Hal ini dapat disimak dalam pemaparan penelitian tentang *headed bar* yang sudah dilakukan.

Headed bar merupakan batang penguat yang menempel pada satu atau kedua ujung tulangan berupa plat baja atau mur (Francesco Mrachetto 2015). *Headed bar* terbuat dari plat atau mur yang dipasang pada satu atau kedua ujung tulangan yang memberikan luasan atau area yang membantu menahan tulangan terhadap gaya tarik (Thompson et al. 2002). *Headed bar* dibuat dengan menempelkan mur plat pada ujung tulangan dengan cara *friction welding*, *threaded connection*, *forging* atau *tradisional weld* seperti pada gambar 1.2 (Alrasyid et al. 2017). Mur plat ini dapat memberikan area bantalan besar yang dapat membantu menahan gaya tarik pada tulangan. Kombinasi *bearing* pada tulangan dan *headed bar* memberikan ketahanan jangkar terhadap gaya tarik di tulangan (Alrasyid et al. 2017). Konsep penjelasan ini dapat dilihat pada gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Konsep Headed Reinforcement Bar (Alrasyid et al. 2017)



Gambar 1. 2 Detail pengangkuran. Dari kiri ke kanan: *friction welding, threaded connection, forging dan tradisional weld* (Alrasyid et al. 2017)

Headed bar yang sudah diproduksi oleh HRC (*Headed Reinforcement Corp*) yaitu *T-headed bar*. *T-headed bar* terdiri dari beberapa tipe yaitu tipe 110, tipe 120, tipe 150, tipe 170, tipe 210 dan tipe 220(HRC Hight Standard & Hight Performance T-Headed Bar 2009). Selain itu, *headed bar* juga sudah diproduksi oleh Erico, Dextra Group dan Bar Splice.

Wallace et al. (1998) telah melakukan penelitian terkait penggunaan *headed bar* pada hubungan balok-kolom terhadap beban gempa. Dalam penelitian tersebut Wallace dkk melakukan pengujian terhadap 7 benda uji. 5 benda uji menggunakan *headed bar* sebagai *anchor* yang meliputi 2 buah hubungan balok-kolom bagian tepi dan 3 buah hubungan balok-kolom bagian pojok. Benda uji lainnya merupakan hubungan balok-kolom bagian pojok dengan menggunakan tulangan kait satandar 90 derajat.

Wallace et al. (1998) dalam penelitian ini menemukan hasil yang tidak hanya berkaitan dengan perilaku *headed bar* pada hubungan balok-kolom bagian tepi dan pojok terhadap gempa saja melainkan juga manfaat dan kemudahan dengan menggunakan *headed bar*. Hasil peneliannya meliputi :

- Pelaksanaan pabrikasi menggunakan *headed bar* lebih mudah dibandingkan tulangan dengan kait standar 90 derajat
- Penuangan beton lebih mudah

- Perakitan tulangan balok bagian luar menggunakan *headed bar* dapat dilakukan di tempat pabrikasi dan kemudian diletakan di tempat yang direncanakan menggunakan crane.
- Prilaku *headed bar* sama baik atau bahkan lebih baik dari tulangan dengan kait standar 90 derajat.

S. Chun and Kim (2004) yang membahas tentang hasil percobaan hubungan balok-kolom eksterior menggunakan kait standar 90 derajat dan headed bar. Chun dan Kim membandingkan hasil pengujian hubungan balok-kolom eksterior dengan menggunakan kait standar 90 derajat dan hubungan balok-kolom eksterior yang menggunakan angkur atau headed bar. Hasil penelitian S. Chun and Kim menunjukkan bahwa spesimen hubungan balok-kolom dengan ujung tulangan kait 90 derajat dan ujung tulangan menggunakan headed bar menghasilkan perilaku yang mirip.

Keefektifan dari *headed bar* pada hubungan balok-kolom eksterior sudah diuji. Sembilan hubungan balok-kolom eksterior diuji dengan beban siklik dimana yang menjadi parameter pertama adalah tipe *anchor*, ukuran dan susunan tulangan dan *headed bar* dan detail dari hubungan pada bagian atap. Hasil dari pengujian mengindikasikan bahwa perilaku dari hubungan balok-kolom dengan menggunakan *headed bar* hampir sama atau bahkan lebih dari hubungan balok-kolom menggunakan kait standar yang dipakai di Korea(S. C. Chun et al. 2007).

Kang, Shin, and Mitra (2009) menjelaskan bahwa bagian 12.6 ketentuan ACI 318-08 rincian pengembangan *headed* dan kait mekanis dimasukan untuk pertama kalinya dalam seri kode. Sebelumnya, gabungan ACI-ASCE Committee-352 mempublikasikan rekomendasi desain untuk *headed reinforcement* pada hubungan balok-kolom beton bertulang (ACI 352R-02). Namun, keduanya ACI 318-08 dan 352R-02 memiliki keterbatasan penelitian eksperimental. Mengingat kekhawatiran ini, standar ACI ini dan rekomendasi yang sudah dievaluasi menggunakan basis data yang luas meliputi data uji utama untuk hubungan balok-kolom beton bertulang menggunakan *headed bar* yang mengalami pembebanan siklik. Tujuan utamanya adalah untuk mendokumentasikan investigasi eksperimental dalam format seragam;

memberikan detail tinjauan untuk data uji; dan, akhirnya, usulkan panduan desain untuk mendukung ACI 352R-02 dan 318-08 diterapkannya *headed bar* pada hubungan balok-kolom.

Rajagopal and Prabavathy (2014) telah melakukan eksperimen dengan 6 buah sampel dengan menggunakan 3 tipe tulangan anker yang dikombinasikan dengan *cross bar* dan *hair clip* untuk mengetahui perilaku akibat gempa dari hubungan balok-kolom eksterior. Tiga tipe *anchor* tersebut yaitu *T-type headed bar* berdasarkan ACI-352, tipe kait standar 90 derajat berdasarkan ACI-318 dan tipe tulangan kait penuh berdasarkan IS-456.

Rajagopal and Prabavathy (2014) dalam penelitiannya ini memperoleh hasil yang menyatakan bahwa *T-type headed bar* memiliki performa yang baik terhadap beban gempa dibandingkan 2 tipe lainnya. Selain itu, *T-type headed bar* memudahkan dalam penuangan beton dan membantu percepatan konstruksi. Rajagopal dan Prabavathy juga mengatakan bahwa *T-type headed bar* merupakan alternatif dari tulangan dengan menggunakan kait standar 90 derajat.

Yang et al (2018) melakukan penelitian tentang perbandingan 2 metode pembebanan pada sambungan balok-kolom interior. Dua metode pembebanan tersebut yaitu metode pembebanan pada ujung kolom (*loading at column end method*) dan metode pembebanan pada ujung balok (*loading at beam end method*). Setelah melakukan pengamatan Yang et al menyatakan bahwa metode pembebanan pada ujung balok memiliki kuat geser pada joint sangat tinggi dan deformasi akibat geser pada joint sangat tinggi dibandingkan menggunakan metode pembebanan pada ujung kolom.

Berdasarkan hasil telaah literatur ditemukan bahwa kajian hubungan balok-kolom dengan ujung tulangan longitudinal menggunakan *headed bar* masih sebatas kajian eksperimental. Kajian numerikal belum banyak dilakukan. Selain itu mutu baja dan tulangan yang digunakan masih sebatas mutu normal. Peneliti kemudian tertarik menggunakan metode numerikal untuk meninjau perilaku hubungan balok-kolom interior dengan menggunakan program bantu vector2.

Program vector2 merupakan satu seri dari analisis metode elemen hingga non linear yang dikembangkan di Universitas Toronto. Program vector2 dikembangkan di Universitas Toronto pada tahun 1990. Pada waktu itu versi aslinya adalah TRIX© (Wong, Vecchio, and Trommels 2013). Dasar teori program vector2 adalah *The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete elements Subjected to Shear* (Vecchio and Collins 1986) dan *The Distributed Stress Field Model for Reinforced Concrete* (Vecchio 2000).

Pada penelitian ini, peneliti akan memodelkan hubungan balok-kolom interior konvensional dan hubungan balok-kolom interior menggunakan *headed bar* menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2.

1.1 Rumusan Masalah

Pemasalahan yang dihadapi peneliti dalam memodelkan *headed bar* pada hubungan balok-kolom interior terhadap beban gempa menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2 adalah sebagai berikut :

- 1) Bagaimana model penulangan hubungan balok-kolom interior konvensional dan hubungan balok-kolom interior menggunakan *headed bar*?
- 2) Bagaimana cara memodelkan hubungan balok-kolom interior konvensional dan menggunakan *headed bar* terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2?
- 3) Bagaimana gaya geser dan perpindahan/*displacement headed bar* pada hubungan balok-kolom interior dibandingkan dengan hubungan balok-kolom bagian interior konvensional terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2?
- 4) Bagaimana perilaku *headed bar* dengan ℓ_{dh} yang disyaratkan oleh SNI pada hubungan balok-kolom interior terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2?
- 5) Apakah *headed bar* dapat diterapkan pada hubungan balok-kolom interior?

1.2 Batasan Masalah

Batasan masalah yang dibuat peneliti untuk mempermudah dalam pembahasan yaitu sebagai berikut :

- 1) Penampang yang digunakan dalam pemodelan ini yaitu balok persegi panjang dan kolom persegi.
- 2) Penentuan jarak penempatan *headed bar* pada hubungan balok-kolom interior terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2 berdasarkan peraturan SNI-2847-2013.
- 3) Pemodelan hubungan balok-kolom interior konvensional dan *headed bar* terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2.

1.3 Tujuan

Tujuan peneliti dalam penelitian yang berjudul “Pemodelan *Headed Bar* pada Hubungan Balok-Kolom Interior Terhadap Beban Statik Non Linear Menggunakan metode Elemen Hingga” yaitu sebagai berikut :

- 1) Untuk memodelkan hubungan balok-kolom interior konvensional dan menggunakan *headed bar* terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2.
- 2) Untuk mencari gaya geser dan perpindahan/*displacement* pada hubungan balok kolom interior konvensional dan *headed bar* terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2 berdasarkan variabel yang ada.
- 3) Untuk mencari perbandingan gaya geser dan perpindahan/*displacement* pada hubungan balok-kolom interior konvensional dan *headed bar* terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2 berdasarkan variabel yang ada.

- 4) Untuk mencari bagaimana kinerja hubungan balok-kolom interior yang menggunakan *headed bar* dengan hubungan balok-kolom interior konvensional terhadap beban statik non linear menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu vector2 berdasarkan variabel yang ada.
- 5) Untuk mencari tahu apakah *headed bar* dapat diterapkan pada hubungan balok-kolom interior.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dalam pemodelan *headed bar* pada hubungan balok-kolom interior menggunakan metode elemen hingga yaitu sebagai berikut :

- 1) Memberikan informasi tentang penggunaan *headed bar* pada hubungan balok-kolom interior dan bagaimana kinerjanya dibandingkan dengan hubungan balok-kolom interior konvensional terhadap beban statik non linear.
- 2) Memberikan panduan dalam menggunakan program bantu vector2 dalam memodelkan sebuah struktur.
- 3) Memberikan rekomendasi kepada praktisi menggunakan *headed bar* pada hubungan balok-kolom interior.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Pembahasan dalam bab ini mengarahkan atau memberikan gambaran tentang *literature* dan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan hubungan balok-kolom.

2.2 Penyaluran Tulangan

Tarik dan tekan yang dihitung pada tulangan di setiap penampang komponen struktur beton harus disalurkan pada masing-masing sisi penampang tersebut melalui panjang penanaman, kait, batang ulir berkepala (*headed deformed bar*) alat mekanis atau kombinasi darinya. Kait dan kepala tidak boleh digunakan untuk menyalurkan batang tulangan dalam kondisi tekan. Nilai $\sqrt{f_c}$ yang dipakai tidak boleh melebihi 8,3 MPa (SNI 2847 2013; pasal 12.1).

Panjang penyaluran (l_d) adalah panjang penanaman tulangan yang diperlukan agar tulangan tersebut dapat mengembangkan kuat rencananya (f_y). Apabila Panjang penyaluran yang disediakan kurang dari yang disyaratkan oleh peraturan SNI 2847:2013, maka tegangan lekatan pada daerah tarik dari balok akan menjadi cukup tinggi sehingga menimbulkan retak dan mengelupasnya selimut beton disekitar tulangan tarik hingga mengalami keruntuhan (Setiawan 2016).

Panjang penyaluran dapat dinyatakan dalam nilai ultimit dari tegangan lekatan rata-rata, dengan menyamakan nilai dari f_{s2} - f_{s1} menjadi f_y sehingga diperoleh:

$$l_d = \frac{f_y d_b}{4 \times \mu_{\text{rata-rata}, \mu}} \quad \text{Pers. 2.1}$$

Persamaan 2.1 memperlihatkan bahwa panjang penyaluran memiliki kaitan dengan diameter, mutu baja serta tegangan lekat ultimit. Panjang penyaluran tulangan dalam kondisi tarik diatur dalam SNI 2847:2013 Pasal 12.2.3, yang menyatakan bahwa perhitungan panjang penyaluran harus menggunakan persamaan:

$$l_d = \left(\frac{f_y}{1,1\lambda\sqrt{f_c}} \frac{\Psi_t\Psi_e\Psi_s}{\left(\frac{c_b+K_{tr}}{d_b}\right)} \right) d_b \quad \text{Pers. 2. 2}$$

Keterangan :

1. Ψ_t adalah faktor lokasi tulangan:

$\Psi_t = 1,3$ untuk tulangan atas, yang didefinisikan sebagai tulangan horizontal yang ditempatkan hingga lebih dari 300 mm beton segar dicor pada komponen di bawah panjang penyaluran yang ditinjau

$\Psi_t = 1,0$ untuk tulangan lainnya

2. Ψ_e adalah faktor pelapis tulangan:

$\Psi_e = 1,5$ untuk tulangan berlapis epoksi dengan selimut beton kurang dari $3d_b$ atau spasi bersih kurang dari $6d_b$

$\Psi_e = 1,2$ untuk tulangan berlapis epoksi lainnya

$\Psi_e = 1,0$ untuk tulangan tanpa lapisan epoksi

3. Ψ_s adalah faktor ukuran tulangan:

$\Psi_s = 0,8$ untuk tulangan D-19 atau lebih kecil serta jaringan kawat ulir

$\Psi_s = 1$ untuk tulangan D-19 atau lebih besar

4. λ adalah faktor beton ringan:

$\lambda = 0,75$ untuk beton ringan

$\lambda = \frac{f_{ct}}{0,56\sqrt{f_c}} \geq 1$ jika nilai kuat Tarik belah beton ringan diketahui

$\lambda = 1,0$ untuk beton normal

5. Nilai $\left(\frac{c_b+K_{tr}}{d_b}\right)$ adalah tidak boleh diambil lebih dari 2,5, dengan:

c_b = nilai terkecil dari spasi tulangan atau selimut beton

d_b = diameter tulangan

$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{sn} =$ indeks tulangan transversal

A_{tr} = luas penampang total dari semua tulangan transversal yang berada dalam rentang daerah berspasi s dan yang memotong bidang belah potensial melalui tulangan yang disalurkan

s = spasi maksimum as ke as tulangan transversal yang dipasang di sepanjang ℓ_d

n = jumlah tulangan yang disalurkan di sepanjang bidang belah

Nilai K_{tr} dapat diambil sam dengan nol ($K_{tr}=0$) guna penyederhanaan perencanaan, meskipun ada tulangan transversal terpasang.

6. Nilai f'_c tidak boleh diambil lebih dari 8,3 MPa.
7. Pasal 2.12.5, dinyatakan bahwa Panjang penyaluran boleh direduksi apabila luasan tulangan terpasang pada elemen struktur lentur melebihi luasan yang dibutuhkan dari hasil analisis, kecuali apabila angkur atau penyalur untuk f_y secara khusus diperlukan atau tulangan direncanakan dengan mempertimbangkan pengaruh beban gempa. Besarnya faktor reduksi panjang penyaluran adalah sebagai berikut:

$$R_s = \frac{A_s \text{ perlu}}{A_s \text{ terpasang}} \quad \text{Pers. 2. 3}$$

8. Untuk semua kasus, nilai ℓ_d tidak boleh lebih kecil daripada 300 mm (SNI 2847:2013 Pasal 12.2.1)

Persamaan 2.2 kemudian ditampilkan secara lebih sederhana dengan mengangap $\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b}\right) = 1,5$ dalam SNI 2847 2013 Pasal 12.2.2 yang dirangkum dalam bentuk tabel 2.1.

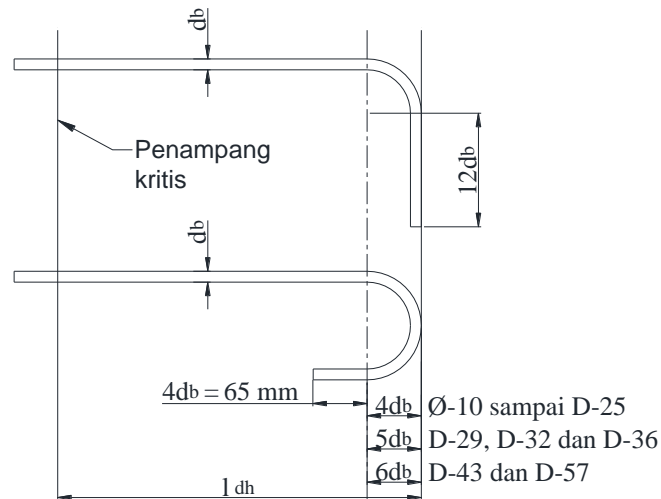
Tabel 2. 1 Panjang penyaluran tulangan ulir pada kondisi tarik (SNI 2847:2013 Pasal 12.2.2)

Jarak Tulangan dan selimut beton	D-19 atau lebih kecil	D-22 atau lebih besar
Spasi bersih tulangan yang disalurkan atau disambung tidak kurang dari d_b , selimut beton bersih tidak kurang dari d_b , dan sengkang atau sengkang ikat yang dipasang sepanjang ℓ_d tidak kurang dari persyaratan minimum sesuai peraturan	$\ell_d = \left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{2,1\lambda\sqrt{f'_c}}\right) d_b$	$\ell_d = \left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,7\lambda\sqrt{f'_c}}\right) d_b$

Jarak bersih tulangan yang disalurkan atau disambung tidak kurang dari 2db dan selimut beton tidak kurang dari db		
Kasus lain	$\ell_d = \left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,4\lambda\sqrt{f'_c}} \right) d_b$	$\ell_d = \left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,1\lambda\sqrt{f'_c}} \right) d_b$

2.2.1 Penyaluran Kait Standar dalam Kondisi Tarik

Panjang penyaluran untuk batang tulangan ulir dalam kondisi tarik yang diakhiri dengan kait standar harus sesuai SNI 2847:2013 pasal 12.5.2 dan faktor modifikasi yang sudah diatur dalam SNI 2847:2013 pasal 12.5.3, tetapi tidak boleh kurang dari 8db dan 150 mm seperti gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Detail batang tulangan dengan penyaluran kait standar (SNI 2847 2013 2013)

Panjang penyaluran (ℓ_{dh}) untuk batang tulangan ulir harus sebesar $\left(\frac{0,24\Psi_e f_y}{\lambda\sqrt{f'_c}} \right) d_b$ dengan Ψ_e diambil sebesar 1,2 untuk tulangan yang dilapisi epoksi, dan λ diambil sebesar 0,75 untuk beton ringan. Untuk kasus yang lain, Ψ_e dan λ harus diambil sebesar 1 (SNI 2847:2013 pasal 12.5.2). Perhitungan Panjang ℓ_{dh} ini harus diizinkan untuk dikalikan dengan faktor-faktor yang dijelaskan pada peraturan SNI 2847:2013 pasal 12.5.3 yaitu sebagai berikut :

- a. Untuk kait batang tulangan dengan diameter tulangan D-36 dan yang lebih kecil dengan selimut samping (normal terhadap bidang kait) tidak boleh kurang dari 65 mm dan untuk kait 90 derajat dengan selimut pada perpanjangan batang tulangan sesudah kait tidak boleh kurang dari 50 mm.
- b. Untuk kait 90 derajat dengan batang tulangan D-36 dan yang lebih kecil yang baik dilingkupi dalam pengikat atau sengkang tegak lurus terhadap batang tulangan yang disalurkan, berspasi tidak lebih besar dari $3d_b$ sepanjang ℓ_{dh} ; atau dilingkupi dalam sengkang atau pengikat paralel terhadap barang yang disalurkan berspasi tidak lebih besar dari $3d_b$ sepanjang panjang perpanjangan ekor kait ditambah bengkokan. Sengkang pertama harus melingkupi bagian bengkokan kait dengan jarak $2d_b$ dari sisi luar bengkokan.
- c. Untuk kait 180 derajat dari batang tulangan D-36 dan lebih kecil yang dilingkupi dalam pengikat atau sengkang tegak lurus terhadap batang tulangan yang disalurkan, berspasi tidak lebih besar dari $3d_b$ sepanjang ℓ_{dh} . Sengkang pertama harus melingkupi bagian bengkokan kait dengan jarak $2d_b$ dari sisi luar bengkokan.
- d. Bila pengankuran atau penyaluran untuk f_y tidak secara khusus diperlukan, tulangan yang melebihi dari yang diperlukan oleh analisis.

Untuk batang tulangan yang disalurkan dengan kait standar pada ujung yang tidak menerus dari komponen struktur dengan selimut samping dan atas terhadap kait kurang dari 65 mm, batang tulangan berkait harus dilingkupi dalam pengikat atau sengkang tegak lurus terhadap batang tulangan yang disalurkan, berspasi tidak lebih besar dari $3d_b$ sepanjang ℓ_{dh} . Pengikat atau sengkang pertama harus melingkupi bagian bengkokan kait dengan jarak $2d_b$ dari sisi luar bengkokan. Untuk kasus ini, faktor-faktor dari pasal 12.5.3(b) dan (c) tidak berlaku (SNI 2847:2013 pasal 12.5.4). Kait tidak boleh dianggap efektif dalam penyaluran batang tulangan dalam kondisi tekan (SNI 2847:2013 pasal 12.5.5).

2.2.2 Penyaluran Tulangan Berkepala (*Headed Bar*) dalam Kondisi Tarik

Penggunaan *headed bar* dalam kondisi tarik sudah diatur dalam SNI 2847-2013 Pasal 12.6 yang berkaitan dengan mutu, diameter tulangan, luasan tumpuan kepala

headed bar, selimut beton dan jarak antar tulangan serta panjang penyaluran. SNI 2847-2013 mensyaratkan penggunaan *headed bar* dalam kondisi tarik harus memenuhi syarat-syarat berikut:

- a. f_y tulangan baja tidak boleh melebihi 420 MPa;
- b. ukuran batang tulangan tidak boleh melebihi D-36;
- c. beton harus dalam berat normal;
- d. luas penampang bersih kepala A_{brg} tidak boleh kurang dari $4A_b$;
- e. selimut bersih untuk batang tulangan tidak boleh lebih dari $2d_b$; dan
- f. spasi bersih antar batang tulangan tidak boleh kurang dari $4 d_b$.
- g. panjang penyalur dalam kondisi tarik l_{dh} harus nilai terbesar dari persamaan 2.4 berikut ini:

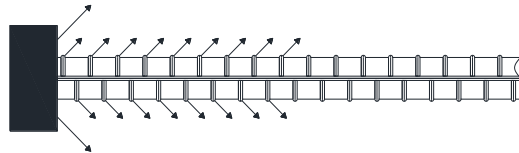
$$l_{dh} = \max \left(\frac{1,19f_y \Psi_e}{\sqrt{f_c}} \right) d_b; 8d_b; 150\text{mm} \quad \text{Pers. 2.4}$$

dengan:

1. f_c tidak boleh melebihi 40 MPa
2. Faktor pelapisan tulangan
 - $\Psi_e = 1,2$ untuk tulangan yang dilapisi epoksi
 - $\Psi_e = 1,0$ untuk kasus lain
- h. Penggunaan *headed bar* tidak boleh dianggap efektif dalam penyaluran batang tulangan dalam kondisi tekan
- i. Sembarang penyambung (*attachment*) atau alat mekanis yang mampu mencapai f_y dari batang tulangan ulir diperbolehkan, asalkan hasil uji yang menunjukkan kecukupan penyambung (*attachment*) atau alat tersebut disetujui oleh instansi tata bangunan. Penyaluran batang tulangan ulir diizinkan untuk mengandung kombinasi pengankuran mekanis ditambah Panjang penanaman tambahan batang tulangan ulir antara penampang kritis dan penyambung atau alat mekanis.

2.3 Pengertian *Headed Bar*

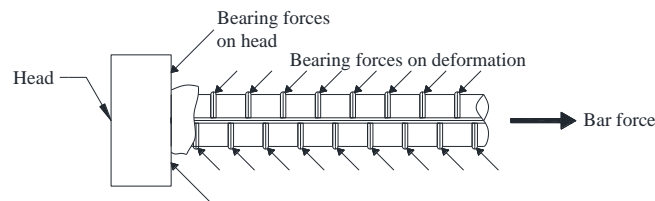
Headed bar adalah batang penguat biasa dengan pelat baja atau mur yang menempel pada satu atau kedua ujungnya. Gambaran skematik dari pengertian tersebut dapat dilihat pada gambar 2.2. Daerah bantalan dari pelat yang bekerja pada beton sekitarnya berkontribusi untuk menahan gaya tarik di tulangan (Francesco Mrachetto 2015).



Gambar 2. 2 *Headed Reinforcement Bar* (Marchetto 2015)

Thompson et al. (2002) mendefinisikan *headed bar* terbuat dari plat atau mur yang dipasang pada satu atau kedua ujung tulangan yang memberikan luasan atau area yang membantu menahan tulangan terhadap gaya tarik.

Headed bar dibuat dengan menempelkan mur plat pada ujung tulangan dengan cara *friction welding*, *threaded connection*, *forging* atau *tradisional weld*. Mur plat ini dapat memberikan area bantalan besar yang dapat membantu menahan gaya tarik pada tulangan. Kombinasi *bearing* pada tulangan dan *headed bar* memberikan ketahanan jangkar terhadap gaya tarik di tulangan (Alrasyid et al. 2017). Konsep penjelasan ini dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Konsep *Headed Reinforcement Bar* (Alrasyid et al. 2017)

2.4 Jenis *Headed Bar*

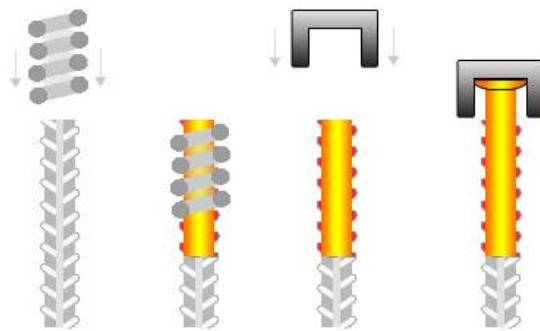
Jenis *headed bar* turut berkembang seiring dengan perkembangan teknologi dan kemajuan di bidang ilmu pengetahuan. Hal ini ditandai dengan metode atau cara

penggunaan *headed bar* yang semakin mudah dibandingkan sebelum-sebelumnya.

Berikut ini adalah jenis *headed bar* :

a. *Friction-welded heads*

Friction-welding technology merupakan metode pertama yang digunakan dalam produksi penguatan pelat berlekuk. Ini adalah kelas pengelasan solid-state, proses pengelasan yang dapat diandalkan dan ekonomis di mana kepala diputar hingga sekitar 1500 rpm dan sebuah bar ditekan terhadapnya. Panas yang dihasilkan dari gesekan melas bagian-bagiannya (Francesco Mrachetto 2015). Prosesnya dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Proses *Friction-welding technology* (Francesco Mrachetto 2015)

b. *Threaded heads*

Persatuan antara batang dan pelat dilakukan melalui benang silindris atau kerucut, meskipun utas kerucut memungkinkan transmisi kekuatan yang lebih efisien. Ini adalah sistem yang sama diadopsi untuk skrup mekanik, ketika batang dengan diameter besar harus digabungkan tetapi transmisi kekuatan dengan penyambungan tidak mungkin (Francesco Mrachetto 2015).

c. *Forged heads*

Ini adalah salah satu proses pengerjaan logam tertua yang diketahui. Ini merupakan proses manufaktur yang melibatkan pembentukan logam menggunakan kekuatan tekan local (Francesco Mrachetto 2015).

d. *Traditional weld*

Sementara las-an tradisional adalah teknologi potensial untuk memproduksi tulangan mekanis yang mana tidak cocok untuk produksi massal dan untuk alasan

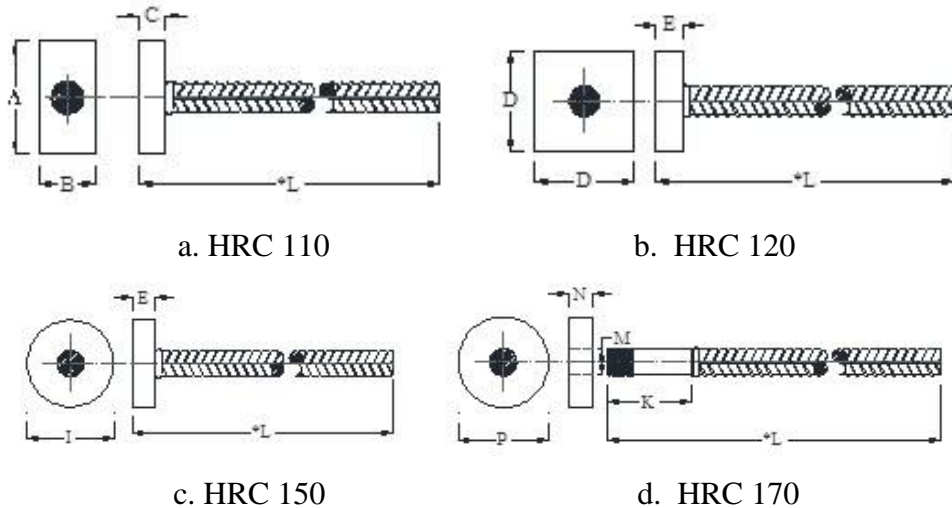
ini tidak ada referensi lebih lanjut untuk teknologi ini dibuat dalam pekerjaan ini (Francesco Mrachetto 2015).

e. *Manufacturers*

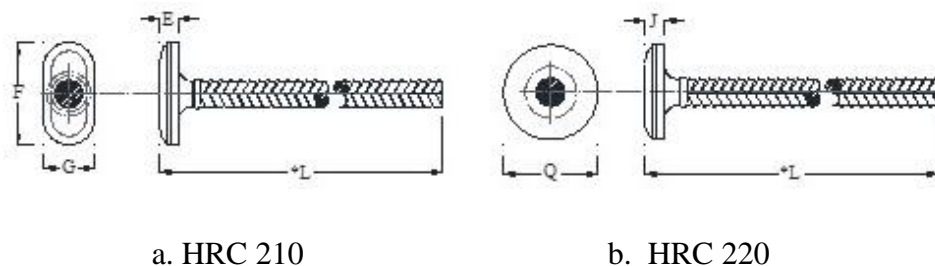
HRC dan ERICO merupakan pabrik pertama yang memproduksi *headed bar*. Berikut ini adalah daftar jenis *headed bar* yang tersedia di pasaran:

❖ HRC

HRC adalah distributor utama jangkar mekanik, yang disebut *T-Headed bar* atau *T-Heads*. HRC terutama menggunakan pengelasan-friksi yang dipatenkan dan menyediakan empat tipologi lempeng: persegi, persegi panjang, lingkaran, oval seperti gambar 2.5 dan 2.6.



Gambar 2. 5 *T-headed Bars HRC 100 series – performance* (HRC High Standard & High Performance T-Headed Bar 2009)



Gambar 2. 6 *HRC 200 series – T-headed Bars for Fatigue Load* (HRC High Standard & High Performance T-Headed Bar 2009)

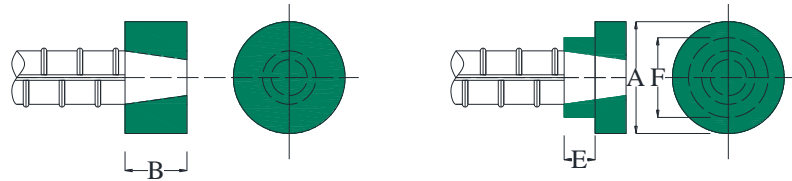
Ukuran *T-headed bar* bervariasi sesuai dengan tipe dan ukuran tulangan longitudinal yang digunakan. Bentuk penampang *T-headed bar* pun berbeda-beda. Ada yang berbentuk segi empat, persegi panjang, lingkaran dan oval. Ukuran *T-headed bar* dapat dilihat pada tabel 2.2. Tabel 2.1 ini memaparkan mutu dan ukuran *T-headed bar* sesuai dengan ukuran tulangan longitudinal. Ukuran dan mutu *T-headed bar* yang tertera dalam tabel 2.2 sesuai dengan standar ASTM 706 (HRC Hight Standard & Hight Performance T-Headed Bar 2009).

Tabel 2. 2 T-headed Bars HRC 100 dan HRC 200 (HRC Hight Standard & Hight Performance T-Headed Bar 2009)

Properties					Head / Thread Dimensions														
ASTM 706 Standard																			
Bar	Dia.	A	Strength (lbs)		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	M	N	P	Q
Size	in	in ²	Yield	Tensile	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch	(mm)	Inch	Inch	Inch
#4	0.500	0.200	-	-	2.000	1.000	0.500	-	-	-	-	-	-	0.410	-	-	-	-	1.750
#5	0.625	0.310	18600	24800	2.500	1.250	0.500	2.000	0.500	-	-	-	1.980	0.500	3.750	M18	0.750	2.000	2.000
#6	0.750	0.440	26400	35200	3.000	1.500	0.750	2.250	0.625	3.000	1.520	0.612	2.370	0.560	3.750	M24	1.000	2.375	2.375
#7	0.875	0.600	36000	48000	4.000	1.500	0.750	2.500	0.625	3.500	1.730	0.625	2.770	0.630	3.750	M24	1.000	2.750	2.750
#8	1.000	0.790	47400	63200	4.000	2.000	0.875	3.000	0.750	4.000	1.970	0.687	3.200	0.630	3.000	M27	1.125	3.250	3.250
#9	1.128	1.000	60000	80000	5.000	2.000	0.875	3.250	0.750	4.500	2.210	0.750	3.650	0.710	4.000	M31	1.250	3.625	3.625
#10	1.270	1.270	76200	101600	5.000	2.500	1.000	3.500	1.000	5.000	2.520	0.812	4.000	0.890	4.000	M38	1.500	4.000	4.000
#11	1.410	1.560	93600	124800	6.000	2.500	1.250	4.000	1.000	5.500	2.760	1.000	4.460	0.910	5.120	M45	1.875	4.500	4.500
#14	1.693	2.250	135000	180000	7.500	3.000	1.250	5.000	1.250	6.250	3.600	1.250	5.350	1.280	6.250	M52	2.125	5.375	5.375
#18	2.257	4.000	240000	320000	-	-	-	-	-	8.250	4.410	1.500	7.140	1.650	6.750	M68	2.750	7.000	6.500

❖ ERICO

ERICO memiliki tipologi angkur mekanik unik yang disebut *Lenton Terminator*, dimana terdiri dari *rebar* dengan terminasi benang meruncing yang disekrup ke bagian atas yang membesar melingkar (Francesco Mrachetto 2015), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 ERICO Lenton Terminator: versi standar dan yang dilengkapi dengan ring perantara, untuk batang besar (Francesco Mrachetto 2015)

Ukuran *headed bar* bervariasi tergantung ukuran diameter tulangan longitudinal yang direncanakan. Tipe *headed bar* yang diproduksi ERICO yang dikenal dengan nama terminator terdapat 2 tipe yaitu tipe terminator D6 dan terminator D16. Adapun ukurannya yang ditampilkan dalam bentuk tabel 2.3 dan 2.4. *Strength yield* untuk *headed bar* terminator D6 maupun D16 minimum 240 Mpa (Erico n.d.).

Tabel 2. 3 Ukuran Headed Bar Terminator D6 (Erico n.d.)

Rebar Size Designation (mm)	"A" (mm)	"B" (mm)	"E" (mm)	"F" (mm)	Weight (kg)
12	35	14	-	-	0,09
16	38	22	-	-	0,18
20	48	29	-	-	0,36
22	51	32	-	-	0,45
25	57	35	-	-	0,59
28	70	38	-	-	1,00
32	76	40	-	-	1,22
36	83	43	-	-	1,54
40	95	64	25	76	2,49
43	102	54	25	76	2,22
50	114	65	25	76	3,22
57	130	70	25	76	4,45

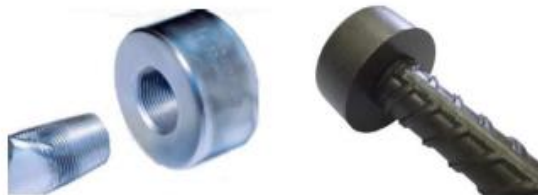
Tabel 2. 4 Ukuran Headed Bar Terminator D16 (Erico n.d.)

Rebar Size Designation (mm)	"A" (mm)	"B" (mm)	"E" (mm)	"F" (mm)	Weight (kg)
12	28	19	-	-	0,13
16	36	24	-	-	0,16
20	45	35	-	-	0,41
22	50	38	-	-	0,50
25	60	40	-	-	0,68
28	65	42	-	-	1,10
32	75	46	-	-	1,39
36	85	52	-	-	1,84
40	90	58	25	76	2,22
43	100	67	25	76	2,90
50	115	71	25	76	3,66
57	130	84	25	76	5,65

❖ *Dextra Group*

Dextra Group menghasilkan sistem penahan mekanis mirip dengan ERICO, yang terdiri dari pelat bundar yang disekrup pada ujung tulangan, walaupun demikian bentuk dan spesifikasinya berbeda. Bentuknya dapat dilihat pada gambar 2.8b dengan sebutan *Bartec End Anchor* dan diadaptasi dari sistem penggandengan yang sama digunakan dalam *splicing* standar.

Adapun spesifikasinya yaitu luasan pelat adalah antara 5 dan 10 kali luas tulangan; kepala yang lebih kecil dapat beroperasi dengan menggabungkan kekuatan bantalan pelat dengan ikatan di sepanjang tulangan; kepala besar mencapai hasil tanpa melebihi kapasitas beton asalkan kekuatan tekan setidaknya 40 MPa. Ketebalan pelat mirip dengan HRC (Francesco Mrachetto 2015). Tipe produk Dextra Group dapat dilihat pada gambar 2.8.



(a) *Lenton Terminator*

(b) *Bartec End Anchor*



(c) *Bar-US Anchor Nut*



(d) Dayton D158B

(e) BPI-Grip

Gambar 2. 8 Headed Bar produksi Dextra Group (Francesco Mrachetto 2015)

❖ *Barsplice*

Barsplice menyediakan produk yang disebut *BPI-Grip Buttonhead* dengan pelat segidelapan (Gambar 2.9). Ketebalan pelat lebih besar dari diameter batang. Tulangan tidak di-*thread* dan koneksi dibuat melalui proses *cold swaging*. Peralatan yang diperlukan bisa disewa atau dibeli. Luas *Headed Bar* adalah 5 kali luas *bar* (seri BNH) atau 10 kali luas *bar* (seri BNX). Perusahaan memproduksi produk lain yang disebut *BPI Doughnut*, dengan koneksi berulir, kepala yang berkurang atau ukuran penuh dan ketebalan yang serupa dengan pelat okogonal (Francesco Mrachetto 2015).



Gambar 2. 9 BPI-Grip Buttonhead (Francesco Mrachetto 2015)

❖ *Other Manufacturers*

Dayton Superior menyediakan seri kepala ukuran penuh yang disebut D-158-B. Tipe headed bar ini diproduksi oleh perusahaan BAR-US dan perusahaan High Frequency Dai-Ichi. Perusahaan BAR-US adalah perusahaan Turki yang memproduksi batang silindris yang dijual dengan nama dagang Anchor-Nut. Perusahaan High Frequency Dai-Ichi merupakan sebuah perusahaan Jepang yang bidang pekerjaan utamanya adalah teknologi induksi frekuensi tinggi, menghasilkan jangkar mekanik menggunakan prosedur ini (Francesco Mrachetto 2015).

2.5 Sejarah Penggunaan *Headed Bar*

Headed bar mulai dikenal di dalam dunia struktur beton bertulang sekitar tahun 1960-an ketika penelitian ekstensif pada *headed bar* yang dilakukan di bidang konstruksi beton komposit balok baja dan plat lantai beton bertulang. Penelitian ekstensif itu diantaranya dilakukan oleh J. Chinn (1961), Driscoll G. C. Jr dan R. G. Slutter (1961), R. G. Slutter (1963) dan R. G. Slutter (1966) (Francesco Mrachetto 2015).

McMackin et al (1973) dari *Lehigh University* memperkenalkan *pullout cone design method* untuk jangkar yang dikombinasikan dengan gaya geser dan gaya tarik. Panjang kedalaman adalah salah satu faktor yang mempengaruhi kekuatan maksimum dari *stud anchor* baja berkepala/*headed bar*. Stoker et al (1974) juga melakukan sebuah studi untuk Caltrans yang bertujuan untuk menentukan metode pengankuran tulangan berdiameter besar dengan mengurangi panjang kedalaman pengankuran (Francesco Mrachetto 2015).

Dilger and Ghali (1981) mengusulkan penggunaan ikatan berkepala ganda sebagai penguat tulangan geser. Solusinya terbukti lebih baik daripada mengelas tulangan geser yang ada ke plat-plat datar yang menciptakan *studrails*. Mereka juga merekomendasikan ukuran *headed* 10 kali luas tulangan, yang menurut mereka diperlukan untuk pengankuran yang layak. Penelitian ini menjadi salah satu studi

pertama mengenai penggunaan pelat las untuk tulangan penguat dan sering dianggap sebagai referensi oleh banyak peneliti. Sebagai konsekuensi dari penelitian ini, sebuah produk yang mirip dengan *studrail*, dengan rasio perbandingan luasan penampang kepala dengan luas penampang batang 10: 1 dipatenkan dan masih dijual oleh Decon. Produk ini menjadi produk utama yang dikomersialkan oleh keduanya. Setelah pekerjaan ini, bertahun-tahun kemudian mereka menyelidiki penggunaan pengunci berkepala dua untuk menggantikan pengikat atau sengkang yang penempatannya sulit sebagai ikatan untuk elemen dinding atau lempengan (Francesco Mrachetto 2015).

AOGA mulai tertarik mempelajari teknologi pada potensi penggunaan tulangan berkepala sebagai tulangan geser pada platform beton bertulang lepas pantai. AOGA juga mempertimbangkan kemungkinan untuk penuangan yang sangat padat dan merekomendasikan penggunaan *headed bar* kepada kontraktor Norwegia, yang tertarik dengan produksi massal untuk diterapkan pada bidang pekerjaan mereka, desain dan konstruksi platform minyak lepas pantai (Francesco Mrachetto 2015).

Kontraktor Norwegia bermitra dengan perusahaan rekayasa spesialis melayani sektor kelautan dan industri, metalock, dan SINTEF Group. SINTEF Group merupakan organisasi penelitian independen di Skandinavia. Hasil dari kerja sama ini yaitu teknologi pengelasan gesekan dipatenkan, dan HRC yang merupakan anak perusahaan Amerika Serikat dari Metalock didirikan. HRC menjadi perusahaan pertama yang memproduksi *headed bar*. Banyak penelitian dilakukan oleh HRC di Norwegia. Penelitian tersebut diantaranya studi yang diterbitkan oleh Fynboe dan Thorenfeldt yang menganalisis perilaku uji penarikan statis yang bertujuan untuk "memberikan dasar penggunaan *T-headed bar* dalam struktur beton kedepannya". Namun, sebagian besar penelitian tentang topik ini adalah hak milik dan belum dipublikasikan (Francesco Mrachetto 2015).

Bener et al mempresentasikan beberapa hasil penyelidikan sebelumnya dan beberapa wawasan tentang uji yang dimiliki AOGA dan SINTEF, yang mana menjadi yang pertama menggambarkan kemungkinan mengaplikasikan tipologi bar penguatan yang inovatif ini (Francesco Mrachetto 2015).

Fib Bulletin (2009) melaporkan bahwa "*T-headed bars* telah digunakan sebagai pengganti tulangan geser konvensional pada beberapa proyek lepas pantai untuk mengurangi kemacetan akibat sengkang berdiameter kecil dan memfasilitasi penempatan beton. *T-heads* juga dapat digunakan untuk menjangkar tulangan yang lebih besar" (Francesco Mrachetto 2015).

Sementara itu, ERICO telah mengembangkan teknologi tulangan kepala sendiri. ERICO mulai dipasarkan di Eropa pada tahun 1980-an. ERICO dan HRC sudah lama menjadi satu-satunya produsen dari jenis produk ini yang mana hari ini sudah disediakan oleh serangkaian perusahaan lain (Francesco Mrachetto 2015).

2.6 Penggunaan *Headed Bar* pada Hubungan Balok-Kolom

Wallace et al (1998) menyatakan bahwa peraturan ACI 352-91 yang dipublikasikan ACI-ASCE *Committee* memuat tentang pedoman desain pengankuran hubungan balok-kolom eksterior. Untuk zona gempa yang tinggi, gaya gempa yang diterima joint dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan sehingga dikeluarkan pedoman pengankuran oleh ACI. Penggunaan kait standar menimbulkan permasalahan dalam fabrikasi dan konstruksi menjadi sulit. Selain itu, keterbatasan geometrik sering mencegah penggunaan batang berdiameter berdiameter lebih besar karena keterbatasan konstruksi yang timbul dari kait yang panjang dan diameter bengkokan yang besar. Berkaitan dengan kasus ini, penggunaan *headed bar* memiliki keuntungan yang jelas. Manfaat terbesar dari penggunaan tulangan berkepala mungkin tidak dalam meningkatkan kinerja hubungan balok-kolom, tetapi dalam kemudahan fabrikasi, konstruksi, dan penempatan beton.

Tujuan Wallace et al (1998) adalah untuk melakukan tes pada hubungan balok-kolom skala besar untuk menunjukkan bahwa pengankuran *headed bar* merupakan pilihan yang layak untuk menggantikan kait standar 90 derajat pada hubungan balok-kolom eksterior. Program penelitian secara keseluruhan terdiri dari pengujian hubungan balok-kolom tepi maupun hubungan balok-kolom bagian atap/pojok.

Program penelitian Wallace et al (1998) melibatkan 7 spesimen yang mana pengujian dua spesimen eksterior dan tiga spesimen bagian atap/pojok dengan menggunakan *headed bar*. Dua spesimen lainnya yaitu hubungan balok-kolom bagian atap/pojok yang menggunakan kait standar 90 derajat.

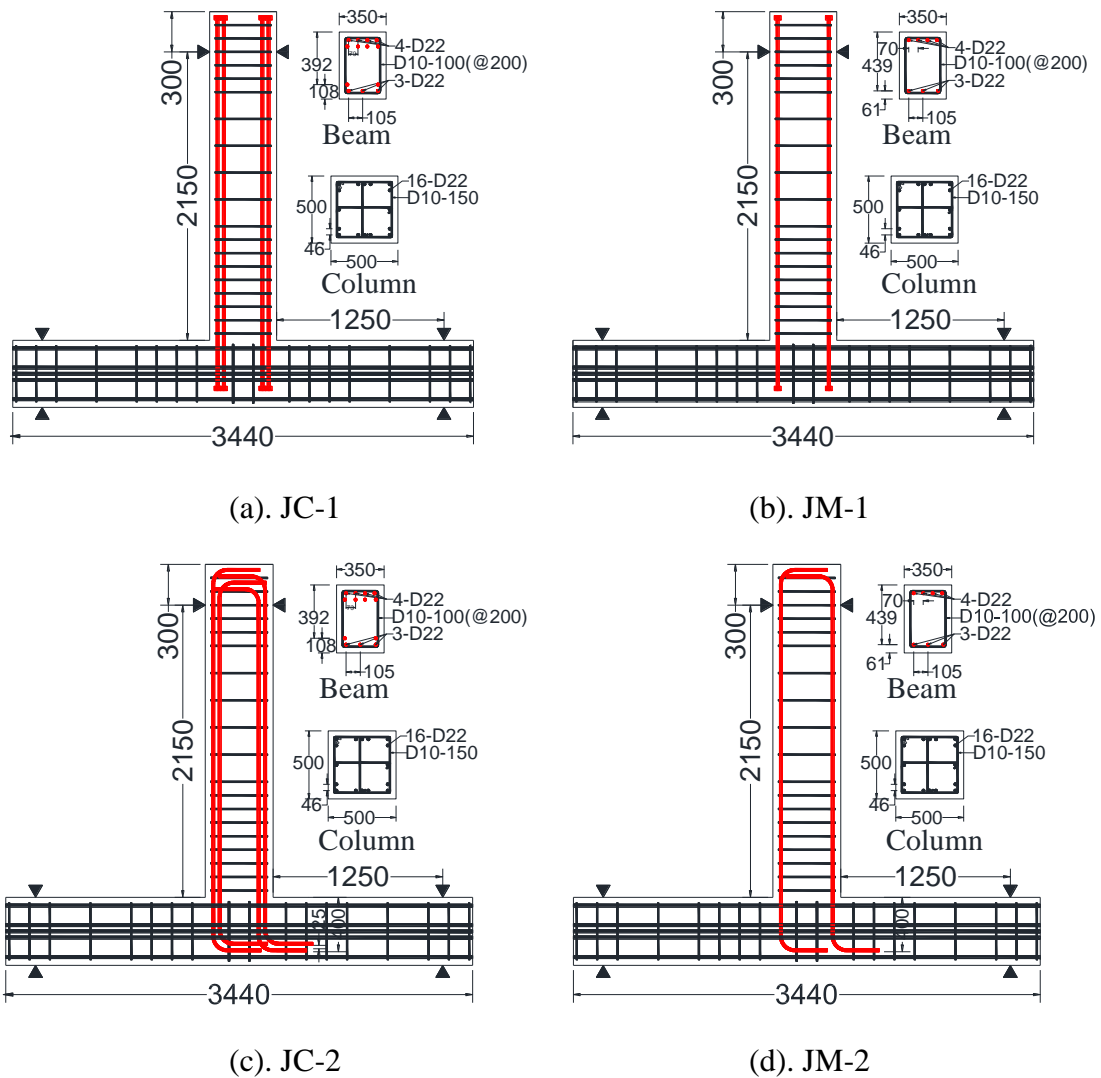
Hasil penelitian Wallace et al (1998) menunjukkan bahwa hubungan balok-kolom eksterior tepi dan pojok/sudut yang menggunakan *headed bar* menjadi opsi yang layak sebagai pengganti hubungan balok-kolom yang menggunakan kait standar. Hubungan balok-kolom yang menggunakan *headed bar* mempermudah proses pabrikasi. Hubungan balok-kolom yang menggunakan *headed bar* bisa dipabrikasi secara terpisah kemudian diangkat dan diderek ke dalam bekisting. Selain itu, hubungan balok-kolom yang menggunakan *headed bar* membantu mengurangi segregasi pada saat proses pengecoran.

S. Chun and Kim (2004) telah membahas tentang hasil penelitian hubungan balok-kolom eksterior menggunakan kait standar 90 derajat dan *headed bar*. Spesimen yang digunakan adalah hubungan balok-kolom eksterior dari gedung beton bertulang tingkat tinggi. Spesimen tersebut mewakili bagian bangunan yang mengalami beban lateral. Dua spesimen hubungan balok-kolom eksterior diuji. Satu set spesimen (JC-1, JM-1) dirancang sehingga kegagalan lentur balok akan terjadi, dan satu set spesimen lainnya (JC-2, JM-2) dirancang sehingga kegagalan geser sendi akan terjadi, di mana huruf C menunjukkan kait standar 90 derajat dan huruf M menunjukkan jangkar mekanis/*headed bar*. Detail gambar dapat dilihat pada gambar 2.8. Selain itu tabel 2.4 pun menyajikan data-data berkaitan dengan spesimen.

Spesimen dari masing-masing bagian memiliki geometri yang sama dan sifat material yang sama. Beban lateral siklik diaplikasikan pada balok. Kinerja struktural, seperti kekuatan, kekakuan, keuletan, *slip-ulang bar*, tingkat kerusakan sendi dan disipasi energi dinilai.

S. Chun and Kim (2004) merencanakan mutu beton (f_c') 40,8 Mpa dan mutu baja tulangan (f_y) 392 Mpa untuk tulangan diameter 22 mm dan 10 mm. Spesimen JC-1, JC-2, JM-1 dan JM-2 didesain dengan dimensi kolom 500 x 500 mm dan dimensi

balok 350 x 500 mm. Spesimen JC-1 dan JC-2 menggunakan kait 90 derajat pada ujung tulangan longitudinal sedangkan JM-1 dan JM-2 menggunakan *headed bar* pada ujung tulangan longitudinal. Jarak sengkang balok pada area tumpuan 100 mm dan pada bagian lapangan 200 mm. Jarak sengkang kolom pada area tumpuan 150 mm dan pada bagian lapangan 300 mm. Spesimen JC-1 dan JM-1 didesain gagal pada balok sedangkan JC-2 dan JM-2 didesain gagal pada join. Detail penulangan dapat dilihat pada gambar 2.10 dan detail lainnya dapat dilihat pada tabel 2.5.

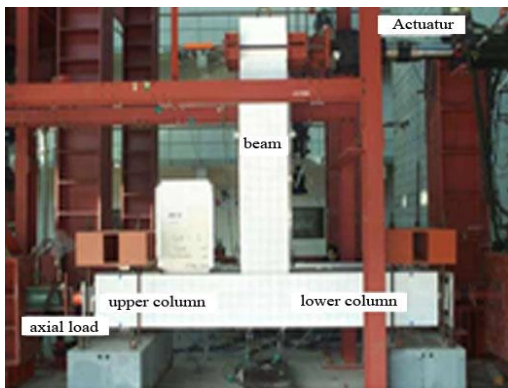


Gambar 2. 10 Detail Spesimen Eksperimental S. Chun and Kim (2004)

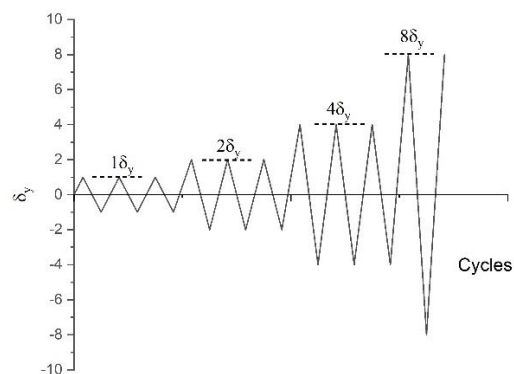
Tabel 2. 5 Data Acuan Eksperimental S. Chun and Kim (2004)

Specimen	Expected Failure Mode	Anchorage	Beam			Column				
			B x H (mm)	Re-Bars (upper/lower)	Stirrup	B x D (mm)	Re-bar	Hoop		
JC-1	Beam Flexure Failure	90 degree hook	350 x 500	4-D22	D10@200	500 x 500	16-D22	D10@300-3 leg		
JM-1	Mechanical anchor	Mechanical anchor		3-D22	(D10@100 in the vicinities of loading point and joint)			500 x 500	16-D22	(D10@150 in the vicinities of reaction point and joint)
JC2	Joint Shear Failure	90 degree hook		8-D22						
JM-2	Mechanical anchor	Mechanical anchor		6-D22						

Kait standar 90 derajat dirancang sesuai dengan ACI, dan panjang penempatan jangkar mekanik adalah tiga perempat dari kedalaman kolom sesuai Flat Nut (TOKYOTEKKO). Untuk mencegah kegagalan prematur *push-out*, tegangan angkur juga diperiksa sesuai dengan KCI-99. Untuk memastikan balok akan diberikan regangan inelastis, rasio kekuatan lentur balok terhadap kekuatan lentur kolom adalah lebih dari 1,4 seperti yang disyaratkan ACI-ASCE 352. Kekuatan geser gabungan (Q_{ju}) JC-1 dan JC-2 dihitung menggunakan ACI-ASCE 352.



(a). Test Setup



(b) Loading Schedule

Gambar 2. 11 Test Setup and Loading Schedule Eksperimental S. Chun and Kim (2004)

Untuk persiapan pengujian sederhana, beban lateral siklik disimulasikan dengan cara menerapkan beban ke balok bukan kolom seperti yang ditunjukkan gambar

2.11(a). Beban diterapkan di bawah kontrol perpindahan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11(b). Untuk mengevaluasi ketahanan terhadap beban siklik dan daktilitas, 3 siklus lengkap dilakukan pada setiap level drift. Ketika kegagalan yang jelas terjadi, seperti pecah dan tekuk pada batang, atau ketika beban dikurangi hingga 85% dari beban puncak, tes dihentikan. A 490kN ($= 0,05A_g f_c'$) dari beban aksial dikenakan sebelum menerapkan beban siklik. Perangkat khusus dipasang untuk menjaga beban aksial konstan selama pengujian. Instrumentasi digunakan untuk mengukur beban balok, beban kolom aksial dan perpindahan balok. Untuk mengukur perpindahan dan deformasi sambungan tanpa slip pada titik reaksi, rangka acuan pengunci dipasang. Selain itu, diukur jarak dari dari ujung angkur.

S. Chun and Kim (2004) memaparkan hasil uji kuat tekan dan tarik dari sampel beton dan baja tulangan. Adapun rata-rata uji kuat tekan beton yang diperoleh yaitu 61,7 Mpa untuk benda uji JC-1 dan JM-1 dan 60,1 Mpa untuk benda uji JC-2 dan JM-2. Rata-rata uji kuat tarik baja tulangan 383,9 Mpa untuk diameter tulangan 10 mm dan 402,9 Mpa untuk tulangan diameter 22 mm. Berdasarkan data pengujian ini maka mutu beton hasil uji melebihi mutu beton rencana dan kuat tarik tarik baja tulangan diameter 22 mm melebihi mutu rencana sedangkan kuat tarik baja tulangan 10 mm lebih rendah dari kuat tarik rencana.

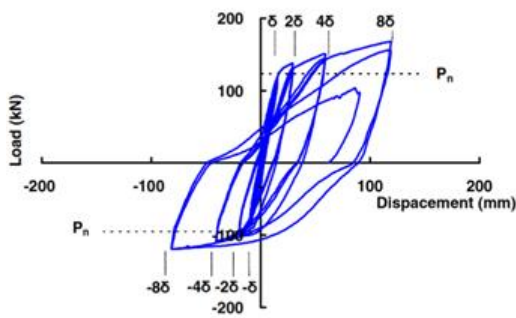
Hasil pengujian hubungan balok-kolom ditampilkan dalam bentuk tabel yang dapat dilihat pada tabel 2.6, grafik *load vs displacement* seperti gambar 2.12, grafik komulatif gaya luar yang bekerja dan foto spesimen setelah pengetesan seperti gambar 2.13.

Berdasarkan tabel 2.6 S. Chun and Kim (2004) menyampaikan bahwa *yield strenght* dan *flexural strenght* untuk arah positif JC-1 memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada JM-1, sedangkan arah negatif JM-1 memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada JC-1. Nilai rasio daktilitas dan energi disipasi JM-1 lebih besar dari JC-1 yang mana menunjukkan bahwa JM-1 lebih daktail dibandingkan JC-1. *Yield strenght* dan *flexural strenght* untuk arah positif JC-2 memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada JM-2, sedangkan arah negatif JM-2 memiliki kekuatan yang lebih

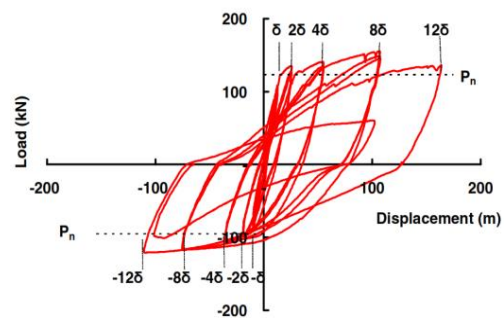
tinggi daripada JC-2. Nilai rasio daktilitas dan energi disipasi JM-2 lebih besar dari JC-2 yang mana menunjukkan bahwa JC-2 lebih daktil dibandingkan JC-1 walaupun sangat tipis selisihnya.

Tabel 2. 6 Hasil Pengujian Eksperimental S. Chun and Kim (2004)

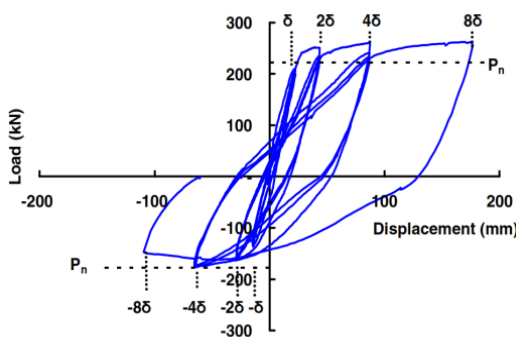
Expected Failure Mode	Specimen	Design Strength				Measured Strength		Ductility Ratio	Energi Dissipation
		Beam		Joint		M_y	M_n		
		M_y	M_n	$\phi_j V_{jn}$	V_{ju}				
Beam Flexure Failure	JC-1(+)	248	265	1413	659	254	361	8	92
	JC-1(-)	188	204		492	187	257		
	JM-1(+)	248	265	1359	659	233	335	12	137
	JM-1(-)	188	204		492	193	260		
Joint Shear Failure	JC-2(+)	419	478	1394	1341	450	563	8	126
	JC-2(-)	334	383		951	294	379		
	JM-2(+)	419	478	1334	1341	428	568	7	122
	JM-2(-)	334	383		951	355	407		



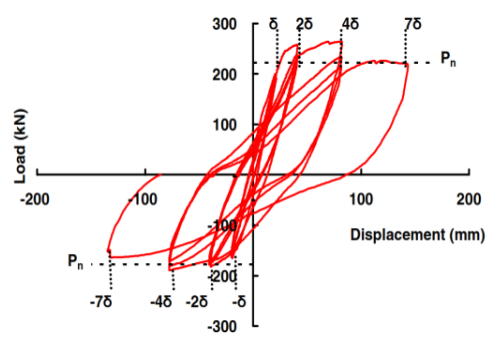
(a) JC-1



(b) JM-1



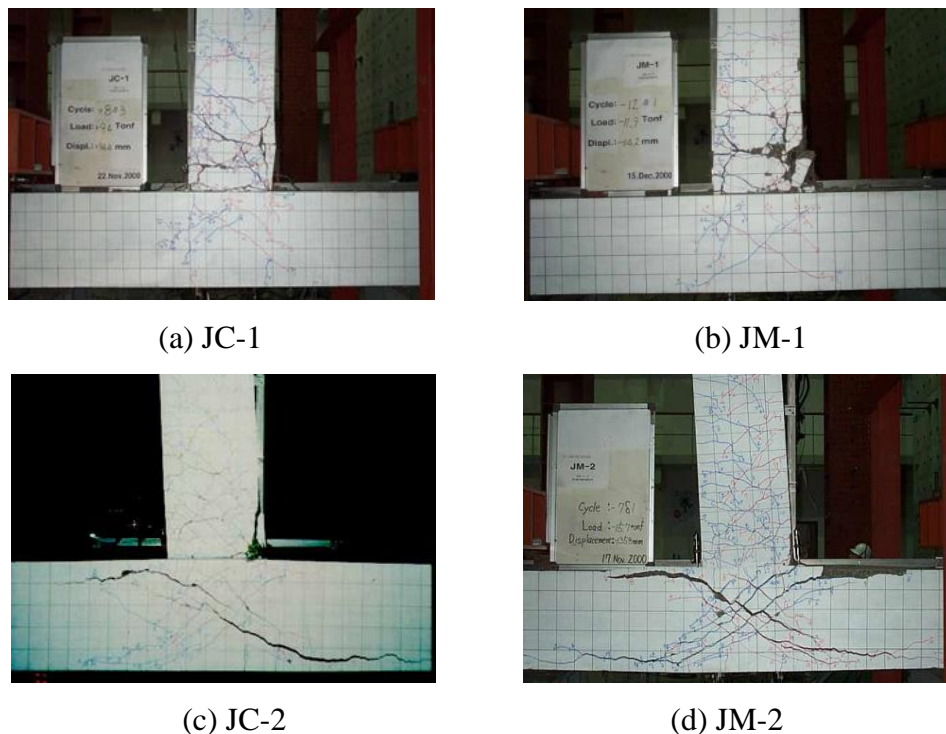
(c) JC-2



(d) JM-2

Gambar 2. 12 Load versus Displacement Eksperimental S. Chun and Kim (2004)

Gambar 2.12 ini merupakan grafik hubungan antara beban dalam satuan kN dan perpindahan/displacement dalam satuan mm. Gambar tersebut menunjukkan bahwa daktilitas dan disipasi energi dari keempat spesimen tersebut. Spesimen JM-1 lebih daktilitas dibandingkan dengan spesimen JC-1. Spesimen JC2 lebih daktilitas dibandingkan spesimen JM-2. Spesimen JM-1 memiliki disipasi energi lebih besar dibandingkan dengan spesimen JC-1. Spesimen JC2 memiliki disipasi energi lebih besar dibandingkan spesimen JM-2.



Gambar 2. 13 Kondisi Akhir Pengujian Spesimen Eksperimental S. Chun and Kim (2004)

Gambar 2.13 ini menunjukkan kondisi spesimen setelah dilakukan pengujian. Spesimen JC-1 dan JM-2 mengalami kerusakan pada bagian balok sedangkan bagian joint dan kolomnya kokoh. Spesimen JC-2 dan JM-2 mengalami kerusakan pada joint sedangkan baloknya utuh.

S. Chun and Kim (2004) menyimpulkan bahwa tegangan leleh, displacement dan kekuatan batang/penampang dari spesimen hubungan balok-kolom yang menggunakan kait standar 90 derajat dan headed bar serupa. Rasio daktilitas dan energi

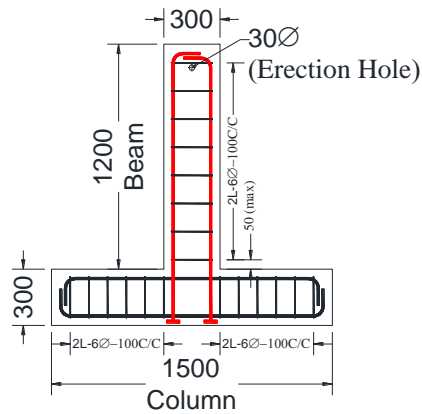
disipasi hubungan balok-kolom bagian luar dengan *headed bar* lebih baik daripada menggunakan kait standar 90 derajat sedangkan sebaliknya untuk perilaku arah negatif dimana spesimen yang menggunakan kait standar 90 lebih baik daripada *headed bar*.

Keefektifan dari *headed bar* pada hubungan balok-kolom bagian luar sudah diuji. Sembilan spesimen hubungan balok-kolom ekterior diuji dengan beban siklik dimana yang menjadi parameter pertama adalah tipe angkur, ukuran dan susunan tulangan dan *headed bar* dan detail dari hubungan balok-kolom bagian atap. Hasil dari pengujian mengindikasikan bahwa perilaku dari hubungan balok-kolom dengan menggunakan *headed bar* hampir sama atau bahkan lebih dari hubungan balok-kolom menggunakan kait standar yang dipakai di Korea (S. C. Chun et al. 2007).

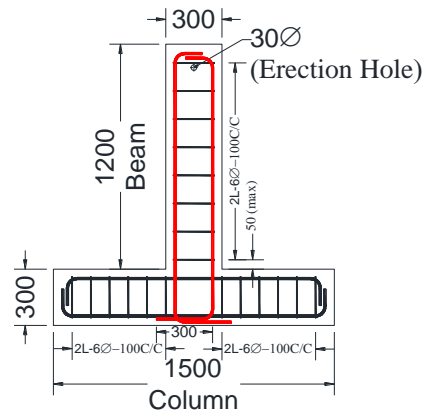
Kang, Shin, and Mitra (2009) menjelaskan bahwa bagian 12.6 ketentuan ACI 318-08 rincian pengembangan *headed* dan kait mekanis dimasukkan untuk pertama kalinya dalam seri kode. Sebelumnya, gabungan ACI-ASCE Committee-352 mempublikasikan rekomendasi desain untuk *headed reinforcement* pada hubungan balok-kolom beton bertulang (ACI 352R-02). Namun, keduanya ACI 318-08 dan 352R-02 memiliki keterbatasan penelitian eksperimental. Mengingat kekhawatiran ini, standar ACI ini dan rekomendasi yang sudah dievaluasi menggunakan basis data yang luas meliputi data uji utama untuk hubungan balok-kolom beton bertulang menggunakan *headed bar* yang mengalami pembebanan siklik.

Tujuan utama Kang, Shin, and Mitra (2009) adalah untuk mendokumentasikan investigasi eksperimental dalam format seragam; memberikan detail tinjauan untuk data uji; dan akhirnya, mengusulkan panduan desain untuk mendukung ACI 352R-02 dan 318-08 diterapkannya *headed bar* pada hubungan balok-kolom.

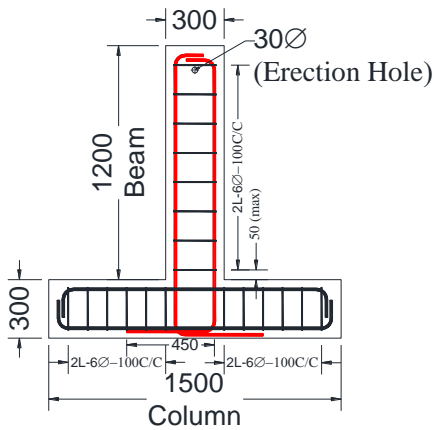
Hubungan balok-kolom merupakan bagian yang penting dalam struktur rangka beton bertulang di daerah rawan gempa. Inovasi pengankuran yang tepat pada hubungan balok-kolom dapat mengurangi segregasi beton pada hubungan balok-kolom tanpa mengurangi kekuatan, kekakuan dan stabilitas (Rajagopal dan Prabavathy, 2013).



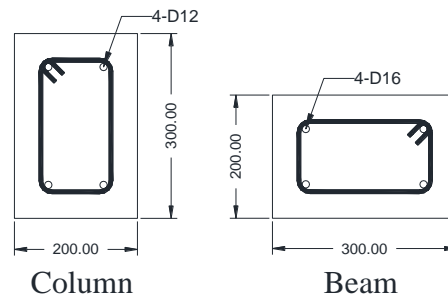
(a). Specimen Type A



(b). Specimen Type B

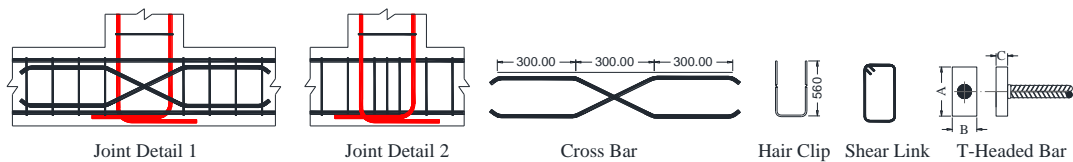


(c). Specimen Type C



(d). Beam and Column Size

Gambar 2. 14 Detail Dimensi dan Pengangkuran Spesimen Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)



Gambar 2. 15 Detail Kombinasi Hubungan Balok-Kolom Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)

Rajagopal and Prabavathy (2014) telah melakukan penelitian dengan melibatkan 6 buah spesimen hubungan balok-kolom exterior. Ukuran kolom spesimen 300 x 200 mm dan balok 200 x 300 mm. Spesimen ini dibagi dalam 2 grup yaitu terdiri

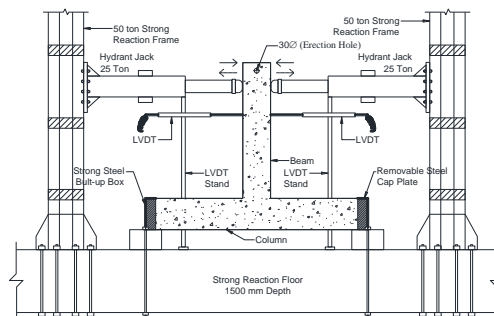
dari 3 spesimen dengan pengankuran yang berbeda. Detail tiga tipe spesimen dapat dilihat pada gambar 2.14. Detail pengankuran tipe A yaitu menggunakan *headed bar* sesuai ACI-352. Detail pengankuran tipe B yaitu kait standar 90 derajat sesuai ACI-318. Detail pengankuran tipe C yaitu pengankuran kait standar 90 derajat sesuai IS-456. Dua grup tersebut terdiri atas 3 spesimen dengan tipe pengankuran yang dikombinasikan dengan *x-type cross bar* dan 3 spesimen lainnya mengkombinasikan 3 tipe pengankuran dengan *U-type bar*. Detail kombinasi 6 buah spesimen tersebut dapat dilihat pada gambar 2.15.

Material yang digunakan untuk spesimen yaitu semen (43 N/mm^2), pasir sungai dan agregat kasar ukuran 20 mm. Komposisi beton per meter kubik yaitu terdiri dari, semen $435,45 \text{ kg/m}^3$, agregat halus $626,673 \text{ kg/m}^3$, agregat kasar $1188,22 \text{ kg/m}^3$, air $191,6 \text{ kg/m}^3$, rasio air semen 0,45 dan rata-rata mutu beton 28,30 MPa ketika mencapai usia 28 hari. Ukuran diameter tulangan yang digunakan yaitu 6, 8, 12 dan 16 mm dengan mutu Fe-415. Tipe *headed bar* yang digunakan yaitu tipe T yang disambungkan dengan menggunakan las E410 seperti pada gambar 2.15.

Pengujian benda uji tersebut dilakukan di MEPCO Engineering College, Sivacasi, India. Pengujian spesimen dilakukan menggunakan *hydraulic jack* dengan beban reversal dengan kapasitas 25 ton. Pengujian dilakukan dengan posisi kolom diletakan secara horizontal dan balok secara vertical seperti pada gambar 2.16.



(a). *Experimental Setup*



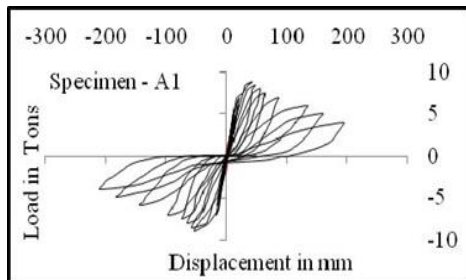
(b). *Schematic Diagram of Test Setup*

Gambar 2. 16 Pengujian Spesimen Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)

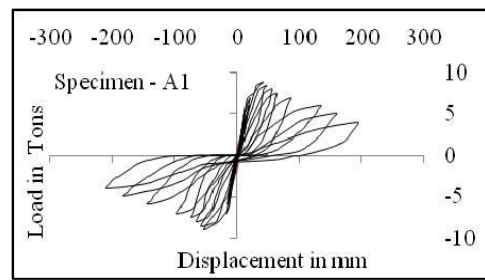
Hasil dan pengamatan Rajagopal dan Prabavathy meliputi lateral load vs lateral displacement, Ductility behavior, stiffness behavior dan cracking study. Hasil dan pengamatan dapat dilihat dalam bentuk tabel dan gambar.

a. Lateral load vs lateral displacement

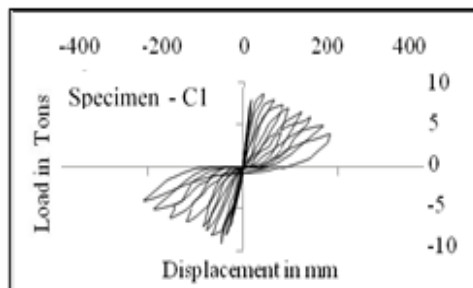
Kurva histeresis merupakan hasil eksperimen berupa hubungan antara beban/load dengan perpindahan/displacement. Kurva histeresis dalam penelitian ini ditampilkan dalam dua grup benda uji dimana kurva histeresis grup I dapat dilihat pada gambar 2.17 dan kurva histeresis grup II dapat dilihat pada gambar 2.18. Nilai *yield displacement*, *ultimate load*, *average ultimate load*, *ultimate displacement* dan *average ultimate displacement* setiap benda uji dapat dilihat pada tabel 2.7.



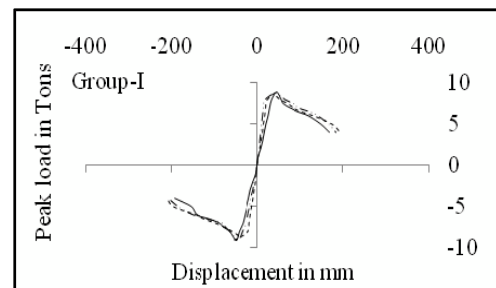
(a). Load vs Displacement Spesimen A1



(b). Load vs Displacement Spesimen B1



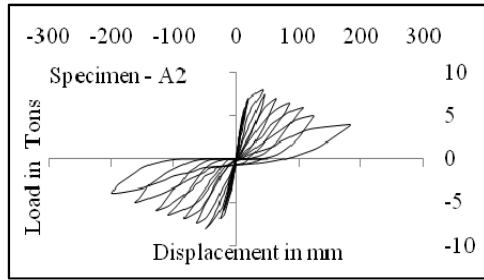
(c). Load vs Displacement Spesimen C1



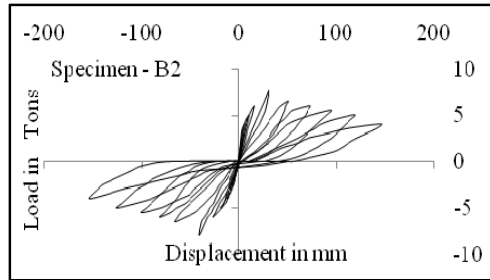
(d). Peak Load vs Displacement Grup-I

Gambar 2. 17 Kurva Histeresis Benda Uji Grup I Eksperimental Eksperimental

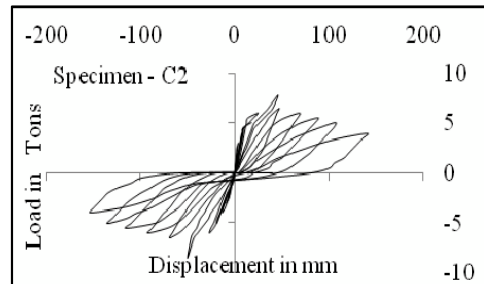
Rajagopal and Prabavathy (2014)



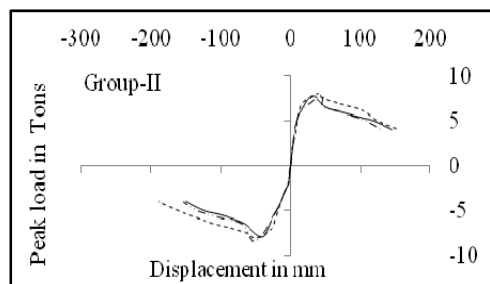
(a). Load vs Displacement Spesimen A2



(b). Load vs Displacement Spesimen B2



(c). Load vs Displacement Spesimen C2



(d). Peak Load vs Displacement Grup-II

Gambar 2. 18 Kurva Histeresis Benda Uji Grup II Eksperimental Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)

Tabel 2. 7 Kekuatan Lateral dan Perpindahan Ultimit Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)

Specimen Name & Group	Yielding Displacement in mm(δ_y)	Ultimate Load in kN (P_u)		Average Ultimate Load in	Ultimate Displacement in mm(δ_u)		Average Displacement for Ultimate Load in mm(δ_u)
		Left Side	Right Side		Left Side	Right Side	
A1-I	2.15	89.00	90.00	89.50	42.00	53.00	47.500
B1-I	2.40	89.00	91.00	90.00	45.00	50.00	47.500
C1-I	2.20	88.00	90.00	89.00	43.50	45.36	44.430
A2-II	2.30	80.00	81.00	80.50	42.15	48.60	45.375
B2-II	2.85	78.00	80.00	79.00	30.85	40.25	35.550
C2-II	3.00	78.50	80.50	79.50	45.63	50.60	48.115

b. Ductility behavior

Ductility behavior sangat penting dalam menyikapi daktilitas sebuah struktur ketika menerima beban lateral tertentu yang membuat struktur tersebut berada pada daerah inelastis. Dalam penelitian ini Rajagopal dan Prabavathy menampilkan faktor daktilitas untuk beban ultimit dan rata-rata faktor daktilitas perpindahan dalam tabel

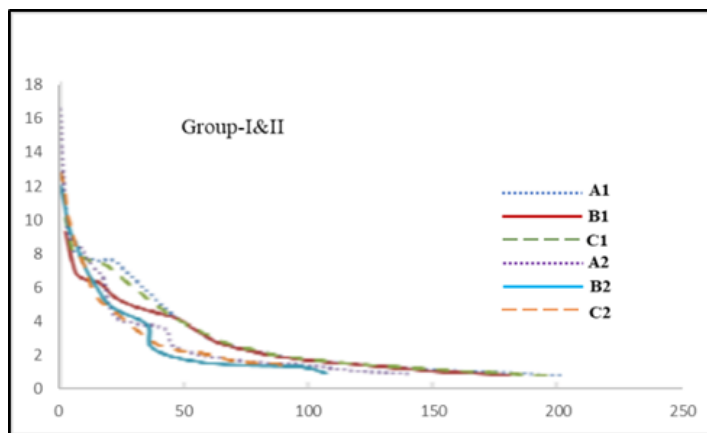
2.8. Tabel 2.8 memperlihatkan bahwa benda uji A1 memiliki performa yang lebih baik dari 5 benda uji lainnya.

Tabel 2. 8 Hasil Pengujian Displacement ductility factor dari Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)

Specimen Name & Group	Yielding Displacement in mm(δ_y)	Ultimate Displacement in mm (δ_u)		Ductility Factor for the Ultimate Load $\mu=(\delta_u/\delta_y)$		Average Displacement Ductility Factor (μ)
		Left Hand Side (δ_u)	Right Hand Side (δ_u)	Left Hand Side (LHS)	Right Hand Side (RHS)	
A1-I	2.15	42.00	53.00	19.535	24.651	22.093
B1-I	2.40	45.00	50.00	18.750	20.833	19.792
C1-I	2.20	43.50	45.36	19.773	20.618	20.195
A2-II	2.30	42.15	48.60	18.326	21.130	19.728
B2-II	2.85	30.85	40.25	10.825	14.123	12.474
C2-II	3.00	45.63	50.60	15.210	16.867	16.038

c. *Ductility behavior*

Rajagopal and Prabavathy (2014) juga mengamati tentang *stiffness behavior* yang yang ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara *stiffness* dengan perpindahan/displacement seperti pada gambar 2.19.



Gambar 2. 19 Grafik Stiffness vs Displacement Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)

Rajagopal and Prabavathy (2014) juga menampilkan tabel *stiffness* dari hasil pengujian seperti pada tabel 2.9. Tabel ini hanya menyajikan *average initial stiffness*. Pada penelitian ini specimen-spesimen grup I memiliki tingkat kekakuan yang tinggi

dibandingkan dengan specimen-spesimen grup II. Pernyataan ini didukung dengan nilai *average stiffness* spesimen A-I lebih besar 6,627 kN/mm dari specimen A-II, specimen B-I lebih besar 9,781 kN/mm dari specimen B-II dan specimen C-I lebih besar 13,954 kN/mm dari specimen C-II. Penelitian ini menunjukkan tingkat kekakuan hubungan balok-kolom yang menggunakan *x-cross bar* lebih tinggi dibandingkan menggunakan *U-bar*.

Tabel 2. 9 Kekakuan Hasil Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)

Specimen Name & Group	Yielding Displacement in mm(δ_v)	Ultimate Load in kN (P_u)		Average Stiffness in kN/mm ($k=P_u/\delta_v$)
		Left Hand Side (LHS)	Right Hand Side (RHS)	
A1-I	2.15	89.00	90.00	41.627
B1-I	2.40	89.00	91.00	37.500
C1-I	2.20	88.00	90.00	40.454
A2-II	2.30	80.00	81.00	35.000
B2-II	2.85	78.00	80.00	27.719
C2-II	3.00	78.50	80.50	26.500

d. *Cracking Study*



(a). *Group-I*

(b). *Group-II*

Gambar 2. 20 Pola Retak Spesimen Eksperimental Rajagopal and Prabavathy (2014)

Setelah melakukan pengujian, spesimen mengalami keretakan yang berbeda antara satu dengan yang lainnya yang dapat dilihat pada gambar 2.20. Spesimen A-I memiliki kolom sendi plastis dengan retakan kecil dan tidak terjadi *cover spalling* dibandingkan dengan specimen tipe B-I dan specimen C-I. Spesimen A2 memiliki retak diagonal walaupun kecil namun tidak terjadi *cover spalling* sedangkan spesimen B2 dan specimen C2 memiliki retak yang lebih lebar dan terjadi *cover spalling*. Hal ini menunjukkan bahwa benda uji A1 dan A2 yang menggunakan pengankuran tipe

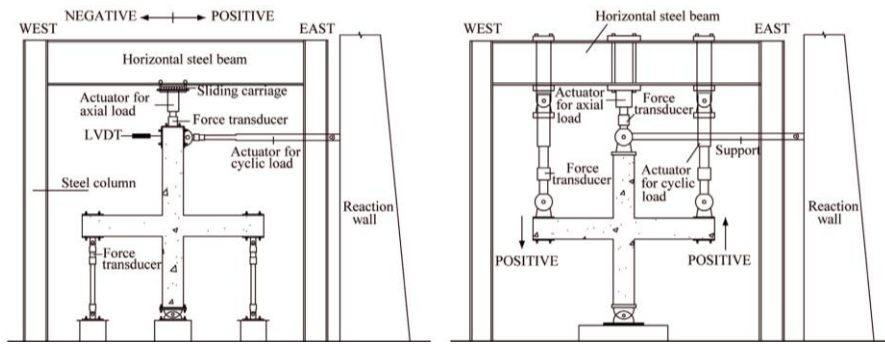
headed bar memiliki performa yang baik dibandingkan tipe pengankuran kait standar berdasarkan *cracking study*.

Berdasarkan hasil dan pengamatan spesimen maka Rajagopal and Prabavathy (2014) menyimpulkan bahwa :

1. Spesimen yang menggunakan *headed bar* yang menggunakan ACI-352 (spesimen A1 dan A2) menawarkan kinerja yang lebih baik daripada spesimen yang diperkuat dengan kait standar 90 derajat berdasarkan ACI-318 (spesimen B1 dan B2).) dan kait standar 90 derajat berdasarkan IS-456 (spesimen C1 dan C2). Selain itu, peningkatan daktilitas yang signifikan untuk spesimen Grup-I yang menunjukkan daktilitas yang lebih tinggi daripada spesimen Grup-II A2, B2 dan C2 masing-masing sebesar 10,70%, 36,97% dan 20,58%.
2. Spesimen A1 dan A2 yang menggunakan *headed bar* menunjukkan pola retak yang lebih rendah daripada spesimen lainnya yang menggunakan penulangan konvensional. Namun, spesimen A1 yang menggunakan *headed bar* (ACI-352, jangkar mekanik) yang dikombinasikan dengan *X-cross bar* ditambah *U-bar* menunjukkan retak yang lebih rendah dan kontrol kapasitas retak yang jauh lebih baik dengan peningkatan gaya gempa untuk daerah rawan gempa yang lebih tinggi bilamana yang diminta yaitu daktilitas yang sedang dan berat.
3. Hubungan balok-kolom yang menggunakan *T-headed bar* dan detail sambungan tidak hanya mengurangi segregasi tetapi juga mempermudah penuangan beton dan mempercepat pekerjaan konstruksi. Selain itu dalam rangka perbaikan performa gempa *T-headed bar* menjadi alternatif dari penggunaan kait standar 90 derajat pada hubungan balok-kolom bagian luar.

Yang et al (2018) meneliti perilaku gempa pada hubungan balok-kolom interior dengan menggunakan 2 tipe metode pembebanan. Yang et al melakukan penelitian ini untuk membandingkan kedua tipe metode pembebanan tersebut. Metode pembebanan yang pertama yaitu metode pembebanan pada ujung kolom (CL Method). Metode pembebanan ini menerapkan pembebanan berupa *axial load* dan *displacement load* pada ujung kolom. Metode pembebanan ini dapat dilihat pada

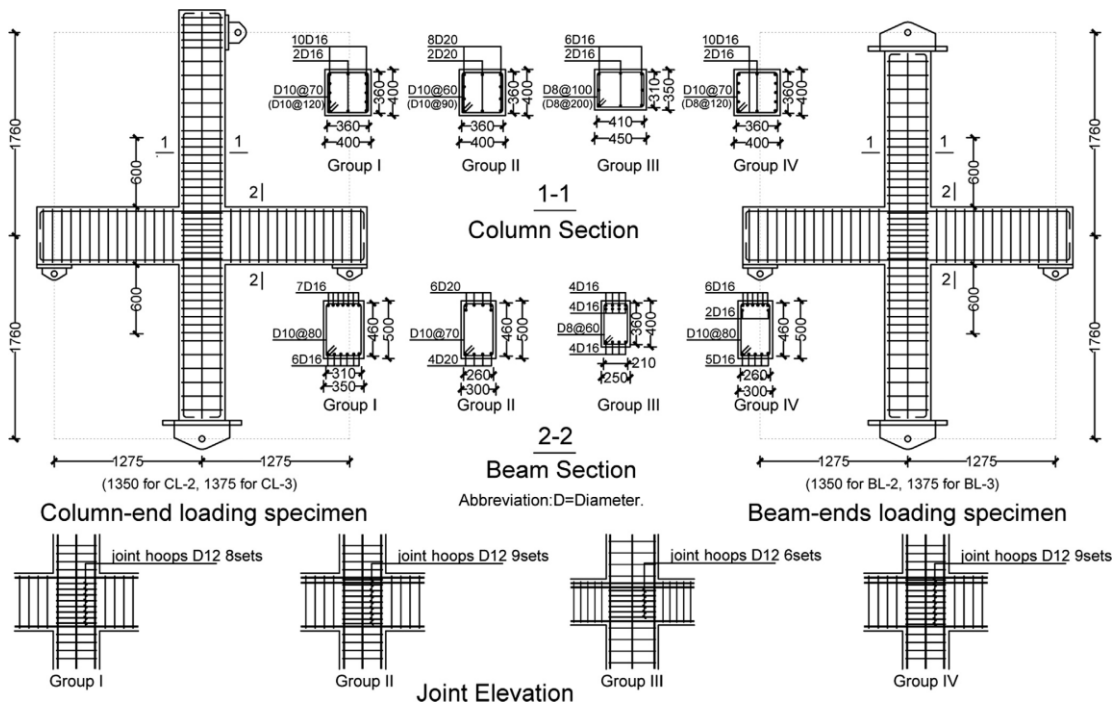
gambar 2.21(a). Metode pembebanan yang kedua yaitu metode pembebanan pada ujung balok (BL Method). Metode pembebanan ini menerapkan pembebanan berupa *axial load* pada ujung balok dan *load displacement* pada kedua ujung balok. Metode pembebanan ini dapat dilihat pada gambar 2.21(b).



(a). Pembebanan pada Ujung Kolom (b). Pembebanan pada Ujung Balok

Gambar 2. 21 Metode pengujian Hubungan Balok-Kolom Interior Eksperimental

Yang et al (2018)



Gambar 2. 22 Geometri, dimensi dan detail penulangan Eksperimental Yang et al

(Yang et al. 2018)

Yang et al (2018) melibatkan 8 spesimen yang dibagi menjadi 4 grup dalam penelitiannya. Perbedaan dari keempat grup ini terletak pada geometri, dimensi dan detail penulangan. Setiap grup terdiri dari 2 spesimen dengan metode pembebanan yang berbeda namun geometri, dimensi dan detail penulangan sama. Spesimen-spesimen didesain dengan prinsip *strong column weak beam* berdasarkan *Chinese Code*. Geometri, dimensi dan detail penulangan dapat dilihat pada gambar 2.22.

Mutu beton antara satu spesimen dan spesimen lainnya berbeda pada saat pengujian. Demikian pula halnya dengan mutu tulangan baja. Mutu beton dan baja dapat dilihat pada tabel 2.10 dan tabel 2.11.

Tabel 2. 10 Mutu Beton Hasil Pengujian Eksperimental Yang et al (2018)

	Group I		Group II		Group III		Group IV	
	CL-1	BL-1	CL-2	BL-2	CL-3	BL-3	CL-4	BL-4
Compressive Strength f_{cu150} (N/mm ²)	35,5	28,8	38,2	37,5	34,3	29,8	30,2	32,8

Tabel 2. 11 Mutu Baja Tulangan Hasil Pengujian Eksperimental Yang et al (2018)

Group No.	Beam and Column Longitudinal Reinforcement		Joint Transverse Reinforcement	
	Diameter mm	Yield Strength Mpa	Diameter mm	Yield Strength Mpa
Group I	16	528	12	407
Group II	20	540	12	368
Group III	16	444	12	464
Group IV	16	553	12	362

Metode pembebanan yang digunakan pada eksperimental Yang et al yaitu metode pembebanan pada ujung kolom (*CL Method*) dan metode pembebanan pada balok (*BL Method*). Kedua metode pembebanan ini menggunakan 2 tipe pembebanan yaitu *axial load* dan *displacement load*. Rasio *axial load* untuk grup I, II, III, IV secara berurutan yaitu 0.25, 0.30, 0.25 dan 0.25. Spesimen yang menggunakan *CL method* menggunakan perletakan sendi pada bagian bawah kolom dan perletakan rol pada kedua ujung balok. Sedangkan spesimen dengan menerapkan *BL method* menggunakan perletakan sendi pada bawah kolom dan perletakan rol pada bagian atas

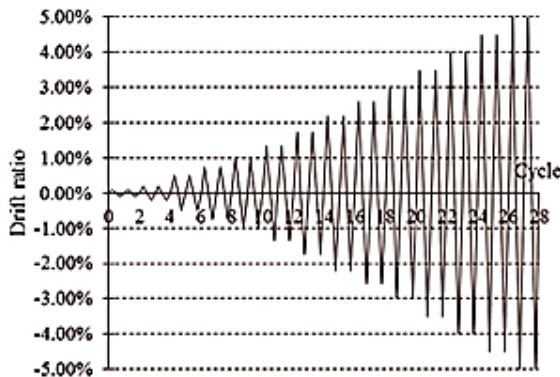
kolom dengan mengunci pergerakan searah sumbu x. Penerapan perletakan dan metode pembebanan spesimen dapat dilihat pada gambar 2.23. *Loading history* yang diterapkan Yang et al dalam penelitian mereka dapat dilihat pada gambar 2.24.



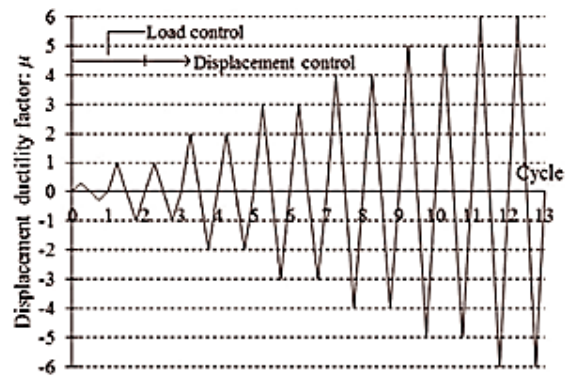
(a). Spesimen dengan *CL Method*

(b). Spesimen dengan *BL Method*

Gambar 2. 23 Spesimen Hubungan Balok-Kolom Interior Eksperimental Yang et al (2018)



(a). Pembebanan pada Ujung Kolom



(b). Pembebanan pada Ujung Balok

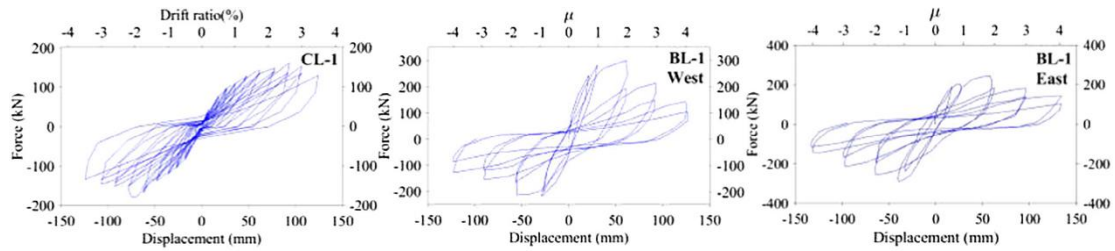
Gambar 2. 24 Loading History Eksperimental Yang et al (2018)

Hasil pengamatan Yang et al meliputi kurva histeretik *load vs displacement*, kuat geser joint dan mekanisme perpindahan geser, *damping* dan kekakuan, perpindahan geser joint dan *reinforcement slippage*.

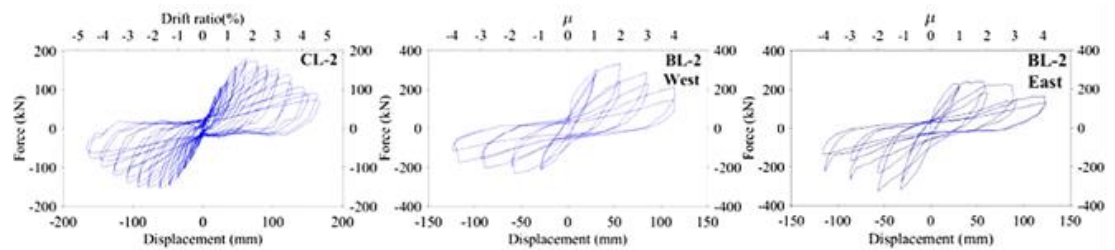
e. Kurva Histeretik *Load vs Displacement*

Metode pembebanan CL seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya yang dapat dilihat pada gambar 2.21, diberikan perletakan rol pada kedua ujung balok sehingga deformasi vertikal kelihatan sangat kecil. Metode pembebanan CL

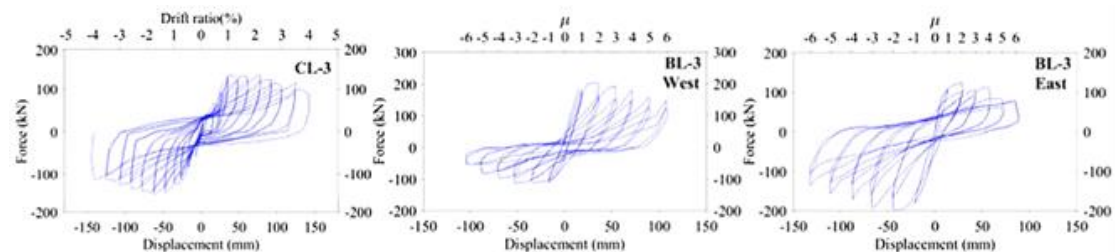
menghasilkan deformasi yang simetris antara arah positif dan negatif. Pada kondisi ini deformasi vertical balok ke atas dan ke bawah serupa. Kurva histeretik *load vs displacement* untuk spesimen yang menerapkan metode pembebanan CL dapat dilihat pada gambar 2.25.



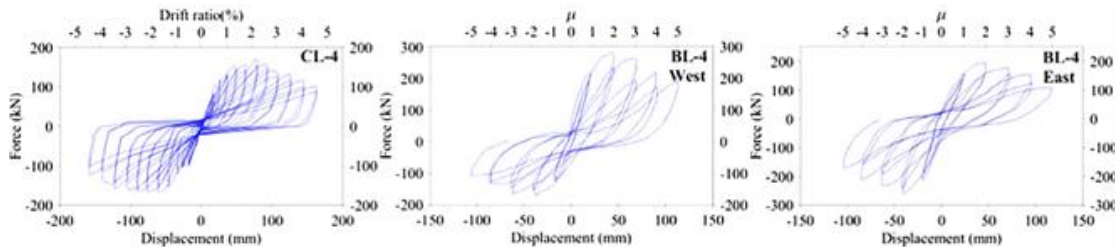
(a). Group I



(b). Group II



(c). Group III



(d). Group IV

Gambar 2. 25 kurva hisrteresis force vs displacement eksperimental Yang et al (2018)

Ketika metode pembebanan BL diterapkan pada spesimen hubungan balok-kolom internal yang terjadi yaitu tulangan bagian atas dan bawah leleh bergantian. Hal ini terjadi karena pada metode pembebanan BL balok menerima beban *displacement* ke arah bawah dan ke atas secara bergantian. Akibat dari tulangan longitudinal bagian atas dan bawah tidak sama maka beban/*force* ke arah bawah lebih tinggi dibandingkan ke arah atas. Kurva histeretik *load vs displacement* untuk spesimen yang menerapkan metode pembebanan BL dapat dilihat pada gambar 2.25.

f. Kuat Geser *Joint* dan Mekanisme Perpindahan Geser

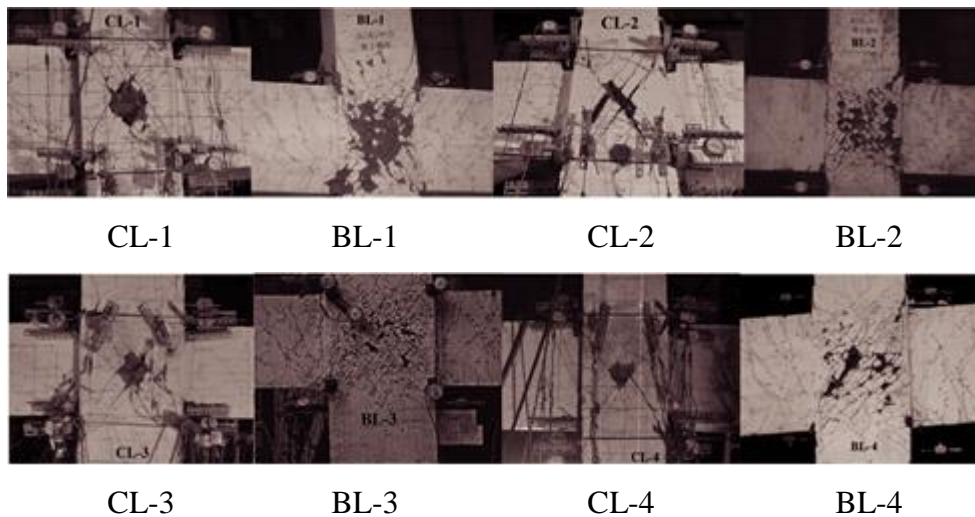
Demi membandingkan hasil pengujian spesimen grup CL dan BL setiap grup dievaluasi pada tingkat kerusakan yang serupa dan bersifat representatif. Berkaitan dengan ini, terdapat empat poin yang menjadi pokok evaluasi tingkat kerusakan pada join diantaranya retak awal pada inti joint (*the initial cracking of joint core*), pelelehan pertama pada tulangan longitudinal balok (*the first yield of the longitudinal beam reinforcement*), kekuatan puncak (*the peak strength*) dan 15% penurunan kekuatan dari kekuatan puncak (*15% strength degradation of the peak strength*). Hasil pengujian gaya geser horisontal pada join untuk semua spesimen keempat grup ditampilkan dalam bentuk table 2.12.

Tabel 2. 12 Evaluasi gaya geser horizontal pada join eksperimental Yang et al (2018)

Observation	Loading method	Horizontal joint shear force			
		Group I	Group II	Group III	Group IV
First crack	CL	565	652	641	628
	BL	640	590	684	461
First yield	CL	1057	1150	925	840
	BL	1067	1184	991	858
Peak	CL	1120	1162	945	947
	BL	1190	1267	1034	1038
15% Degradation	CL	883	1082	731	780
	BL	868	1137	805	856

Table 2.12 menunjukkan bahwa gaya geser pada join dari spesimen BL relatif lebih besar daripada spesimen CL. Gaya geser horisontal di join pada saat kekuatan puncak dari spesimen BL 8%, 9%, 9,4% dan 9,6% lebih besar dari spesimen CL di

grup I, II, III dan IV. Balok bagian bawah dan atas spesimen BL mengalami pelepasan secara bergantian pada tahap awal pembebanan, sedangkan balok bagian bawah spesimen CL mengalami pelepasan pada saat DR 1,35%, namun beberapa balok bagian atas spesimen CL mengalami pelepasan pada saat akhir pembebanan dan beberapa tidak menghasilkan. Dengan kata lain, tegangan tarik balok bagian bawah setiap grup mengalami pelepasan serupa, tegangan tarik balok bagian atas spesimen BL lebih besar dari spesimen CL, yang mana dilakukan atau terjadi dengan metode pembebanan dan alat pengujian yang berbeda. Tegangan tarik tulangan longitudinal balok memiliki kontribusi pada gaya geser joint. Dengan demikian perbedaan gaya geser pada joint dipengaruhi oleh variasi metode pembebanan dan peralatan pembebanan sehingga menyebabkan perbedaan tegangan tarik pada bagian atas balok dari spesimen BL dan CL.



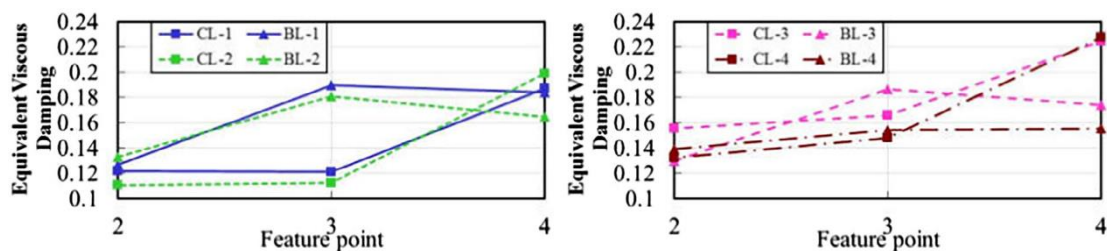
Gambar 2. 26 Pengamatan Retak Spesimen Eksperimental Yang et al (2018)

Pola retak suatu spesimen dengan metode pembebanan yang sama adalah umum satu dengan yang lain. Kondisi pola retak dapat dilihat pada gambar 2.26. Jumlah retakan diagonal pada *joint* untuk spesimen CL lebih sedikit dibandingkan spesimen BL dan beton yang mengalami *spalling* hanya terjadi pada bagian tengah joint dibandingkan dengan spesimen BL. Perbedaan pola retak dari dua metode pembebanan bisa dikaitkan dengan kontribusi atau peran dari mekanisme media geser dalam *joint*.

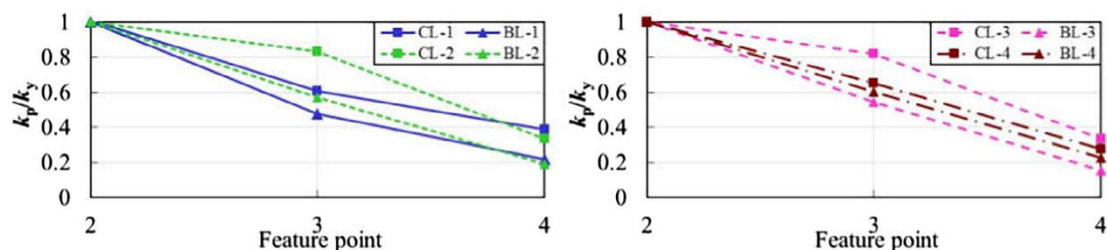
Terbukti spesimen CL dan BL sebagian besar bergantung pada penopang diagonal dan mekanisme rangka masing-masing.

g. Damping dan Kekakuan

Perhitungan hasil dari *equivalent viscos damping* dan *stiffness degradation* dibandingkan dengan titik fitur dapat dilihat pada gambar 2.27. Perlu diketahui bahwa tidak ada siklus terintegrasi pada retakan pertama sehingga hanya 3 titik fitur terakhir yang disebutkan sebelum dievaluasi.



(a). *Equivalent viscous dumping*



(b). *Degree of peak to peak secant stiffness degradation*

Gambar 2. 27 *Equivalent viscous dumping dan stiffness degradation eksperimental Yang et al (2018)*

Berdasarkan gambar 2.27.(a), pada leleh pertama specimen BL mengalami *damping* yang paling tinggi dari pada spesimen CL, kecuali specimen pada grup III. Pada saat kekuatan puncak, *equivalen viscous damping* dari spesimen BL 56.2%, 61.5%, 12.6% dan 4.1% lebih tinggi daripada spesimen CL pada masing-masing grup I, II, III dan IV. Perbedaan ini dipengaruhi oleh variasi ketetapan pembebanan dan peralatan pengujian yang digunakan. Balok bagian bawah dan atas leleh bersamaan, yang membuat kekuatan geser spesimen BL ke arah bawah lebih tinggi daripada spesimen CL. Sementara pada saat penurunan 15%, *equivalent viscous damping* dari

spesimen BL 1.6%, 17.1%, 22.6% dan 31.7% lebih rendah dari spesimen CL pada masing-masing grup I, II, III dan IV.

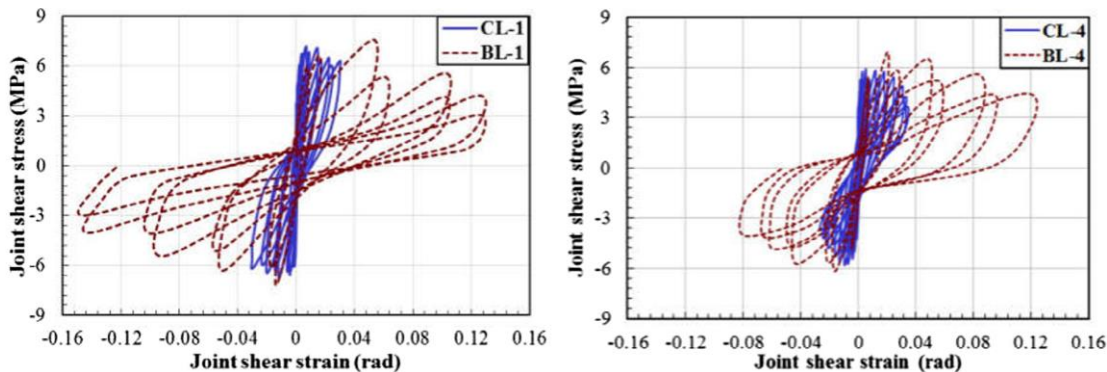
Selain itu, gambar 2.27 (b) menunjukkan bahwa tingkat penurunan kekakuan dari spesimen CL pada umumnya lebih rendah dari spesimen BL. Pada saat penurunan 15%, rasio penurunan kekakuan (kp/ky) dari spesimen BL 43.3%, 43.4%, 53.1% dan 18.6% lebih rendah dari spesimen CL pada masing-masing grup I, II, III dan IV. Hal ini disebabkan oleh kerusakan material yang lebih parah pada spesimen BL.

h. Joint shear deformation

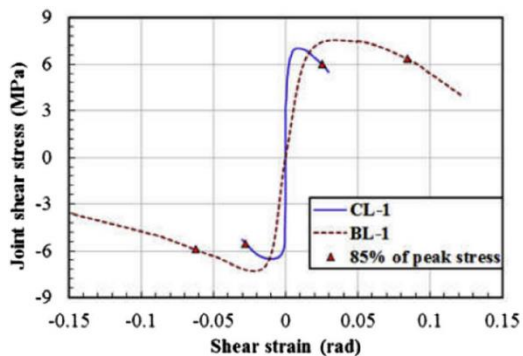
Regangan geser *joint* vs tegangan geser *joint* diilustrasikan seperti pada gambar 2.28. Tegangan geser berbanding lurus dengan beban yang diterapkan pada titik pembebanan. Deformasi geser yang diukur meningkat setelah beban maksimum yang tercatat sebesar 2,2% *drift* dan $\mu=2$ untuk masing-masing spesimen CL 1-4 dan BL1-4, diikuti dengan degradasi yang signifikan pada kekuatan dan kekakuan. Gambar 2.29 menunjukkan perbandingan *envelope* deformasi geser join untuk masing-masing kelompok, dengan indikasi kondisi yang sama sesuai dengan penurunan tegangan 15% dari tegangan puncak. Tegangan geser spesimen BL sedikit lebih besar daripada spesimen CL. Hasil-hasil ini sesuai dengan table 2.12, terutama dikaitkan dengan penetapan variasi pembebanan dan peralatan pembebanan. Regangan geser gabungan secara signifikan lebih besar pada spesimen BL dibandingkan spesimen CL, dan regangan geser rata-rata yang diukur dari penurunan 15% dari beban positif dan negatif adalah 0.025-0.03 rad untuk spesimen CL, 0.045-0.075 rad untuk spesimen BL.

Meskipun pembebanan yang digunakan metode CL lebih berat daripada metode BL dalam hal jumlah siklus deformasi geser yang terjadi pada spesimen CL lebih sedikit daripada spesimen BL. Dengan demikian perilaku siklik yang berbeda dipengaruhi oleh metode pembebanan dan peralatan pembebanan. Metode BL mendorong balok ke atas dan ke bawah secara bersamaan, yang mengarahkan pada tegangan tekan yang lebih besar dari *strut* diagonal dan tegangan *bond* yang lebih besar pada balok di daerah join spesimen BL. Dapat disimpulkan bahwa jika siklus pembebanan yang digunakan dalam metode CL konsisten dengan yang dipakai pada

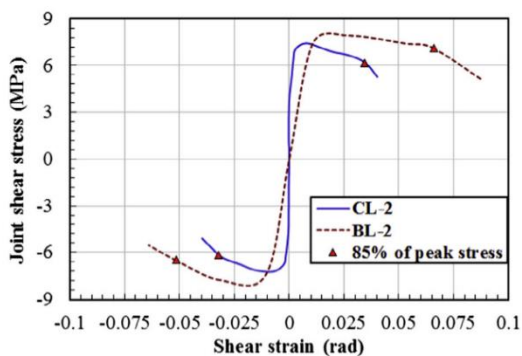
metode BL untuk spesimen dalam grup I, II, III dan IV dari jurnal ini, deformasi geser *joint* spesimen CL harus berkurang, dan perbedaan deformasi geser *joint* antara spesimen CL dan BL harus lebih besar daripada gambar 2.28 dan 2.29.



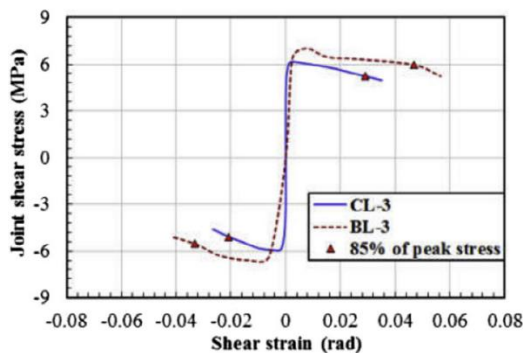
Gambar 2. 28 Kurva histeristis joint shear stress vs joint shear strain grup I dan IV eksperimental Yang et al (2018)



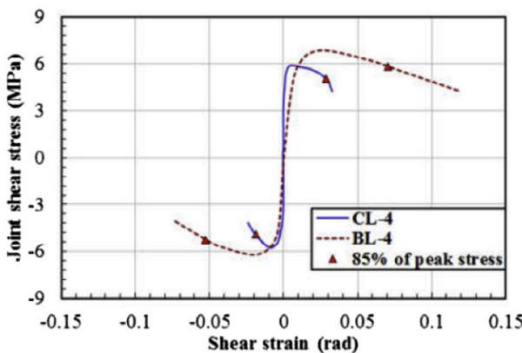
(a). Group I



(b). Group II



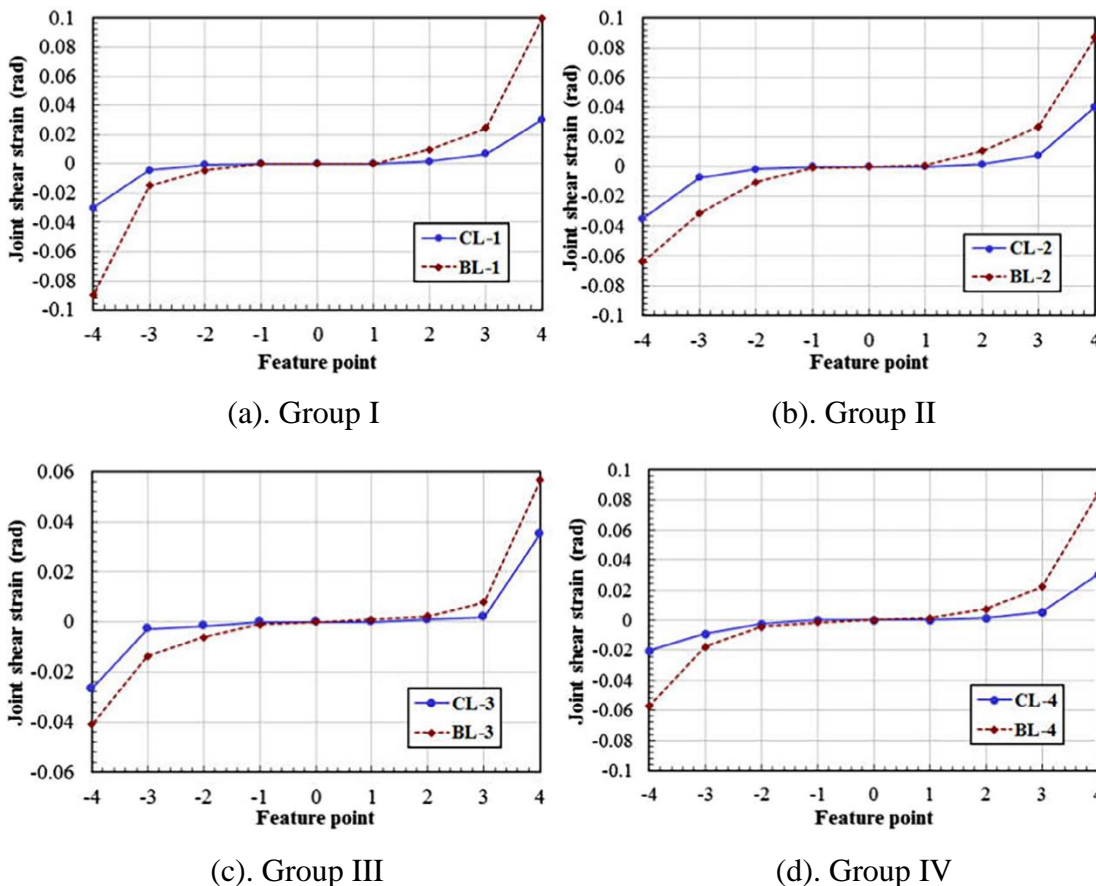
(c). Group III



(d). Group IV

Gambar 2. 29 Perbandingan envelope deformasi geser joint eksperimental Yang et al (2018)

Regangan geser *joint* dari empat poin yang sudah disebutkan sebelumnya, dari masing-masing kelompok dibandingkan seperti pada gambar 2.30, dimana regangan geser pada retak awal adalah serupa antara kedua metode pembebanan tersebut. Membandingkan titik leleh, puncak dan penurunan 15%, perbedaan regangan geser *joint* disamping spesimen dengan metode pembebanan yang berbeda bertambah dengan bertambahnya beban *displacement*. Pada titik penurunan 15%, rata-rata regangan geser dari arah positif dan negatif specimen CL 68.3%, 49.8%, 36,5% dan 64.4% lebih rendah dari spesimen BL pada masing-masing grup I, II, III dan IV. Perbedaan yang relatif kecil pada kelompok III dimana penetapan rasio lebar balok dan kolom yang relatif kecil.



Gambar 2. 30 Perbandingan kurva joint shear deformation-feature points eksperimental Yang et al (2018)

Mekanisme *strut* beton bermanfaat untuk mengendalikan distorsi pada *joint*. Dengan mekanisme *truss*, banyak tulangan transversal yang dibutuhkan pada area *joint*. Sebaliknya dengan menggunakan mekanisme *strut* berkurang sangat signifikan. Penyalur geser pada join untuk spesimen BL dan CL, dengan detail penulangan yang serupa, masing-masing dipengaruhi oleh mekanisme *strut* dan *truss*, oleh karena itu inti *joint* spesimen CL terbatas. Selain itu retakan spesimen BL lebih diagonal membuat inti sambungan lebih fleksibel. Akibatnya, spesimen BL mengerahkan deformasi geser yang lebih besar.

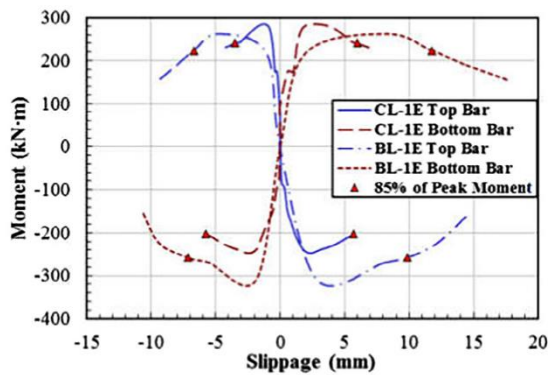
i. Reinforcement Slippage

Gambar 2.31 menunjukkan perbandingan slip tulangan longitudinal balok bagian barat setiap grup pada kondisi 85% setelah titik puncak. Tercatat bahwa hubungan antara tegangan tarik balok dengan gaya geser balok menyebabkan momen lentur yang berbeda antara metode CL dan metode BL. Gambar 2.31 menunjukkan bahwa spesimen BL jauh melebihi spesimen CL terkait *pull out* walaupun *push in* kedua spesimen tersebut terlihat dekat.

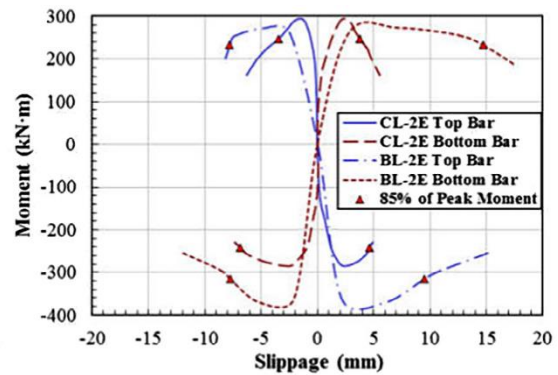
Slip tulangan longitudinal pada empat kondisi ditampilkan pada gambar 2.32. Terlihat bahwa *pull out* pada kondisi leleh, puncak dan 15% penurunan setelah puncak menunjukan bahwa spesimen BL lebih besar dibandingkan spesimen CL, walaupun *push in* terlihat serupa. Pada kondisi penurunan 15% dari puncak, tercatat nilai rata-rata slip tulangan akibat *pull out* dari spesimen CL 53%, 48.4%, 49.5% dan 32.7% lebih rendah dari spesimen BL pada setiap grup I, II, III dan IV. Untuk *pull out*, perbedaan slip tulangan longitudinal bertambah seiring bertambahnya beban *displacement* baik spesimen BL maupun CL.

Perlu diketahui bahwa efek dari pembebanan siklik mempengaruhi penurunan ikatan pada tulangan, slip *bond* bertambah dengan bertambahnya siklus. Walaupun tipe pembebanan dengan metode CL memiliki siklus yang lebih besar dari metode BL namun slip *bond* spesimen dengan metode BL lebih besar. Faktanya menunjukan bahwa gaya tarik dan tegangan ikat yang besar merupakan atribut utama untuk tipe pembebanan dan peralatan pembebanan, dan metode BL didorong ke atas dan ke

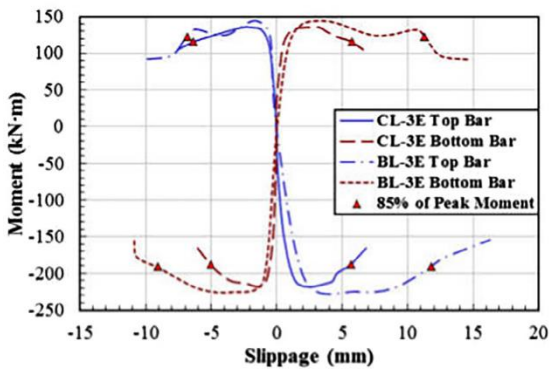
bawah secara bersamaan . Oleh karena itu berdasarkan hasil pengujian slip tulangan longitudinal, gaya tarik dan tegangan *bond* relatif besar dari hasil pengujian tulangan balok pada tingkat deformasi inelastik yang relatif pada spesimen BL.



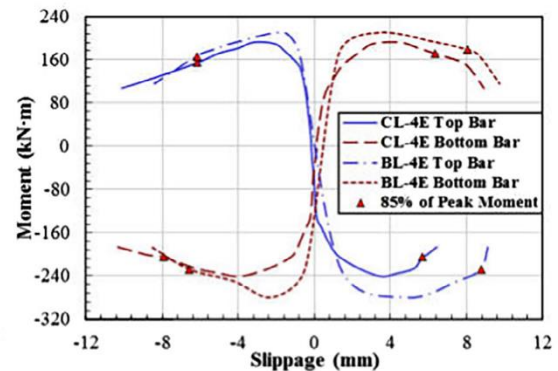
(a). Group I



(b). Group II

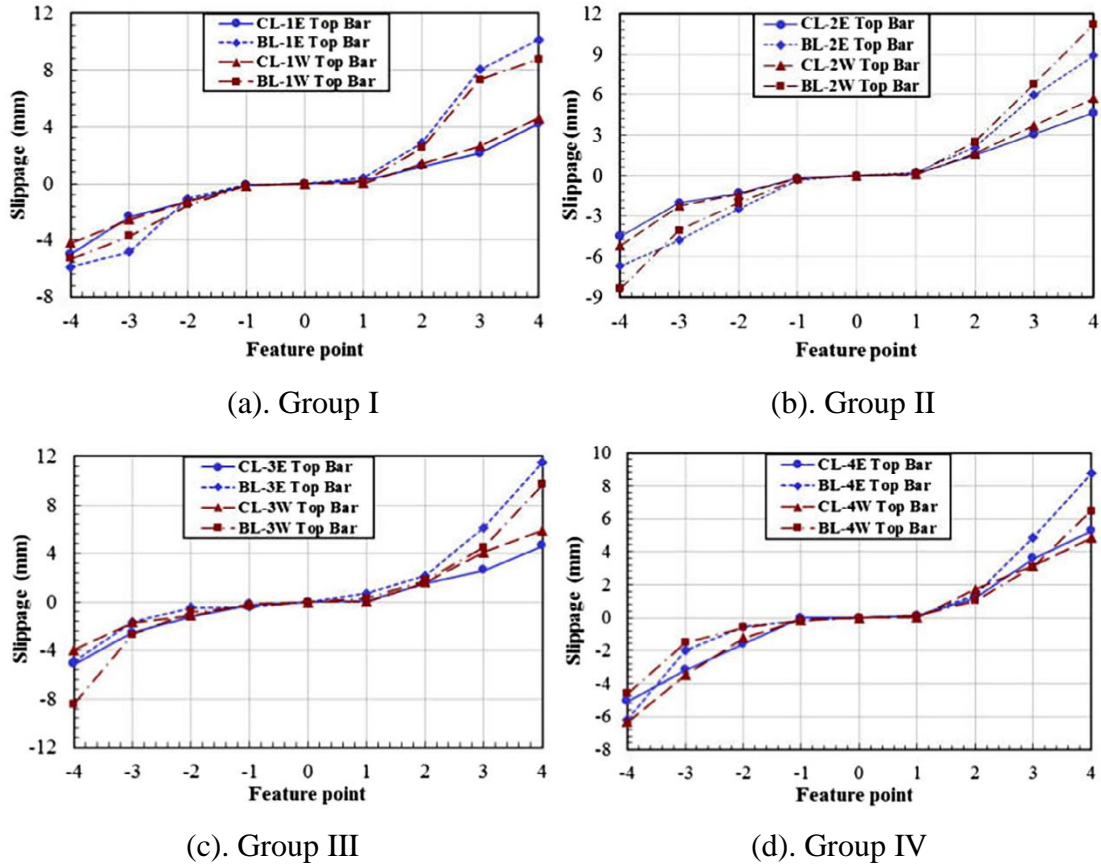


(c). Group III



(d). Group IV

Gambar 2. 31 Perbandingan envelope dari slip tulangan balok eksperimental Yang et al (2018)



Gambar 2. 32 Perbandingan slip tulangan longitudinal balok-beberapa titik puncak eksperimental Yang et al (2018)

Setelah melakukan investigasi terhadap hasil penelitian 4 grup spesimen dengan 2 metode pembebanan maka Yang dkk menyimpulkan bahwa :

- b. Kerusakan 4 spesimen CL ketika menerima beban berpusat pada tengah joint dengan retakan diagonal yang menyebar pada area joint sedikit dan lebar, sedangkan specimen BL mengalami retak diagonal yang tersebar pada area joint dengan retakan yang banyak dan sempit. Selama periode pembebanan kapasitas transfer gaya yang diterima spesimen BL lebih besar dibandingkan spesimen CL. Pola retak yang diamati dari 4 grup dan distribusi regangan dan tulangan longitudinal balok mengindikasikan bahwa mekanisme transfer geser sangat dipengaruhi oleh metode pembebanan. Perbandingan antara spesimen BL dan CL diimplementasikan dengan perbandingan hasil pada *identical feature point*.

- c. Pelelehan pada tulangan longitudinal bagian atas pada spesimen BL lebih dahulu terjadi daripada spesimen CL. Hal ini menyebabkan perbedaan tegangan tarik pada tulangan longitudinal balok bagian atas spesimen CL dan BL, yang mana menyebabkan variasi tegangan geser maksimum join antara spesimen BL dan CL. Tegangan geser maksimum join dari spesimen BL 8%-9.6% lebih besar dari spesimen CL. Respon regangan geser join interior tidak terpengaruh secara signifikan dengan variasi metode pembebanan. Berdasarkan hasil penelitian, penurunan 15% dari titik puncak dari kuat geser tercapai ketika regangan geser mencapai nilai antara 0.025 dan 0.03 rad untuk spesimen CL dan nilai antara 0.045 dan 0.075 rad untuk spesimen BL. Pada titik penurunan 15%, regangan geser dari spesimen CL 36.5%-68.3% lebih rendah dari spesimen BL. Fenomena ini dijelaskan oleh fakta dimana mekanisme *strut* diagonal dominan pada spesimen CL dan mekanisme *truss* dominan pada spesimen BL.
- d. Respon slip tulangan longitudinal balok sangat berpengaruh pada variasi metode pembebanan. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa slip batang pada arah *pull out* dari spesimen BL secara signifikan lebih besar daripada spesimen CL, sedangkan slip batang arah *push in* untuk spesimen CL dan BL serupa. Pada titik penurunan 15%, slip batang pada saat *pull out* dari spesimen CL 32.7%-53% lebih rendah dari spesimen BL. Spesimen dengan metode pembebanan BL mengalami penurunan *bond* yang sangat parah dan mengalami penetrasi leleh setelah balok mengalami pelelehan.
- e. Perbedaan deformasi inelastik dari spesimen CL dan BL terutama disebabkan oleh penetapan pembebanan dan peralatan pembebanan. Metode pembebanan BL mendorong balok ke arah atas dan bawah secara bersamaan, yang mengarah pada tegangan tekan pada *strut* diagonal dan tegan *bond* yang lebih besar pada bagian atas balok di daerah join dari spesimen BL.
- f. Meskipun penetapan pembebanan menggunakan metode pembebanan CL lebih parah dari metode pembebanan BL dalam hal jumlah siklus, deformasi geser join dan slip batang tulangan longitudinal dari spesimen CL sangat kecil dari pada

spesimen BL. Konsekuensi akumulasi kerusakan disebabkan oleh jumlah dari siklus pembebanan yang merupakan faktor sekunder dari penelitian ini.

- g. Perilaku gempa dari spesimen dengan metode pembebanan CL dan BL sangat berbeda. Dengan demikian, pemilihan metode pembebanan harus dipertimbangkan atau menyertakan dua spesimen sekaligus dengan masing-masing menggunakan metode BL dan metode CL.
- h. Kondisi defleksi dari grup yang menggunakan metode pembebanan CL lebih realistis, tetapi metode pembebanan BL mudah dilakukan di laboratorium. Oleh karena itu dengan premis keterbatasan kondisi laboratorium, metode pembebanan CL direkomendasi untuk keperluan investigasi perilaku gempa pada balok-kolom.

2.7 Program Vector2

Vector2 merupakan sebuah program finit elemen non linear untuk analisis *membrane structure* beton bertulang. Program ini dikembangkan di Universitas Toronto sejak tahun 1990. Versi originalnya pada waktu itu yaitu TRIX[®]. Pengembangan ini bertepatan dengan pengujian eksperimental yang menguatkan kemampuan vector2 untuk memprediksi respon beban-deformasi dari variasi struktur beton bertulang menunjukkan distribusi keretakan yang baik ketika dikenakan beban *short-term static monotonic, cyclic* dan *reverse cyclic*.

Dasar teori dari program vector2 yaitu *Modified Compression Field Theory* (Vecchio and Collins 1986) dan *Disturbed Stress Field Model* (Vecchio 2000)-model analitis untuk memprediksi respon dari elemen beton bertulang berlandaskan *in-plane normal* dan *shear Stresses*. Model keretakan beton bertulang vector2 seperti material ortotropik dengan *sheared, rotation crack*. Program ini menggunakan tambahan total beban, iterasi algoritma *secant stiffness* untuk menghasilkan solusi *nonlinear* yang efisien dan kuat.

Sesungguhnya, vector2 memanfaatkan hubungan konstitutif dari MCFT. Selanjutnya pengembangan model konstitutif alternatif berbadan hukum untuk sebuah variasi dari efek *second-order* termasuk *compression softening, tension stiffening* dan

tension splitting. Selain itu kemampuan vector2 bertambah untuk model ekspansi beton dan *confinement*, beban siklik dan respon histeresis, konstruksi dan kronologi pembebanan untuk aplikasi *repair*, *bond slip*, *crack shear slip deformations*, *reinforcement dowel*, *reinforcement buckling* dan proses alokasi retak.

Model *mesh* finit elemen vector2 tipis dari elemen dengan power rendah. Metodologi ini sudah mengedepankan efisiensi komputasi dan stabilitas numerikal. Hal ini tepat untuk struktur beton bertulang yang mana memerlukan mesh tipis untuk model detail tulangan dan pola retak lokal. Model elemen tersebut diantaranya *three-node constant strain thrianggle*, *four-node quadrilateral* untuk pemodelan mesh beton. Untuk pemodelan tulangan ada *two-node truss bar* dan *two node contact*. *Two node truss bar* untuk memodelkan tulangan yang berlainan sedangkan *two node contact* untuk memodelkan mekanisme *bond-slip*.

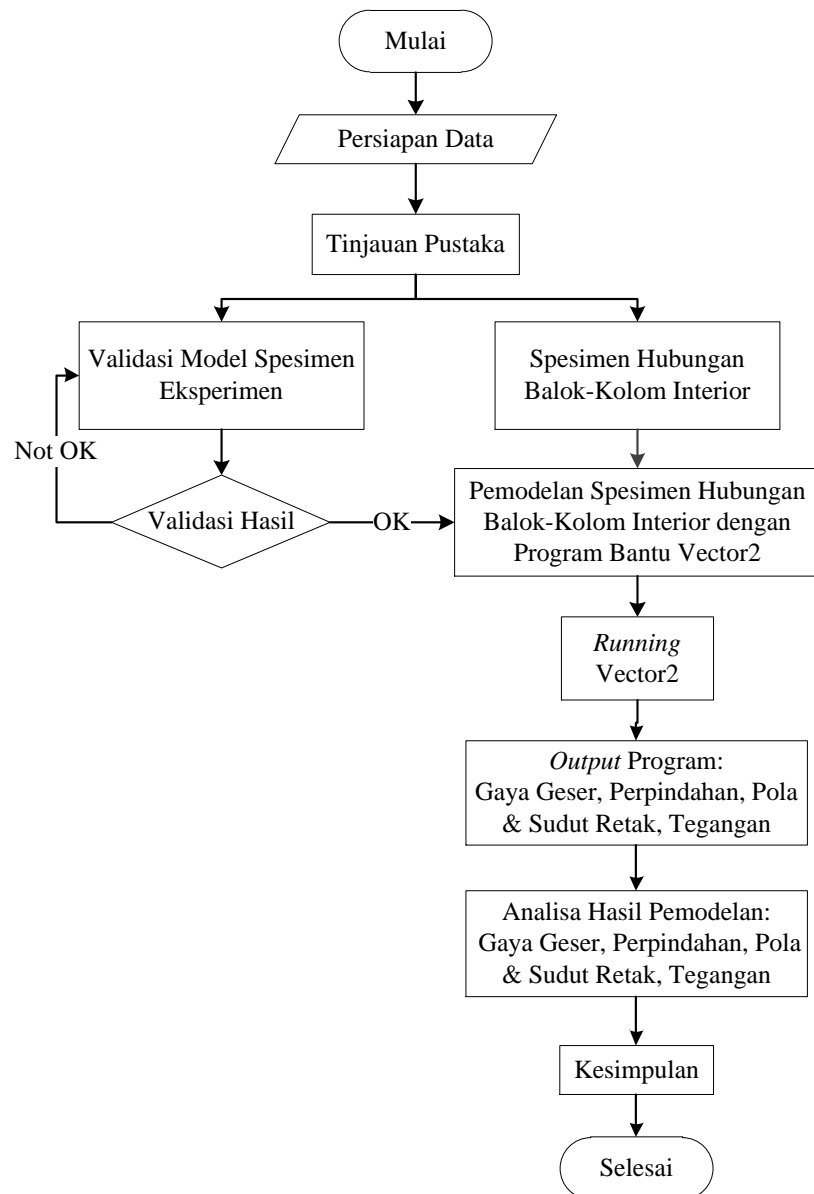
Vector2 bisa membaca file ASCII untuk biner *output dan imput*. Selain itu vector2 bisa membaca file ASCII untuk hasil analisis. Perangkat lunak Agustus[®] menyediakan *graffical post-processing* untuk hasil analisis dari vector2. Preprosesor program software vector2 yang baru yaitu FormWorks[®] (Wong, Vecchio, and Trommels 2013).

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1 Umum

Penyusunan metodologi pada bab ini bertujuan untuk mengarahkan peneliti tahap demi tahap untuk mencapai hasil yang optimal. Peneliti menampilkan tahapan penelitian dalam bentuk bagan alir yang dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Persiapan Data

Langkah awal yang peneliti lakukan dalam penelitian ini yaitu pengambilan data-data yang berkaitan dengan penelitian ini. Sumber pengambilan data-data berupa jurnal, buku, laporan penelitian maupun peraturan (*code*) yang berkaitan dengan penelitian ini.

3.2 Tinjauan Pustaka

Setelah data-data dikumpulkan dari berbagai sumber yang berkaitan dengan penelitian ini maka langkah selanjutnya yaitu tinjauan pustaka terkait data-data tersebut. Refrensi utama pada penelitian ini diambil dari jurnal yang berisikan hasil eksperimen hubungan balok-kolom bagian tepi dan pojok.

3.3 Validasi Model Spesimen Eksperimental

Pada bagian ini peneliti menelaah satu persatu jurnal yang telah dikumpulkan untuk memperoleh spesimen eksperimental yang dibutuhkan. Setelah menemukan eksperimental yang dibutuhkan, peneliti mempelajari dan mendata semua data-data geometri maupun properti eksperimental tersebut. Data geometri berupa dimensi balok dan kolom serta jumlah dan diameter tulangan balok dan kolom. Data properti diantaranya mutu beton dan mutu tulangan.

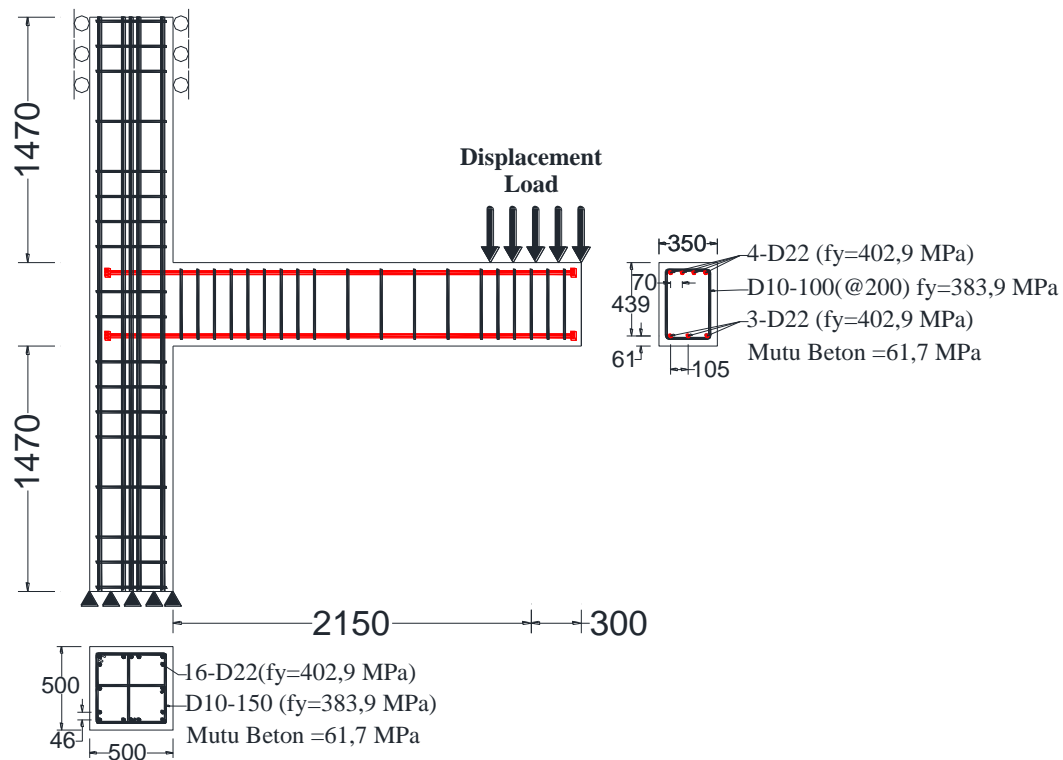
Peneliti kemudian memodelkan spesimen eksperimental tersebut dengan program vector2. Peneliti mendesain dan mengimput data-data sesuai dengan desain dan data-data eksperimental tersebut. Hal ini dilakukan untuk melihat perilaku eksperimental tersebut jika dimodelkan dengan vector2. Selain itu hal ini dilakukan sebagai pedoman dalam mendesain spesimen-spesimen peneliti dengan menggunakan program vector2.

Pada tahap ini peneliti menemukan 2 eksperimental yang dibutuhkan. Kedua eksperimental tersebut berupa eksperimental hubungan balok-kolom eksterior dan interior. Eksperimental hubungan balok-kolom eksterior merupakan eksperimental

Chun dan Kim. Sedangkan eksperimental hubungan balok-kolom interior merupakan eksperimental Yang et al.

3.3.1 Eksperimental Chun dan Kim (2004)

Chun dan Kim dalam eksperimennya melibatkan 4 spesimen yaitu JC-1, JC-2, JM-1 dan JM-2. Spesimen JC-1 dan JC-2 merupakan spesimen dengan ujung tulangan longitudinal balok menggunakan kait standar, sedangkan spesimen JM-1 dan JM-2 merupakan spesimen dengan ujung tulangan longitudinal menggunakan *headed bar*. Peneliti kemudian memilih spesimen JM-1 untuk dimodelkan dengan program bantu vector2 untuk keperluan validasi. Detail spesimen JM-1 dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Detail Spesimen JM-1 Eksperimental Chun dan Kim (S. Chun and Kim 2004)

Spesimen JM-1 didesain dengan dimensi profil kolom 500 x 500 mm dan dimensi profil balok 350 x 500 mm. Spesimen JM-1 didesain dengan diameter tulangan longitudinal kolom 22 mm. Diameter tulangan sengkang ukuran 10 mm dengan jarak

senggang untuk kolom 150 mm dan jarak senggang untuk balok 100 mm dan 200 mm. Rasio tulangan longitudinal balok dan kolom sebesar 1.52% dan 2.432%. Sedangkan rasio untuk tulangan senggang balok dan kolom sebesar 0.314% dan 0.449%. Secara detail dapat dilihat pada gambar 3.2.

Hasil pengujian mutu beton 61,7 MPa dan kuat tarik tulangan baja diameter 22 mm sebesar 402.9 MPa dan diameter 10 mm sebesar 383.9 MPa. Tabel 3.1 merupakan tabel mutu beton dan baja tulangan yang digunakan dalam mendesain spesimen dengan menggunakan program bantu vector2.

Tabel 3. 1 Properti material specimen JM-1

Property	Value
<i>Beton</i>	$f'_c = 61,7$ MPa
<i>Tulangan D22</i>	$f_y = 383,9$ MPa $f_u = 575,85$ MPa
<i>Tulangan D10</i>	$f_y = 402,9$ MPa $f_u = 604,35$ MPa

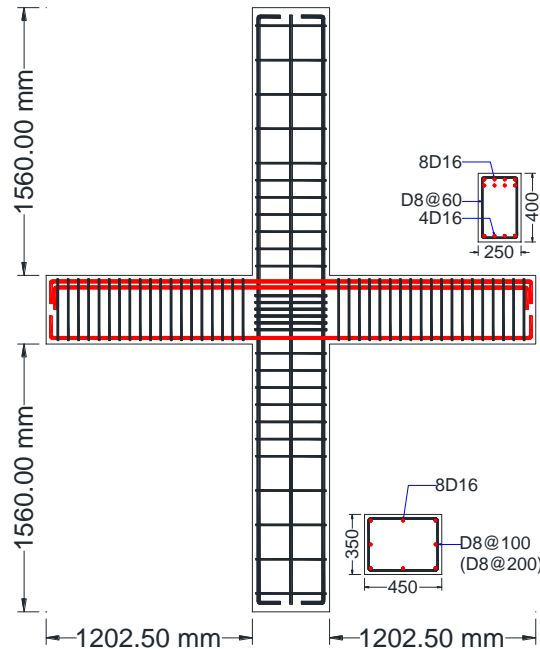
Sumber: S. Chun and Kim, 2004

3.3.2 Eksperimental Yang et al (2018)

Yang et al melakukan penelitian hubungan balok-kolom interior. Dalam penelitian tersebut, Yang et al melibatkan 4 grup spesimen dengan masing-masing grup yang terdiri dari 2 spesimen hubungan balok-kolom interior. Setiap grup diterapkan dua metode pembebanan yang berbeda. Hal ini dilakukan untuk membandingkan kedua metode pembebanan tersebut. Metode pembebanan yang pertama yaitu metode pembebanan pada ujung kolom (*loading on the column end method*) atau yang disingkat *CL-method*. Metode pembebanan yang kedua yaitu metode pembebanan pada ujung balok (*loading on the beam end method*) atau yang disingkat *BL-method*.

Peneliti kemudian memilih spesimen dengan menggunakan metode pembebanan CL dari grup-III untuk keperluan validasi. Nama spesimen tersebut adalah spesimen CL-3. Spesimen hubungan balok-kolom interior CL-3 didesain dengan dimensi profil kolom 350 x 450 mm dan dimensi balok 250 x 400 mm. Spesimen CL-3 menggunakan tulangan baja diameter 16 mm sebagai tulangan longitudinal balok dan kolom, sedangkan senggang menggunakan tulangan baja dengan diameter 8 mm. Area

joint diberi *joint hoops* dengan diameter tulangan 12 mm sebanyak 6 set. Rasio tulangan longitudinal balok dan kolom sebesar 0,024% dan 0,01%. Rasio tulangan sengkang balok dan kolom sebesar 0,670% dan 0,287%. Tinggi kolom spesimen CL-3 yaitu 1560 mm dan panjang bentang balok 1202,5 mm. Secara lebih detail dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Detail spesimen CL-3 eksperimental Yang et al (Yang et al. 2018)

Hasil pengujian kuat tekan beton spesimen CL-3 sebesar 34.3 MPa, kuat tarik baja tulangan diameter 16 mm sebesar 444 MPa dan kuat tarik baja tulangan diameter 8 mm dan 12 mm sebesar 464 MPa. Data mutu beton dan kuat tarik baja tulangan dapat dilihat pada tabel 3.6.

Tabel 3.2 Properti material specimen CL-3

Property	Value
Beton	$f_c' = 34,3 \text{ MPa}$
Tulangan D16	$f_y = 444 \text{ MPa}$ $f_u = 666 \text{ MPa}$
Tulangan D8 & D12	$f_y = 464 \text{ MPa}$ $f_u = 696 \text{ MPa}$

Sumber: Yang et al. 2018

3.4 Validasi Hasil

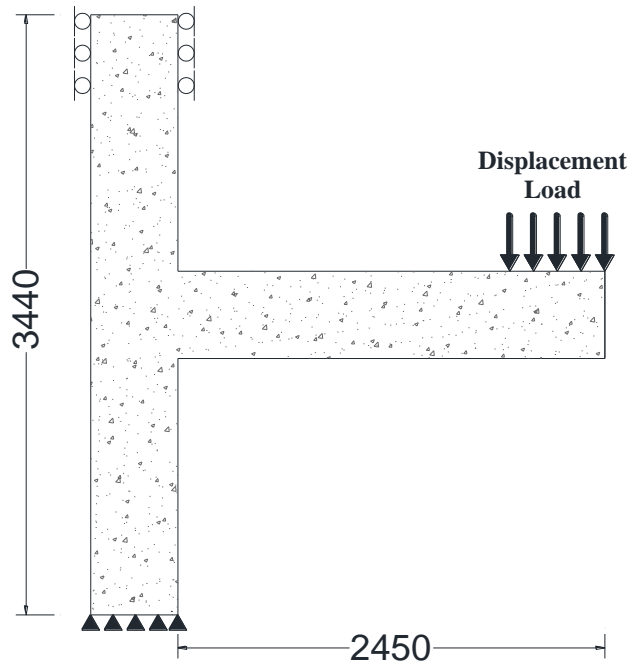
Setelah mendesain spesimen eksperimental dengan program bantu vector2 langkah selanjutnya yaitu *me-running* program tersebut.. *Output* program vector2 tersebut divalidasi dengan hasil eksperimental. Apabila hasilnya *output* program vector2 sudah menyerupai hasil eksperimental maka format pemodelan ini akan digunakan untuk memodelkan spesimen peneliti. Namun apabila belum memperoleh *output* yang menyerupai hasil eksperimen maka dilakukan redesain dan *me-running* ulang dengan program bantu vector2 sampai memperoleh hasil yang menyerupai hasil eksperimental. Validasi hasil ini dilakukan sebagai kontrol untuk memodelkan spesimen hubungan balok-kolom interior peneliti.

Spesimen eksperimental hubungan balok-kolom eksterior Chun dan Kim dan spesimen eksperimental hubungan balok-kolom interior Yang et al yang telah dimodelkan dengan program vector2 kemudian di-*running* untuk melihat perbandingan hasil *output* berupa kurva *force vs drift* dan pola retak.

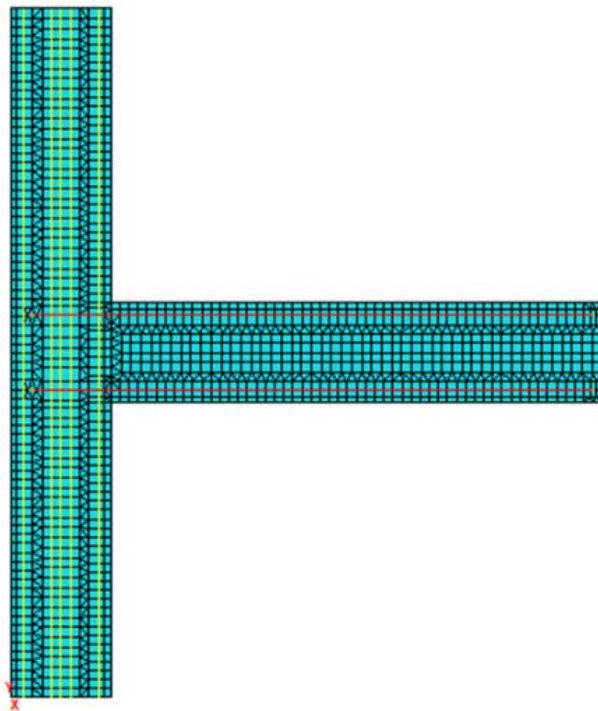
3.4.1 Eksperimental Chun dan Kim (2004)

Spesimen JM-1 didesain dengan 2 tipe perletakan yaitu perletakan sendi dan rol. Perletakan sendi ditempatkan pada ujung bawah kolom dan perletakan rol pada ujung atas kolom dengan mengunci pergerakan arah sumbu x seperti gambar 3.4.

Spesimen JM-1 menerapkan metode pembebanan pada ujung balok. Pembebanan yang diterapkan adalah beban *displacement*. Metode pembebanan dapat dilihat pada gambar 3.4. Gambar 3.5 merupakan gambar pemodelan JM-1 dengan menggunakan program vector2. Garis-garis halus berwarna kuning dan merah merupakan tulangan longitudinal kolom dan balok. Terlihat pula garis-garis yang membentuk kotak-kotak kecil dan segitiga pada gambar spesimen. Hal tersebut menunjukkan bahwa tipe *meshing* yang digunakan ada 2 yaitu *rectangles* dan *triangles*.



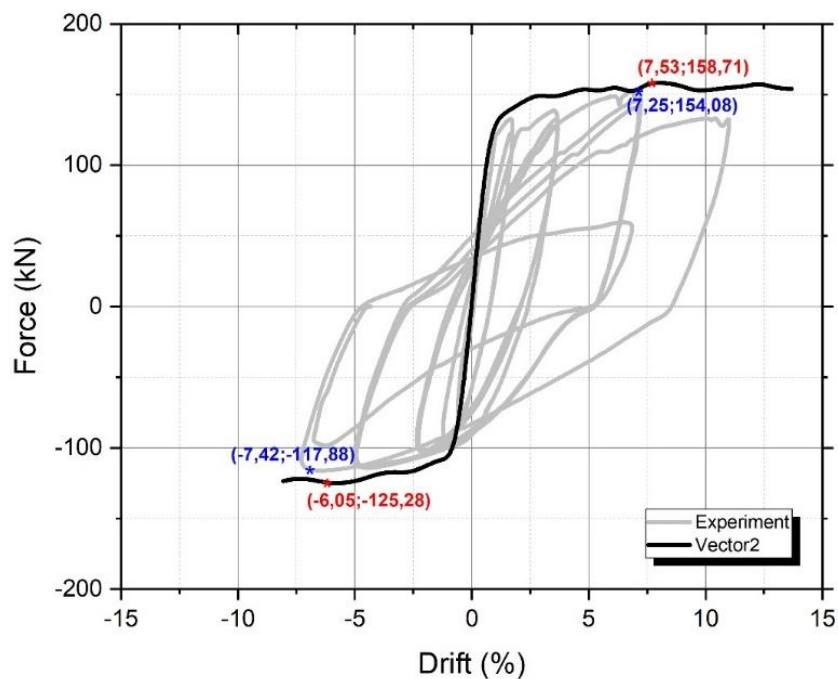
Gambar 3. 4 Metode perletakan dan pembebanan spesimen JM-1



Gambar 3. 5 Desain spesimen JM-1 dengan program bantu vector2

Setelah melakukan pemodelan spesimen JM-1 dengan program bantu vector2, peneliti me-*running* program vector2. Hasil *running* menampilkan *output* berupa kurva *force vs drift*, pola retak, lebar retak dan tegangan pada tulangan longitudinal. Hasil yang akan dibandingkan antara eksperimental dan *output* vector2 adalah kurva *force vs drift* dan pola retak.

Hasil eksperimental Chun dan Kim (S. Chun and Kim 2004) menunjukan bahwa nilai *force* sebesar 154.08 MPa dengan nilai *drift* sebesar 7.25% ketika spesimen JM-1 mencapai beban maksimum. Sedangkan hasil vector2 menunjukan bahwa ketika spesimen mencapai beban maksimum menunjukan bahwa nilai *force* mencapai 158.71 MPa dengan *drift* sebesar 7.53%. Kurva *force vs drift* hasil eksperimental dan *output* vector2 dapat dilihat pada gambar 3.6. Hasil eksperimental dan *output* vector2 kemudian divalidasi berdasarkan data *force* dan *drift* ketika spesimen JM-1 mencapai beban maksimum. Hasil validasi dapat dilihat pada table 3.3. Tabel 3.3 menunjukan bahwa perbandingan nilai *force* antara hasil eksperimental dan *output* vector2 sebesar 0.971 dan nilai *drift* sebesar 0.963.



Gambar 3. 6 Kurva *force vs drift* hasil eksperimental dan *output* vector2

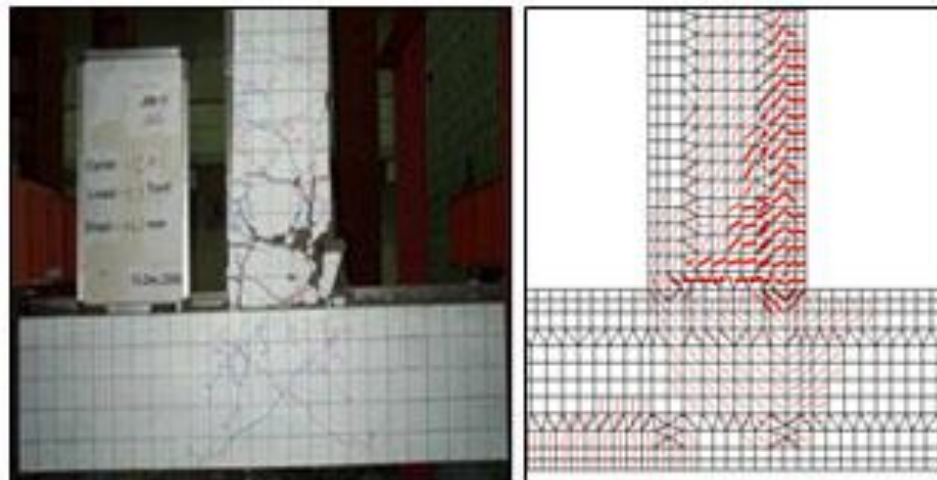
Tabel 3. 3 Validasi hasil eksperimental dan output vector2 spesimen JM-1

	EKSP	V2	EKSP/V2
Force (kN)	154,08	158,71	0,971
Drift (%)	7,25	7,53	0,963

Eksp: Eksperimental ; V2: Vector2

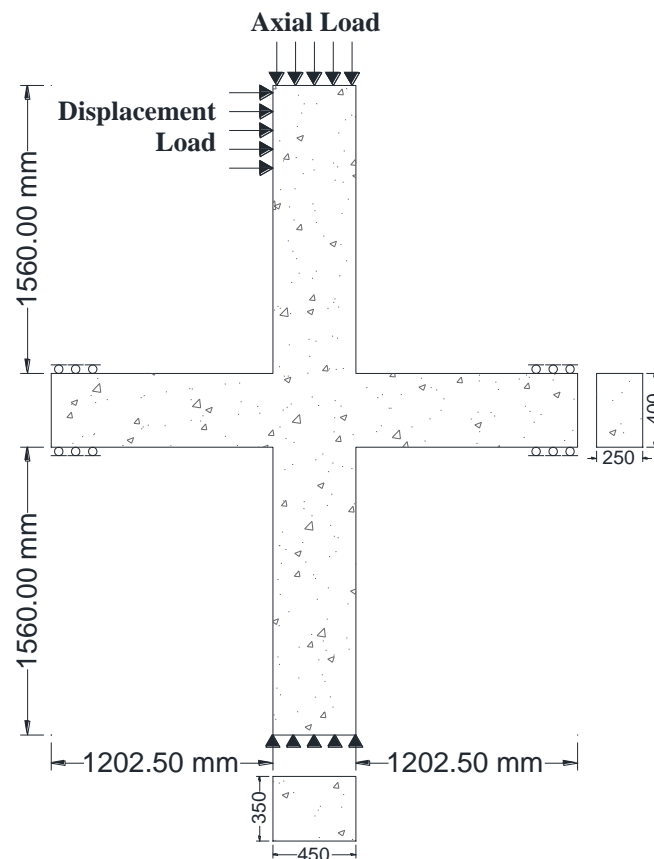
Gambar 3.6 menunjukkan bahwa kurva *force vs drift* hasil eksperimental berada di bawah kurva *force vs drift output* vector2. Walaupun demikian hasil validasi yang ditampilkan pada table 3.3 menunjukkan bahwa nilai *force* dan *drift* hasil eksperimental dan *output* vector2 berdekatan.

Pola retak dan penyebaran retakan pada spesimen hasil eksperimental dan *output* vector2 menunjukkan kemiripan. Hal ini dapat diamati pada gambar 3.7. Spesimen JM-1 hasil eksperimental menunjukkan retak besar terjadi pada balok bahkan terjadi *cover spalling* pada bolok. Pada daerah join spesimen JM-1 hasil eksperimental menunjukkan retak halus diagonal. Pola retak spesimen JM-1 *output* vector2 menunjukkan pola retak yang serupa. Retak besar *output* vector2 ditunjukan dengan garis tebal sedangkan retak halus ditunjukan dengan garis halus. Bagian kolom spesimen JM-1 *output* vector2 mengalami retak halus dan bagian join terlihat retak halus diagonal.



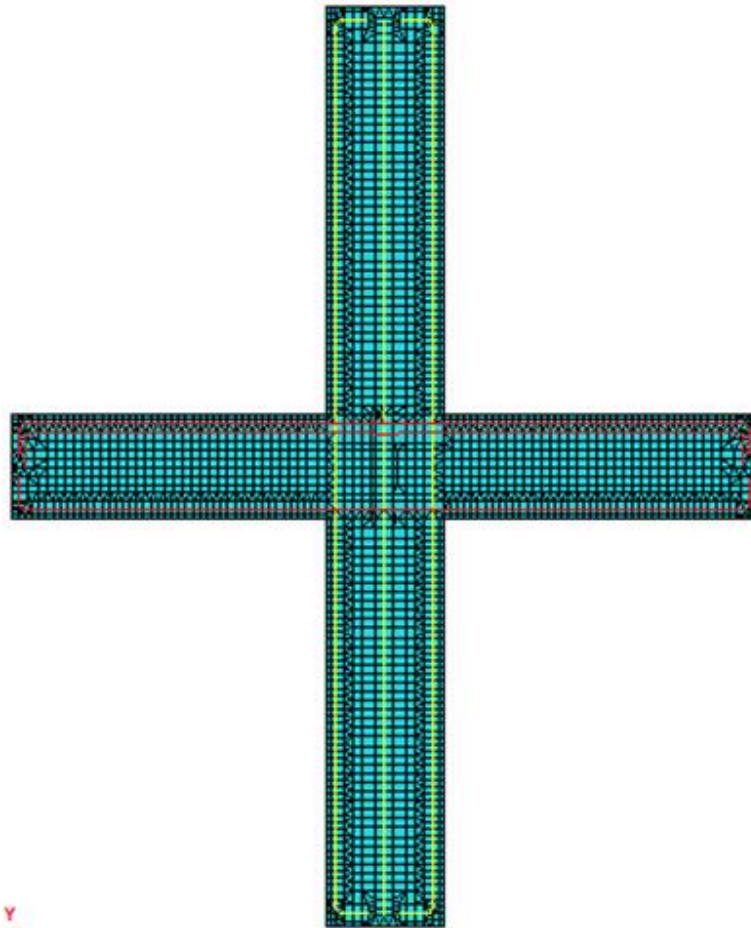
Gambar 3. 7 Pola retak hasil eksperimental (kiri) dan output vector2 (kanan)

3.4.2 Eksperimental Yang et al (2018)



Gambar 3. 8 Metode pembebanan dan perletakan spesimen CL-3 eksperimental Yang et al (Yang et al. 2018)

Gambar 3.8 merupakan gambar metode pembebanan dan tipe perletakan spesimen CL-3. Spesimen CL-3 didesain dengan metode pembebanan pada ujung kolom dengan melibatkan 2 tipe pembebanan yaitu beban *displacement* dan beban aksial. Beban aksial yang diberikan pada ujung balok bagian atas sebesar 13,5 kN ($0,25A_gf'_c$). Selain itu spesimen CL-3 didesain 2 tipe perletakan yaitu sendi dan rol. Perletakan sendi ditempatkan pada ujung bawah kolom dan perletakan rol pada kedua ujung balok dengan mengunci pergerakan searah sumbu y.

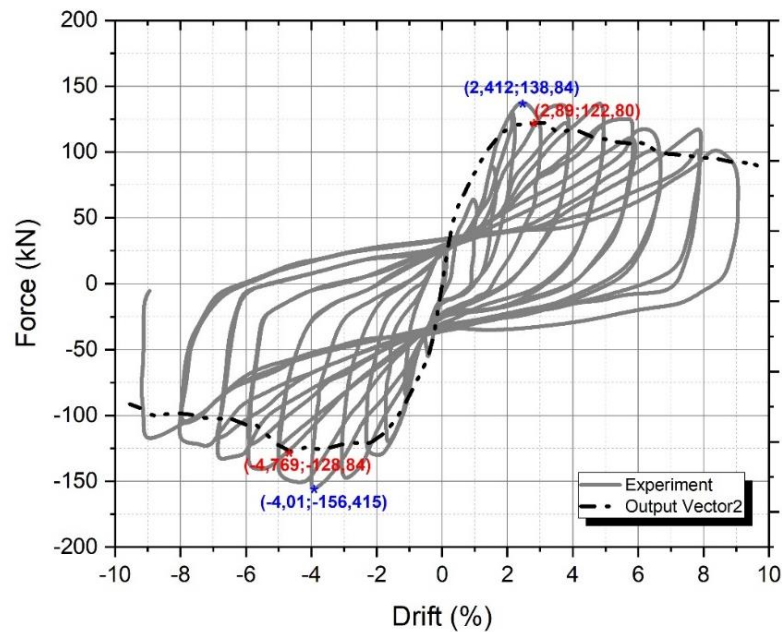


Gambar 3. 9 Desain spesimen CL-3 dengan program bantu vector2

Desain spesimen CL-3 yang dimodelkan dengan menggunakan program bantu vector2 dapat dilihat pada gambar 3.9. Garis vertikal berwarna kuning dan garis horisontal berwarna merah pada gambar 3.9 merupakan tulangan longitudinal kolom dan balok. Tipe *mashing* yang digunakan dalam pemodelan dengan program bantu vector2 yaitu *rectangles* dan *triangles*.

Setelah melakukan pemodelan spesimen CL-3 dengan program bantu vector2 maka peneliti me-*running* program vector2. Hasil *running* menampilkan *output* berupa kurva *force vs drift*, pola retak, lebar retak dan tegangan pada tulangan longitudinal. Hasil yang akan dibandingkan antara eksperimental dan *output* vector2 adalah kurva *force vs drift* dan pola retak.

Output vector2 berupa grafik *force vs drift* yang dapat dilihat pada gambar 3.10 menunjukkan bahwa kurva *force vs drift* hasil experimental berada di atas kurva *force vs drift output vector2*. Kurva *force vs drift* hasil eksperimental menunjukkan bahwa beban maksimum dari spesimen CL-3 sebesar 156.415 MPa dengan nilai *drift* sebesar 4,01%, sedangkan kurva *force vs drift output vector2* menunjukkan bahwa beban maksimum sebesar 128.84 MPa dengan nilai *drift* sebesar 4,769%. Data beban maksimum dan *drift* serta validasi hasil eksperimental dengan *output vector2* dapat dilihat pada table 3.4.



Gambar 3. 10 Kurva *force vs drift* hasil eksperimental dan *output vector2* spesimen CL-3

Tabel 3.4 Validasi hasil eksperimental dan *output vector2* spesimen CL-3

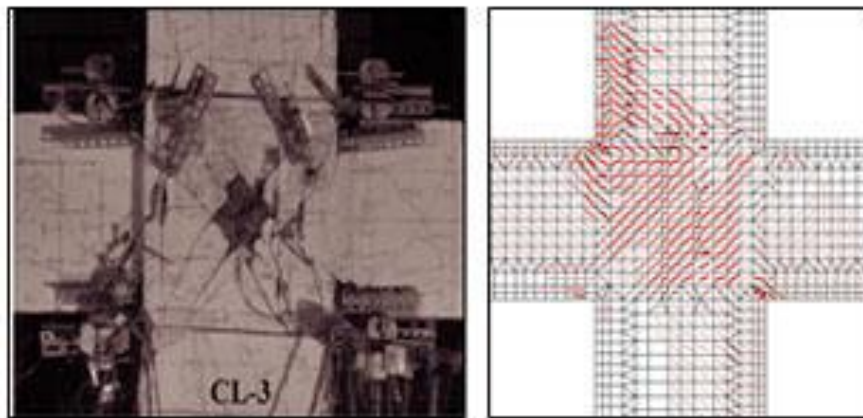
	EKSP	V2	EKSP/V2
Force (kN)	156,415	128,84	1,214
Drift (%)	4,01	4,769	1,189

Eksp: Eksperimental ; V2: Vector2

Hasil validasi yang ditampilkan pada table 3.4 antara eksperimental dan *output vector2* sebesar 1,214 untuk *force* dan 1,189 untuk *drift*. Perbandingan nilai beban

maksimum dan *drift* antara hasil eksperimental dan *output* vector2 terlihat cukup jauh. Walaupun demikian kurva *force vs drift output* vector2 menunjukkan adanya kemiripan dengan kurva *force vs drift* hasil eksperimental. Hal ini terjadi karena dalam pemodelan slip terjadi lebih awal.

Pola retak spesimen CL-3 hasil eksperimental dan *output* vector2 dapat dilihat pada gambar 3.11. Pola retak diagonal pada bagian join yang lebar pada spesimen CL-3 terlihat menyerupai antara hasil eksperimental dan *output* vector2. Pola retak lebar pada *output* vector2 ditandai dengan garis tebal dan rebar retak yang kecil/tipis ditandai dengan garis tipis. Pada area balok, spesimen CL-3 hasil eksperimental maupun *output* vector2 sama-sama terlihat retak halus. Tampak ada perbedaan pola retak pada bagian kolom, dimana hasil eksperimental hanya terjadi retak halus sedangkan *output* vector2 menunjukkan retak yang lebar. Walaupun demikian, pola retak antara hasil eksperimental dan *output* vector2 terlihat mirip.

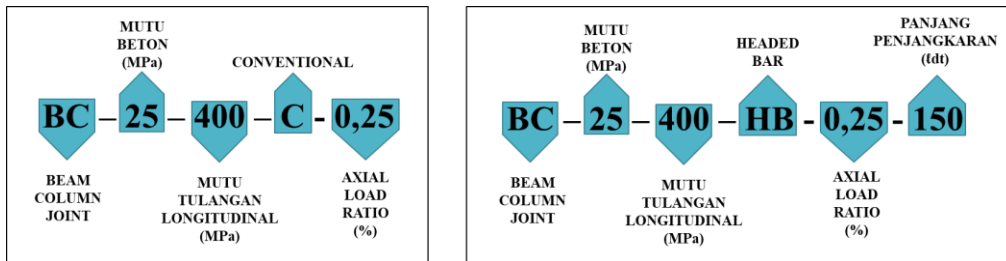


Gambar 3. 11 Pola retak hasil eksperimental (kiri) dan pola retak *output* vector2 (kanan)

3.5 Spesimen Hubungan Balok-Kolom Interior

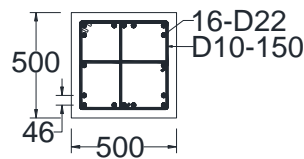
Spesimen yang dilibatkan dalam penelitian ini sebanyak 32 spesimen yang dibagi dalam 8 grup dengan masing-masing grup berisi 4 spesimen. Yang membedakan dari 4 spesimen dari setiap grup yaitu penjangkaran tulangan longitudinal. Tipe penulangan longitudinal yang digunakan yaitu konvensional, menggunakan *headed*

bar dengan jarak ℓ_{dh} 150 mm, $8d_b$ dan $\left(\frac{0.2f_y\Psi_e}{\sqrt{f'_c}}\right) d_b$. Selain itu mutu beton, mutu baja tulangan, jumlah tulangan longitudinal balok juga menjadi pembeda antara grup yang satu dengan yang lainnya. Untuk membedakan spesimen satu dengan spesimen lainnya maka spesimen diberi penamaan seperti pada gambar 3.12.

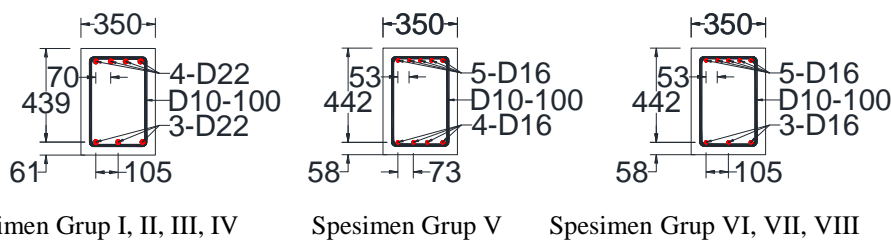


Gambar 3. 12 Penamaan Spesimen Konvensional (kiri) dan Spesimen Headed Bar (kanan)

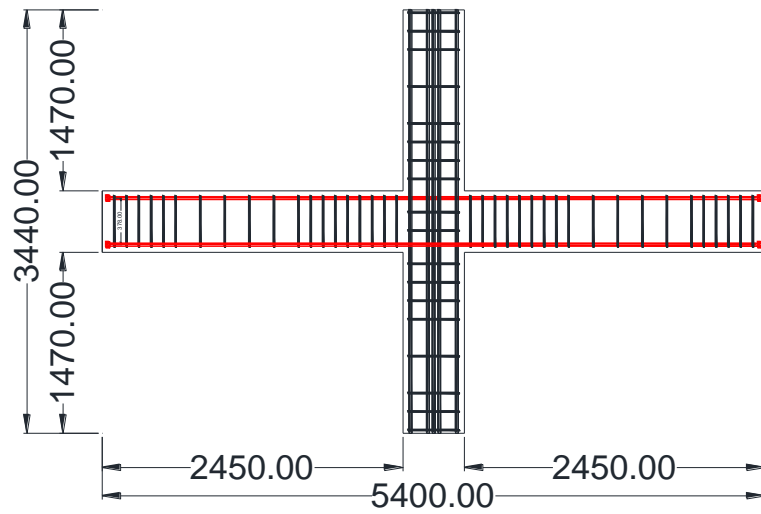
Spesimen-spesimen didesain dengan dimensi profil balok dan kolom sama yang dapat dilihat pada gambar 3.13 dan 3.14. Dimensi profil kolom yaitu 500 x 500 mm dan balok 350 x 500 mm. Tinggi kolom dan panjang balok pun sama untuk semua spesimen. Tinggi kolom 1470 mm dan panjang balok 2450 mm. Penulangan kolom untuk semua spesimen sama sedangkan penulangan balok berbeda untuk beberapa spesimen. Detail spesimen-spesimen pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.13 sampai gambar 3.22 dan table 3.5 sampai tabel 3.7.



Gambar 3. 13 Dimensi Kolom

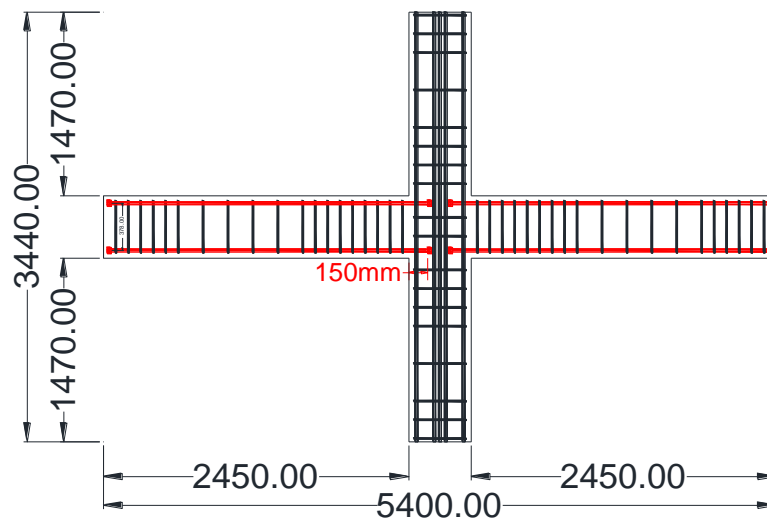


Gambar 3. 14 Dimensi Balok

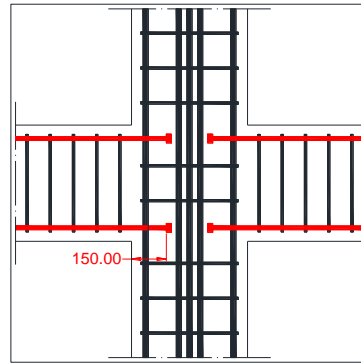


Gambar 3. 15 Detail Penulangan Hubungan Balok-Kolom Interior Konvensional

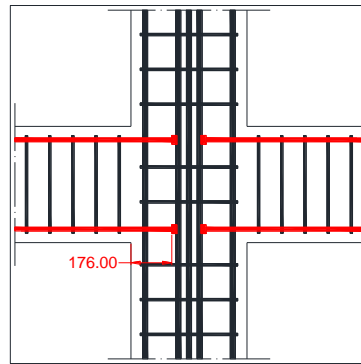
Gambar 3.15 merupakan gambar detail hubungan balok-kolom interior dengan penulangan konvensional. Penulangan konvensional yang dimaksudkan adalah penulangan menerus. Sedangkan gambar 3.16 merupakan gambar detail hubungan balok-kolom interior dengan ujung tulangan longitudinal balok pada daerah *joint* menggunakan *headed bar*. Pada gambar ini terlihat tulangan longitudinal balok terputus pada bagian tengah dengan jarak tertentu sesuai peraturan SNI.



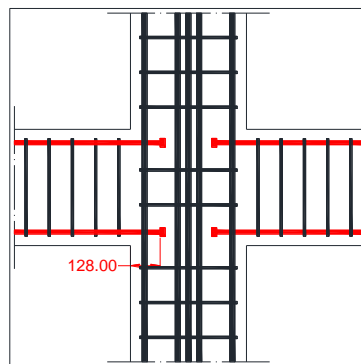
Gambar 3. 16 Detail Penulangan Hubungan Balok-Kolom Interior Menggunakan Headed Bar



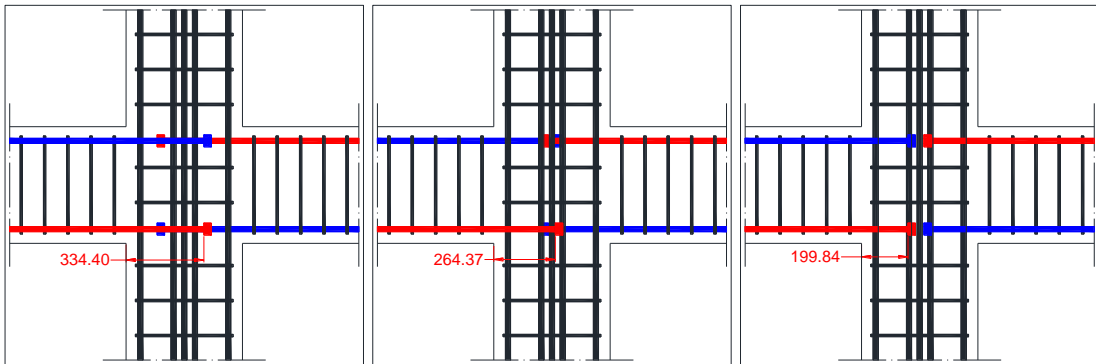
Gambar 3. 17 Detail Spesimen BC-25-400-HB-0,25-150; BC-40-400-HB-0,25-150; BC-70-400-HB-0,25-150; BC-100-400-HB-0,25-150; BC-25-625-HB-0,25-150; BC-40-625-HB-0,25-150; BC-70-625-HB-0,25-150 dan BC-25-625-HB-0,25-150



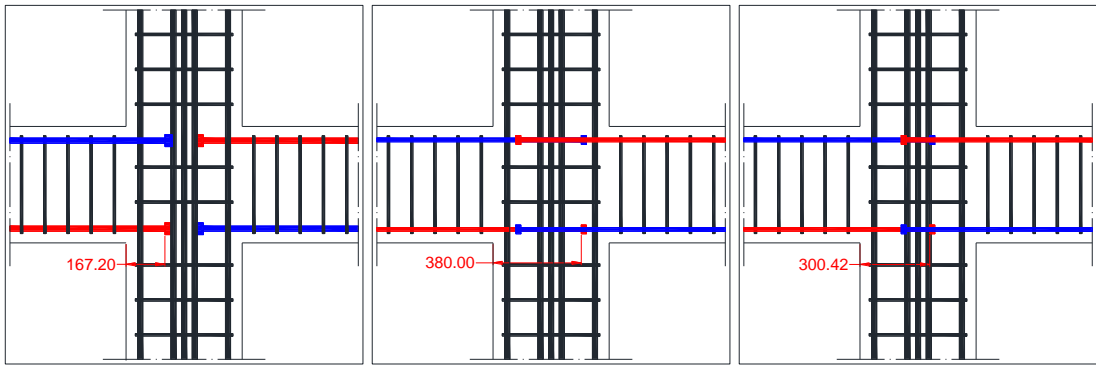
Gambar 3. 18 Detail Spesimen BC-25-400-HB-0,25-176; BC-40-400-HB-0,25-176; BC-70-400-HB-0,25-176 dan BC-100-400-HB-0,25-176



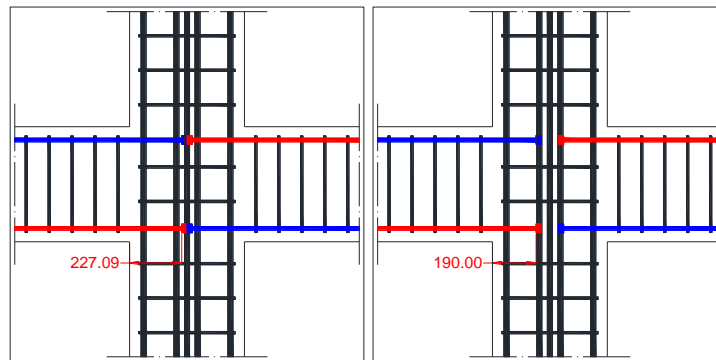
Gambar 3. 19 Detail Spesimen BC-25-625-HB-0,25-128; BC-40-625-HB-0,25-128; BC-70-625-HB-0,25-128 dan BC-25-625-HB-0,25-128



Gambar 3. 20 Detail Spesimen BC-25-400-HB-0,25-334,4; BC-40-400-HB-0,25-264,37; dan BC-70-400-HB-0,25-199,84 (dari kiri ke kanan)



Gambar 3. 21 Detail Spesimen BC-100-400-HB-0,25-167,2; BC-25-625-HB-0,25-380; dan BC-40-625-HB-0,25-300,42 (dari kiri ke kanan)



Gambar 3. 22 Detail Spesimen BC-70-625-HB-0,25-227,09 dan BC-100-625-HB-0,25-190 (dari kiri ke kanan)

Gambar 3.17 sampai gambar 3.22 merupakan gambar detail panjang penjangkaran spesimen-spesimen penelitian hubungan balok-kolom interior dengan ujung tulangan longitudinal balok bagian *joint* menggunakan *headed bar*.

Tabel 3. 5 Data geometri dan property beton balok

Nama Grup	Nama Spesimen	Desain Mode Kegagalan	fc' MPa	Dimensi Balok Beton		
				b	h	Ag
				mm	mm	mm ²
Grup-1	BC - 25 - 400 - C - 0,25	Gagal Lentur	25	350	500	175000
	BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 150					
	BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 176					
	BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 334,40					
Grup-2	BC - 40 - 400 - C - 0,25	Gagal Lentur	40	350	500	175000
	BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 150					
	BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 176					
	BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 264,37					
Grup-3	BC - 70 - 400 - C - 0,25	Gagal Lentur	70	350	500	175000
	BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 150					
	BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 176					
	BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 199,84					
Grup-4	BC - 100 - 400 - C - 0,25	Gagal Lentur	100	350	500	175000
	BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 150					
	BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 176					
	BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 167,20					
Grup-5	BC - 25 - 625 - C - 0,25	Gagal Lentur	25	350	500	175000
	BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 150					
	BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 128					
	BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 380,00					
Grup-6	BC - 40 - 625 - C - 0,25	Gagal Lentur	40	350	500	175000
	BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 150					
	BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 128					
	BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 300,42					
Grup-7	BC - 70 - 625 - C - 0,25	Gagal Lentur	70	350	500	175000
	BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 150					
	BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 128					
	BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 227,09					
Grup-8	BC - 100 - 625 - C - 0,25	Gagal Lentur	100	350	500	175000
	BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 150					
	BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 128					
	BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 190,00					

Data-data *geometry* dan *property* beton balok dapat dilihat pada table 3.5. Tabel tersebut menampilkan mutu beton dan dimensi balok setiap spesimen. Semua spesimen

memiliki profil balok yang sama yaitu 300 x 500 mm. Mutu beton spesimen-spesimen grup-1 dan grup-5 sebesar 25 MPa, grup-2 dan grup-6 sebesar 40 MPa, grup-3 dan grup-7 sebesar 70 MPa serta grup-4 dan grup-8 sebesar 100 MPa.

Tabel 3. 6 Data geometri dan property tulangan longitudinal balok

Nama Grup	Nama Spesimen	fy MPa	Tulangan Longitudinal Balok				Tipe Penulangan Balok
			Posisi	Dia mm	n	As (mm ²)	
						Jumlah	Total
Grup-1	BC - 25 - 400 - C - 0,25	400	Atas	22	4	1519,76	Konvensional
	HB-ℓ _{dh} = 150 mm						
	BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 150		Bawah	22	3	1139,82	HB-ℓ _{dh} = 8 _{db} = 176 mm
	BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 176						HB-ℓ _{dh} = $(\frac{0,19 f_y \Psi_e}{f_c^{0,5}})d_b = 334$ mm
BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 334						2659,58	
Grup-2	BC - 40 - 400 - C - 0,25	400	Atas	22	4	1519,76	Konvensional
	HB-ℓ _{dh} = 150 mm						
	BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 150		Bawah	22	3	1139,82	HB-ℓ _{dh} = 8 _{db} = 176 mm
	BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 176						HB-ℓ _{dh} = $(\frac{0,19 f_y \Psi_e}{f_c^{0,5}})d_b = 264$ mm
BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 264						2659,58	
Grup-3	BC - 70 - 400 - C - 0,25	400	Atas	22	4	1519,76	Konvensional
	HB-ℓ _{dh} = 150 mm						
	BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 150		Bawah	22	3	1139,82	HB-ℓ _{dh} = 8 _{db} = 176 mm
	BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 176						HB-ℓ _{dh} = $(\frac{0,19 f_y \Psi_e}{f_c^{0,5}})d_b = 199,84$ mm
BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 200						2659,58	
Grup-4	BC - 100 - 400 - C - 0,25	400	Atas	22	4	1519,76	Konvensional
	HB-ℓ _{dh} = 150 mm						
	BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 150		Bawah	22	3	1139,82	HB-ℓ _{dh} = 8 _{db} = 176 mm
	BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 176						HB-ℓ _{dh} = $(\frac{0,19 f_y \Psi_e}{f_c^{0,5}})d_b = 167$ mm
BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 167						2659,58	
Grup-5	BC - 25 - 625 - C - 0,25	625	Atas	16	5	1004,80	Konvensional
	HB-ℓ _{dh} = 150 mm						
	BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 150		Bawah	16	3	602,88	HB-ℓ _{dh} = 8 _{db} = 128 mm
	BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 128						HB-ℓ _{dh} = $(\frac{0,19 f_y \Psi_e}{f_c^{0,5}})d_b = 380$ mm
BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 380						1607,68	
Grup-6	BC - 40 - 625 - C - 0,25	625	Atas	16	5	1004,80	Konvensional
	HB-ℓ _{dh} = 150 mm						
	BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 150		Bawah	16	4	803,84	HB-ℓ _{dh} = 8 _{db} = 128 mm
	BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 128						HB-ℓ _{dh} = $(\frac{0,19 f_y \Psi_e}{f_c^{0,5}})d_b = 300$ mm
BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 300						1808,64	
Grup-7	BC - 70 - 625 - C - 0,25	625	Atas	16	5	1004,80	Konvensional
	HB-ℓ _{dh} = 150 mm						
	BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 150		Bawah	16	4	803,84	HB-ℓ _{dh} = 8 _{db} = 128 mm
	BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 128						HB-ℓ _{dh} = $(\frac{0,19 f_y \Psi_e}{f_c^{0,5}})d_b = 227$ mm
BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 227						1808,64	
Grup-8	BC - 100 - 625 - C - 0,25	625	Atas	16	5	1004,80	Konvensional
	HB-ℓ _{dh} = 150 mm						
	BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 150		Bawah	16	4	803,84	HB-ℓ _{dh} = 8 _{db} = 128 mm
	BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 128						HB-ℓ _{dh} = $(\frac{0,19 f_y \Psi_e}{f_c^{0,5}})d_b = 190$ mm
BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 190						1808,64	

Keterangan: HB=Headed Bar; ℓ_{dh}=panjang penjangkaran

Data-data *geometry* dan *property* tulangan balok dapat dilihat pada tabel 3.6. Tabel tersebut menunjukkan mutu tulangan, diameter, jumlah dan tipe penulangan longitudinal balok setiap spesimen. Spesimen-spesimen grup-1, grup-2, grup-3, grup-4 didesain dengan mutu tulangan sebesar 400 MPa dan diameter tulangan longitudinal

22 mm serta jumlah tulangan longitudinal bagian atas dan bawah sebanyak 4 buah dan 3 buah. Spesimen-spesimen grup-5, grup-6, grup-7, grup-8 didesain mutu tulangan sebesar 625 MPa dan diameter tulangan longitudinal 16 mm. Tabel 3.6 juga menampilkan panjang penjangkaran yang berbeda setiap spesimen dengan detail setiap spesimen dapat dilihat pada gambar 3.17 sampai gambar 3.22.

Tabel 3. 7 Data geometri dan property kolom

Nama Grup	Nama Spesimen	fc' MPa	Dimensi Kolom Beton		fy MPa	Tulangan Longitudinal Kolom		
			b x h	Ag		Dia	n	As
			mm	mm ²		mm	bh	(mm ²)
Grup-1	BC - 25 - 400 - C - 0,25	25	500 x 500	250000	400	22	16	6079,04
	BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 150							
	BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 176							
	BC - 25 - 400 - HB - 0,25 - 334,40							
Grup-2	BC - 40 - 400 - C - 0,25	40	500 x 500	250000	400	22	16	6079,04
	BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 150							
	BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 176							
	BC - 40 - 400 - HB - 0,25 - 264,37							
Grup-3	BC - 70 - 400 - C - 0,25	70	500 x 500	250000	400	22	16	6079,04
	BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 150							
	BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 176							
	BC - 70 - 400 - HB - 0,25 - 199,84							
Grup-4	BC - 100 - 400 - C - 0,25	100	500 x 500	250000	400	22	16	6079,04
	BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 150							
	BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 176							
	BC - 100 - 400 - HB - 0,25 - 167,20							
Grup-5	BC - 25 - 625 - C - 0,25	25	500 x 500	250000	625	22	16	6079,04
	BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 150							
	BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 128							
	BC - 25 - 625 - HB - 0,25 - 380,00							
Grup-6	BC - 40 - 625 - C - 0,25	40	500 x 500	250000	625	22	16	6079,04
	BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 150							
	BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 128							
	BC - 40 - 625 - HB - 0,25 - 300,42							
Grup-7	BC - 70 - 625 - C - 0,25	70	500 x 500	250000	625	22	16	6079,04
	BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 150							
	BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 128							
	BC - 70 - 625 - HB - 0,25 - 227,09							
Grup-8	BC - 100 - 625 - C - 0,25	100	500 x 500	250000	625	22	16	6079,04
	BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 150							
	BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 128							
	BC - 100 - 625 - HB - 0,25 - 190,00							

Tabel 3,7 menampilkan data-data *geometry* dan *property* kolom setiap spesimen. Tabel tersebut menunjukkan bahwa semua spesimen didesain dengan profil kolom, diameter tulangan dan jumlah tulangan yang sama. Profil kolom didesain dengan ukuran 500 mm x 500 mm dengan diameter tulangan longitudinal sebesar 22 mm sebanyak 16 buah. Selain itu spesimen-spesimen grup-1, grup-2, grup-3 dan grup-4 didesain dengan mutu tulangan sebesar 400 MPa sedangkan spesimen-spesimen grup-5, grup-6, grup-7 dan grup-8 sebesar 625 MPa. Mutu beton kolom spesimen-spesimen grup-1 dan grup-5 sebesar 25 MPa, spesimen-spesimen grup-2 dan grup-6 sebesar 40 MPa, spesimen-spesimen grup-3 dan grup-7 sebesar 70 MPa serta spesimen-spesimen grup-4 dan grup-8 sebesar 100 MPa.

Spesimen hubungan balok-kolom interior ini direncanakan dengan mode kegagalan lentur dimana kegagalan boleh terjadi pada balok bukan pada *joint*. Perhitungan ini akan menjadi kontrol geser terhadap hasil *output* pemodelan spesimen hubungan balok-kolom interior dengan program vector2. Perhitungan rencana mode kegagalan pada balok ini ditampilkan dalam bentuk tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Perhitungan mode kegagalan pada balok

Nama Grup	Desain Mode Kegagalan	M_n (kN-m)		M_u (kN-m)	V_h (kN)	V_{x-x}	Aj ($b_{balok} \times b_{kolom}$) (mm^2)	ϕV_c $1 A_j \times \sqrt{f_c'}$
		As	$f_y (d - \frac{1}{2} a)$	$(\frac{M_{-pr1} + M_{-pr2}}{2})$	$(\frac{M_u}{h_{in}/2})$	$T_1 + T_2 - V_h$ (kN)		
Grup-1	Gagal	+	242,026	261,562	243,314	1086,476	250000	1250,000
	Lentur	-	186,178					
Grup-2	Gagal	+	251,343	272,935	253,893	1075,897	250000	1581,139
	Lentur	-	191,418					
Grup-3	Gagal	+	257,997	281,058	261,449	1068,341	250000	2091,650
	Lentur	-	195,162					
Grup-4	Gagal	+	260,659	284,307	264,472	1065,318	250000	2500,000
	Lentur	-	196,659					
Grup-5	Gagal	+	251,063	249,406	232,005	1023,995	250000	1250,000
	Lentur	-	157,001					
Grup-6	Gagal	+	261,005	291,042	270,736	1142,264	250000	1581,139
	Lentur	-	211,456					
Grup-7	Gagal	+	268,107	300,141	279,201	1133,799	250000	2091,650
	Lentur	-	216,001					
Grup-8	Gagal	+	270,948	303,780	282,586	1130,414	250000	2500,000
	Lentur	-	217,819					

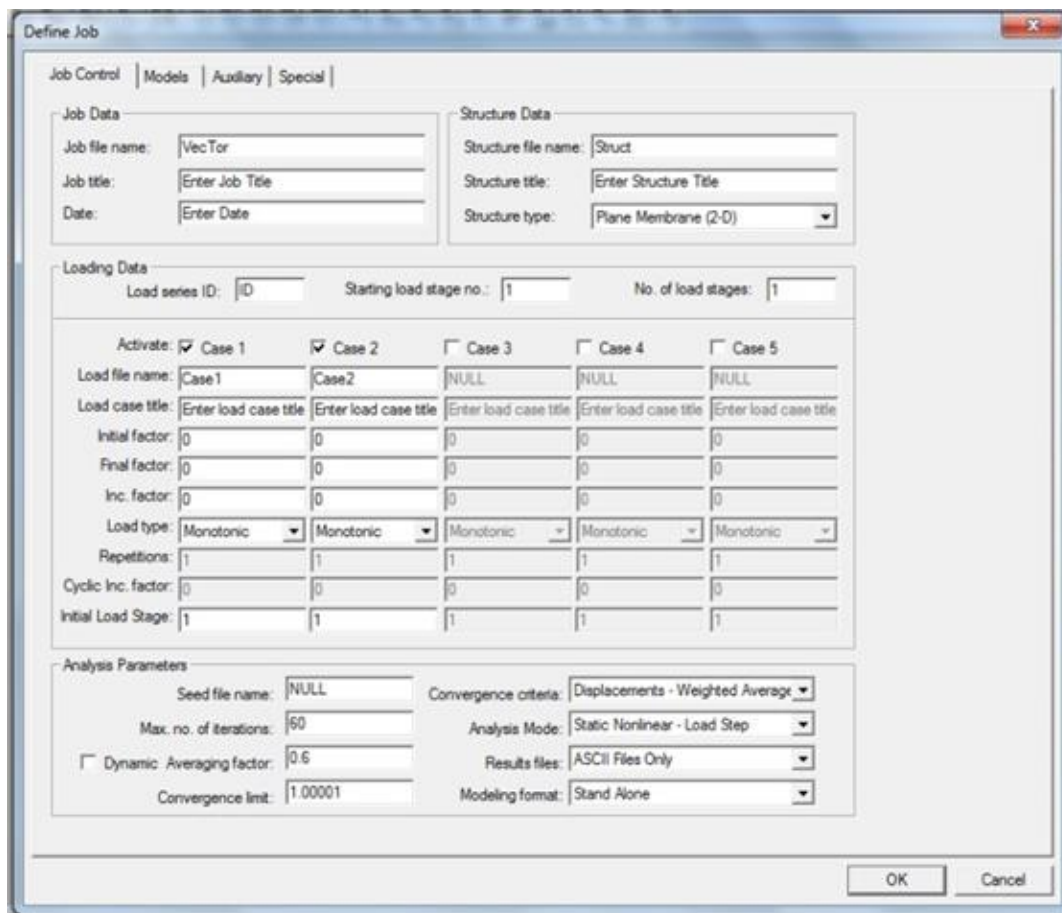
3.6 Pemodelan Hubungan Balok-Kolom Interior dengan Program Vector2

Data-data *geometry* dan *property* hubungan balok-kolom interior yang sudah didesain dan format pemodelan yang sudah divalidasi maka tahap selanjutnya yaitu memodelkan dengan menggunakan program vector2.

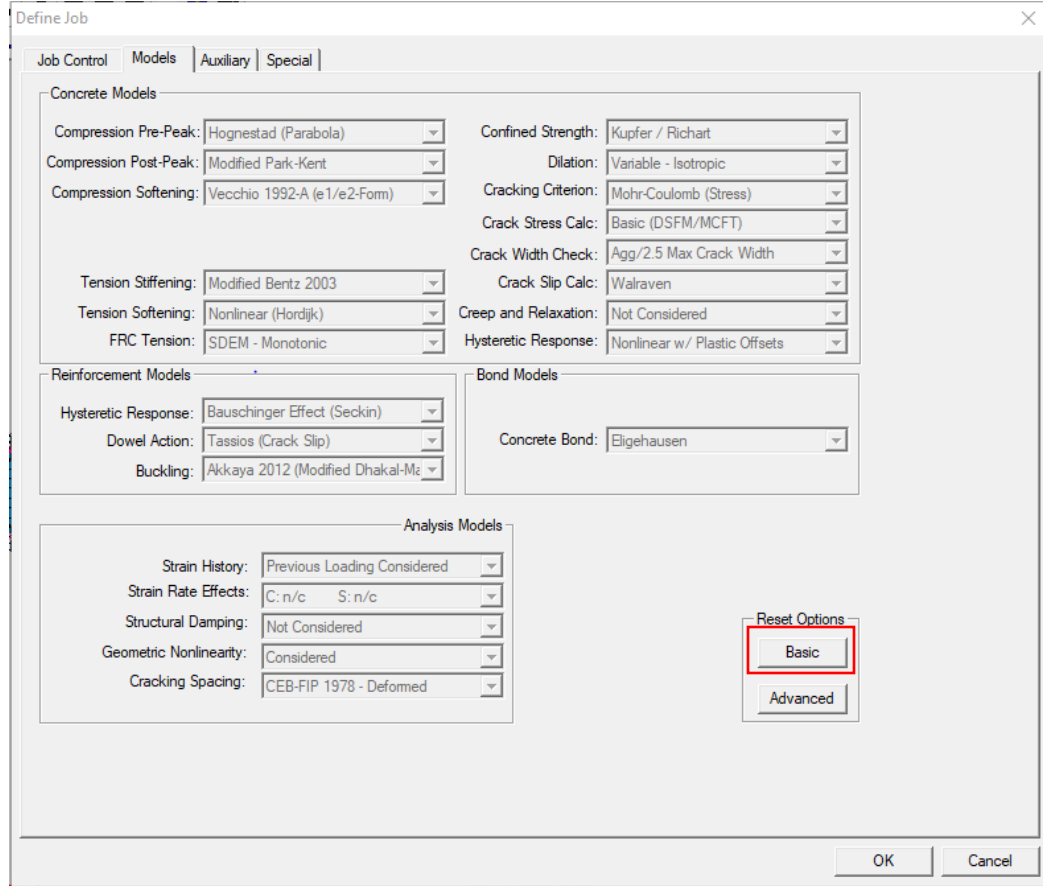
Langkah-langkah pemodelan menggunakan program vector2 sebagai berikut:

3.6.1 *The Job Data*

Tahap awal dalam mendesain dengan menggunakan program vector2 yaitu mengisi data-data pekerjaan sesuai dengan perencanaan dan model material dalam sebuah pemodelan. Data-data yang diisi sesuai dengan tampilan kotak dialog yang dapat dilihat pada gambar 3.23 dan 3.24.



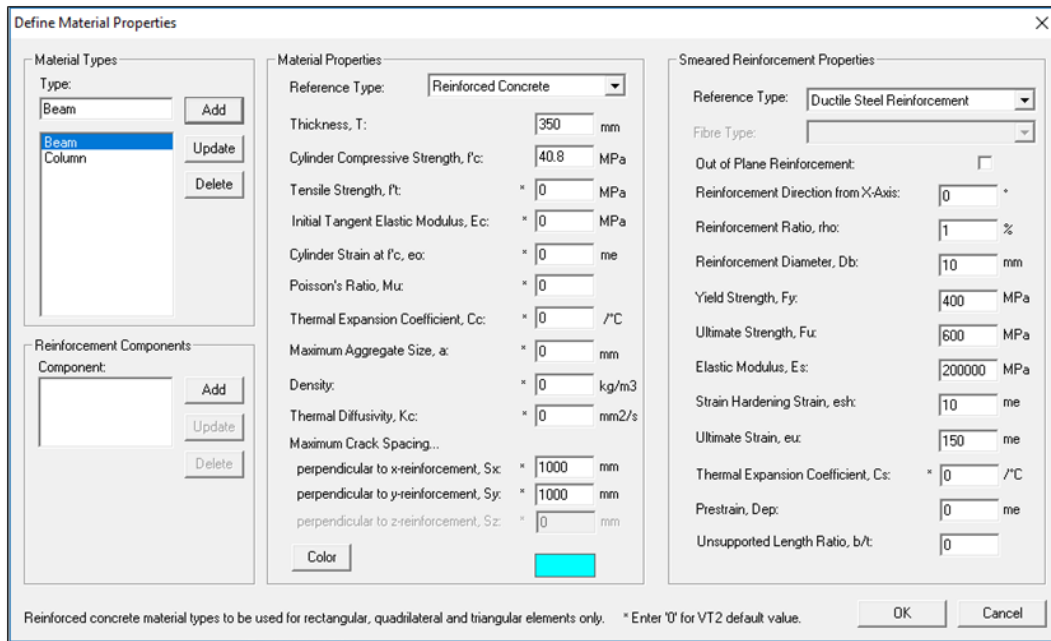
Gambar 3. 23 *The Job Control Page*



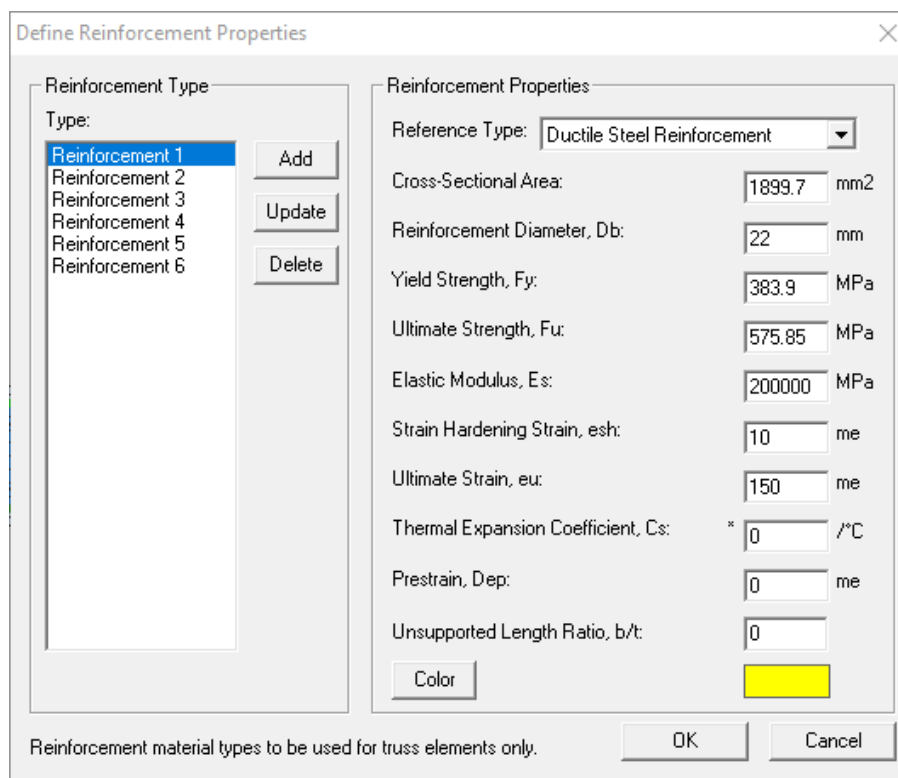
Gambar 3. 24 The Models Page

3.6.2 Data Struktur

Tahap ini peneliti akan mengimput data material beton dan tulangan. Data-data material beton dan tulangan diisi sesuai dengan data perencanaan. Input data material beton dan tulangan sesuai kotak dialog yang disediakan program vector2 seperti gambar 3.25 dan 3.26.



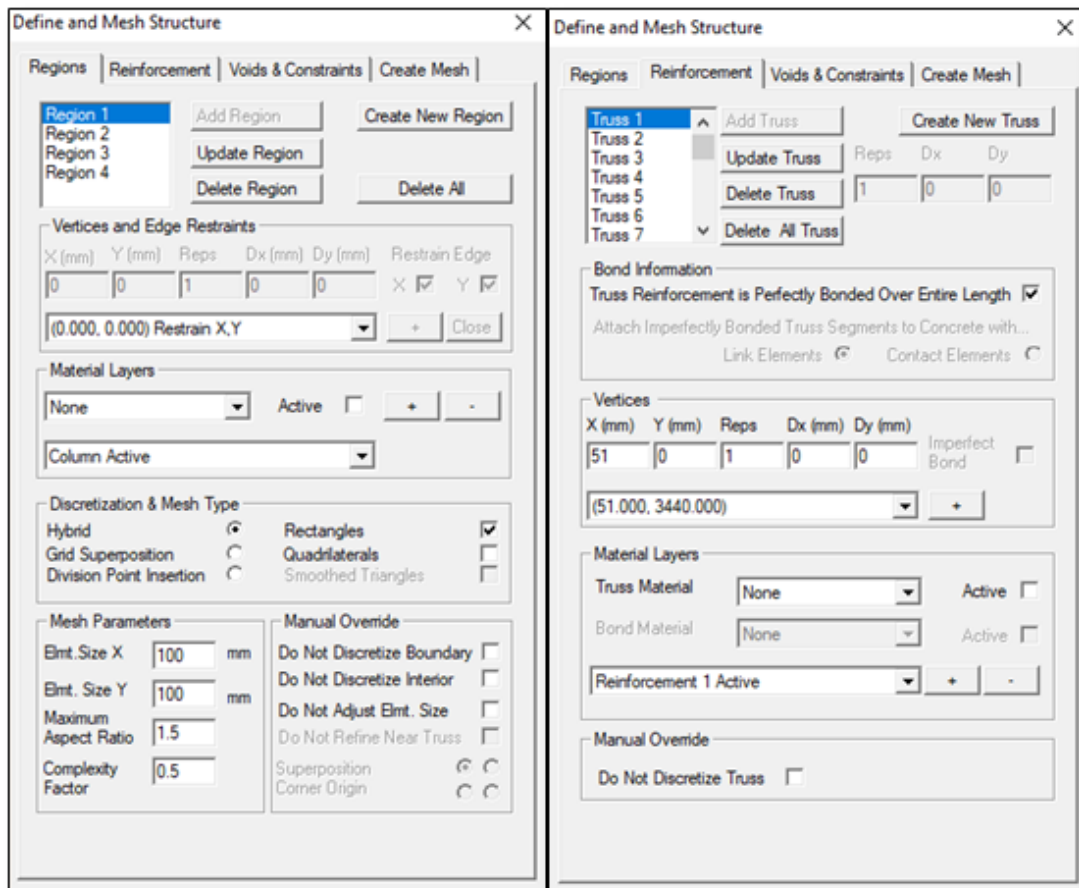
Gambar 3. 25 Define Reinforced Concrete Material Dialog Box



Gambar 3. 26 Define Reinforcement Material Dialog Box

3.6.3 Define and Mesh Structure

Pada tahap ini banyak hal yang dilakukan antara lain *defining node*, *defining element*, *assigning material type* *restraining the structure* dan *mesh structure*. *Defining node* merupakan sebuah tahapan dimana sebuah gambar didefinisikan dengan titik-titik yang menunjukkan koordinat gambar tersebut. *Defining element* merupakan pembentukan elemen dari titik-titik koordinat.



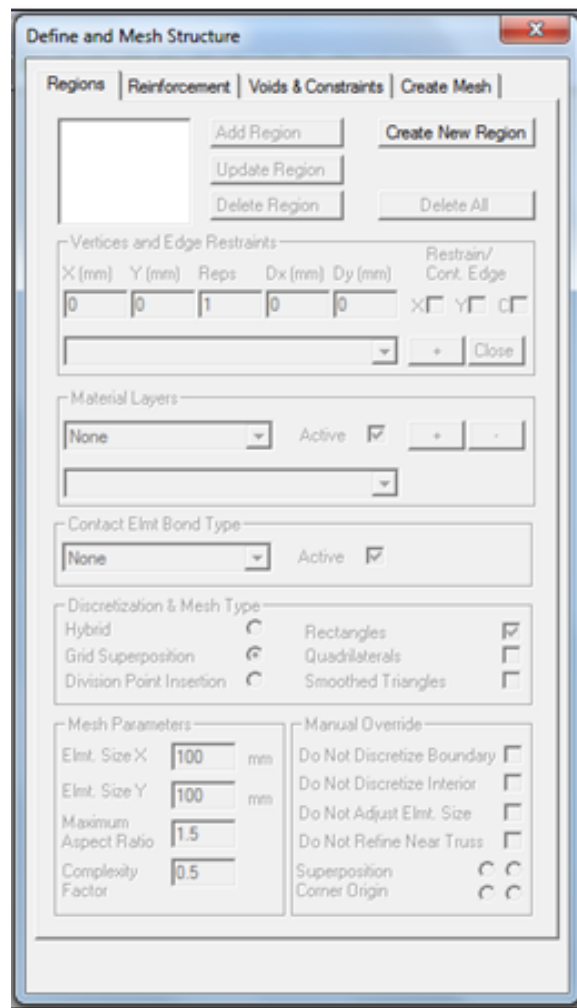
(a)

(b)

Gambar 3. 27 Defining Nodes Dialog Box

Elemen material beton dibentuk dalam sebuah atau beberapa bagian yang disebut region seperti yang terlihat pada gambar 3.27 (a) sedangkan elemen material baja tulangan dibentuk dalam satu bagian atau beberapa bagian yang ditampilkan dalam bentuk *truss* 1, 2 dan seterusnya sesuai gambar rencana seperti yang terlihat pada

gambar 3.27 (b). *Assigning material type* merupakan penetapan jenis material ke elemen yang sudah dibentuk. *Restraining the structure* merupakan tahapan mendesain perletakan sesuai dengan rencana. Kedua tahapan ini dapat dilihat pada gambar 3.27.

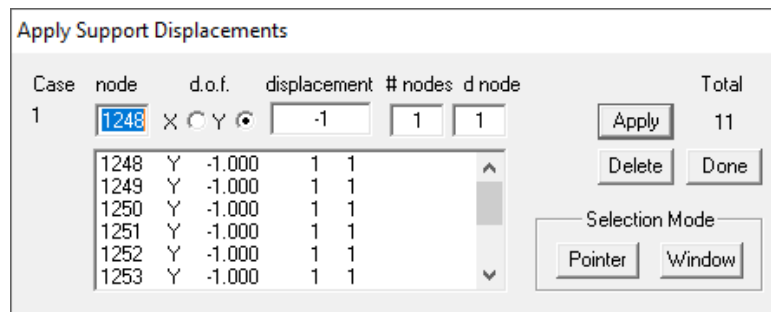


Gambar 3. 28 Mesh Structure Dialog Box

Meshing sructure merupakan tahapan dimana elemen di-*meshing* dengan ukuran sesuai dengan input pada kotak dialog pada gambar 3.27 (a). *Meshing* kemudian secara otomatis dijalankan dengan menggunakan kotak dialok *define and mesh structure* seperti gambar 3.28.

3.6.4 The Load Case Data

Setelah spesimen didesain sesuai dengan gambar rencana maka langkah selanjutnya spesimen diberikan beban sesuai dengan rencana. Sebagai contoh beban yang diberikan adalah *support displacement load* maka tampilan kotak dialoknya seperti gambar 3.29. Tipe pembebanan lain selain *support displacement load* yaitu *nodal load*, *gravity load*, *temperature loads*, *concrete prestrain*, *ingres pressures*, *nodal thermal loads*, *lumped masses*, *impulse forces* dan *ground acceleration loads*.



Gambar 3. 29 Apply Support Displacement Dialog Box

3.6.5 Running Vector

Langkah terakhir yang dilakukan dalam program vector yaitu *running*. Setelah *running* maka hasil dapat diperoleh apabila tidak ada kesalahan dalam mendesain spesimen. Apabila terjadi *error* maka harus dilakukan pengecekan desain dan input data spesimen hubungan balok-kolom interior. Sebaliknya apabila tidak terjadi *error* maka dilanjutkan dengan menganalisis hasil pemodelan.

3.7 Kesimpulan

Setelah melakukan analisa pemodelan hubungan balok-kolom interior konvensional dan hubungan balok-kolom interior yang menggunakan *headed bar* maka dapat dibuat kesimpulan perbandingan hubungan balok-kolom konvensional dan hubungan balok-kolom dengan menggunakan *headed bar*.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Pada bab ini akan disajikan data-data hasil pemodelan hubungan balok-kolom interior berupa kurva *force vs drift*, daktilitas dan gaya geser yang terjadi pada hubungan balok-kolom interior akibat beban aksial tekan dan beban *displacement* dengan menggunakan program bantu vector2. Hasil analisis vector2 setiap spesimen hubungan balok-kolom interior dengan ujung tulangan longitudinal balok menggunakan *headed bar* akan dibandingkan dengan spesimen hubungan balok-kolom interior dengan penulangan konvensional.

4.2 Detail Spesimen dan Properti Material

Penelitian ini awalnya melibatkan 8 grup spesimen dengan setiap grup terdiri dari 4 spesimen. Sebuah grup terdiri atas 1 spesimen hubungan balok-kolom dengan penulangan konvensional dan 3 spesimen hubungan balok-kolom interior dengan ujung tulangan longitudinal menggunakan *headed bar* dengan jarak ℓ_{dt} sesuai dengan syarat pada peraturan SNI 2847:2013. Namun untuk keperluan kontrol *output* pemodelan spesimen BC-70-400-HB-0,25-200 dan BC-70-400-HB-0,25-227 maka ditambahkan spesimen BC-25-400-HB-0,25-200, BC-40-400-HB-0,25-200, BC-25-625-HB-0,25-227, BC-40-625-HB-0,25-227 dan BC-100-625-HB-0,25-227.

Spesimen didesain dengan dimensi profil kolom 500 x 500 mm dan dimensi profil balok 350 x 500 mm. Dimensi profil balok dan kolom sama untuk semua spesimen. Data geometri dan properti spesimen dapat dilihat pada tabel 3.5, 3.6, dan tabel 3.7. Semua spesimen didesain dengan kegagalan lentur dengan perhitungan yang ditampilkan pada tabel 3.8. Mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 25, 40, 70 dan 100 MPa. Mutu baja tulangan yang digunakan yaitu 400 MPa dan 625 MPa. Setiap mutu tulangan diterapkan untuk 16 spesimen. Tulangan longitudinal dan sengkang sebuah spesimen didesain dengan mutu tulangan yang sama. Rasio penulangan untuk semua spesimen tidak sama dan sesuai dengan perhitungan yang

ditampilkan pada table 4.1. Syarat jarak penempatan *headed bar* yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti peraturan SNI-2847-2013. Mutu beton, mutu tulangan baja, rasio penulangan dan jarak ℓ_{dt} setiap grup dapat dilihat pada table 4.1. Rasio pembebanan aksial yang didesain untuk semua spesimen sebesar 0,25%.

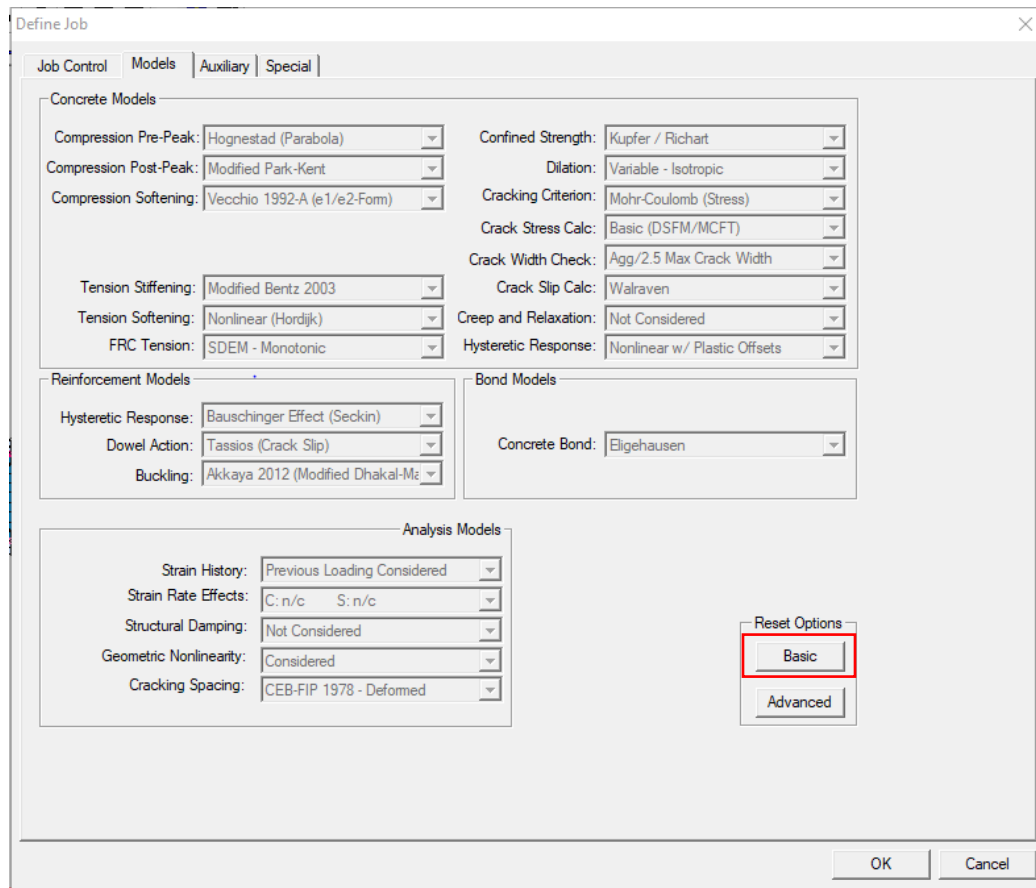
Tabel 4. 1 Data Properti Spesimen

Nama Grup	Desain Mode Kegagalan	Mutu Beton (MPa)	Mutu Baja Tulangan (MPa)	Rasio Penulangan			Axial Load Ratio (%)	Panjang ℓ_{dh} Berdasarkan SNI(mm)		
					Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang		150	8d _b	$(0,19 \frac{f_y A_s}{f_c A_c}) d_b$
Grup-1	Gagal Lentur	25	400	Kolom	2,432%	0,314%	0,250	150	176	334,00
			Balok	1,520%	0,449%					
Grup-2	Gagal Lentur	40	400	Kolom	2,432%	0,314%	0,250	150	176	264,00
			Balok	1,520%	0,449%					
Grup-3	Gagal Lentur	70	400	Kolom	2,432%	0,314%	0,250	150	176	200,00
			Balok	1,520%	0,449%					
Grup-4	Gagal Lentur	100	400	Kolom	2,432%	0,314%	0,250	150	176	167,00
			Balok	1,520%	0,449%					
Grup-5	Gagal Lentur	25	625	Kolom	2,432%	0,314%	0,250	150	128	380,00
			Balok	1,737%	0,449%					
Grup-6	Gagal Lentur	40	625	Kolom	2,432%	0,314%	0,250	150	128	300,00
			Balok	1,954%	0,449%					
Grup-7	Gagal Lentur	70	625	Kolom	2,432%	0,314%	0,250	150	128	227,00
			Balok	1,954%	0,449%					
Grup-8	Gagal Lentur	100	625	Kolom	2,432%	0,314%	0,250	150	128	190,00
			Balok	1,954%	0,449%					

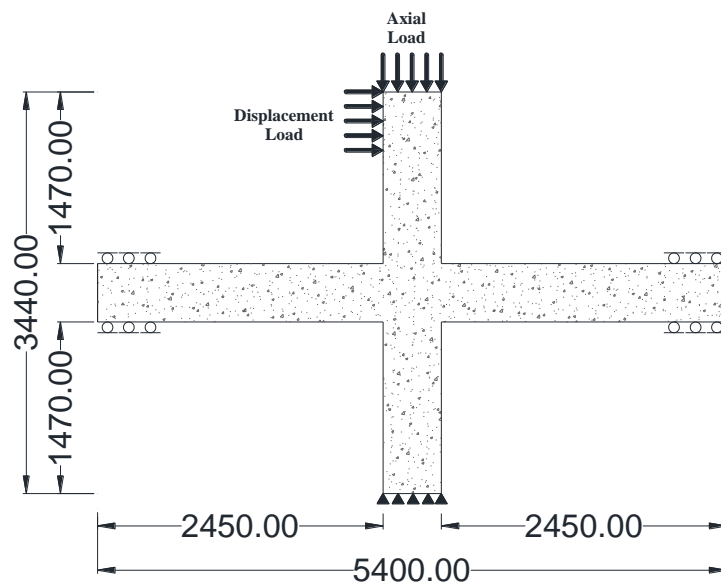
4.3 Pemodelan Numerik

Langkah-langkah pemodelan dengan program bantu vector2 sudah dijelaskan pada bab sebelumnya. Pada bagian ini peneliti hanya mendeskripsikan beberapa hal yang digunakan dalam mendesain spesimen seperti *discretization*, tipe *mashing*, model pembebanan, tipe pembebanan dan perletakan.

Spesimen didesain dengan tipe *discretization grid superposition*. Tipe *mashing* yang digunakan yaitu *rectangles* dan *triangles*. Ukuran *mashing* dibatasi oleh jumlah *meshing* yang dihasilkan. Ukuran *meshing* spesimen didesain dengan ukuran 45 mm x 45 mm. Model material beton dan baja tulangan yang digunakan yaitu model *basic* seperti gambar 4.1.

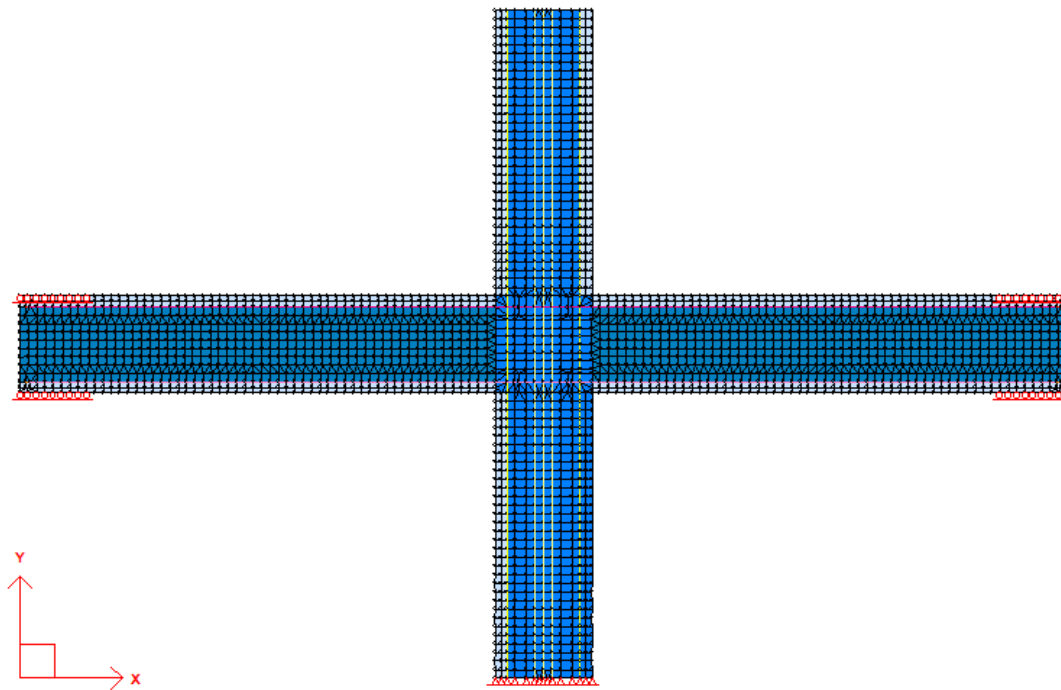


Gambar 4. 1 Model material spesimen

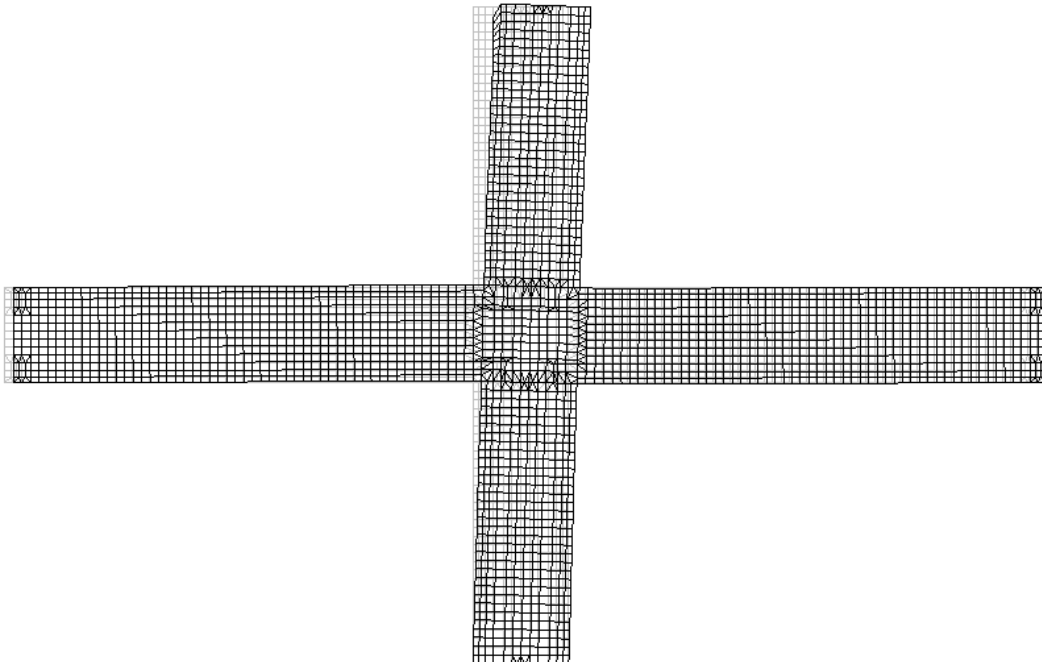


Gambar 4. 2 Metode pembebanan spesimen

Metode pembebanan yang diterapkan dalam pemodelan yaitu metode pembebanan pada ujung kolom. Skema pembebanan dapat dilihat pada gambar 4.2. Metode pembebanan yang digunakan yaitu metode pembebanan pada ujung kolom dengan 2 tipe pembebanan yaitu beban *displacement* dan beban aksial. Beban aksial ditempatkan/diberikan pada ujung atas kolom yang menekan kolom ke arah bawah sebesar $0,25A_gf_c'$, sedangkan beban *displacement* diberikan searah sumbu x positif pada ujung atas kolom. Tipe perletakan yang didesain terdiri dari perletakan sendi dan rol. Perletakan sendi ditempatkan pada bagian bawah kolom sedangkan perletakan rol pada kedua ujung balok dengan mengunci pergerakan searah sumbu y seperti gambar 4.2. Contoh hasil desain spesimen BC-25-400-C-0,25 dengan program vector2 dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Hasil desain spesimen BC-25-400-C-0,25 dengan program bantu
vector2



Gambar 4. 4 Perilaku Displacement Spesimen BC-25-400-C-0,25 (Output Vector2)

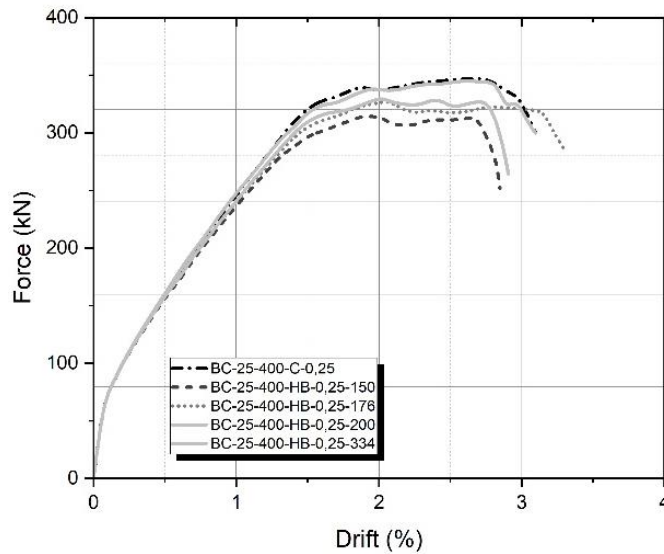
Gambar 4.4 merupakan contoh gambar perilaku *displacement* spesimen BC-25-400-C-0,25 hasil *output* program *vector2*. Gambar spesimen yang terlihat samar merupakan posisi dan kondisi spesimen sebelum diberikan beban *displacement*. Sedangkan gambar yang berwarna hitam terang merupakan gambar setelah spesimen diberikan beban *displacement*. Beban *displacement* yang searah sumbu x positif membuat spesimen terdorong ke arah sumbu x positif.

4.4 Hasil dan Pembahasan

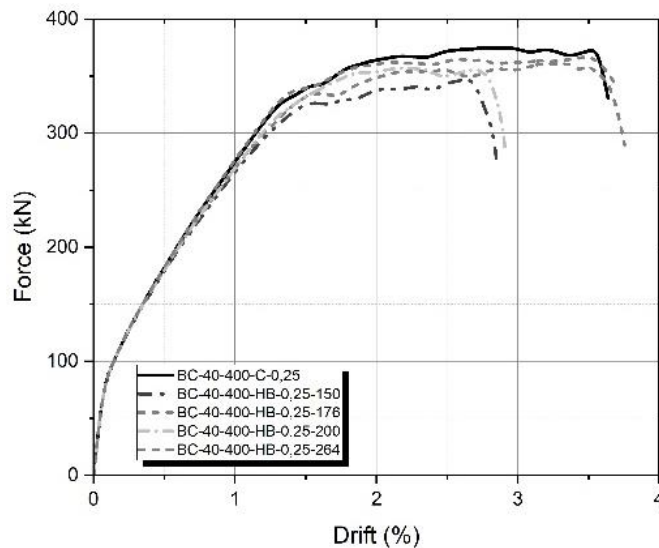
Setelah melakukan pemodelan dan di-*running* maka diperoleh *output* berupa grafik *force vs displacement*, pola retak, sudut retak, lebar retak dan tegangan pada tulangan longitudinal. Peneliti kemudian menganalisis dan membahas *output* kurva beban dan *displacement*, nilai daktilitas, perbandingan V_{max} terhadap V_{max} konvensional dan perbandingan V_{max} terhadap V_n . Berikut ini merupakan hasil analisis dan pembahasannya:

4.4.1 Kurva Beban dan Drift

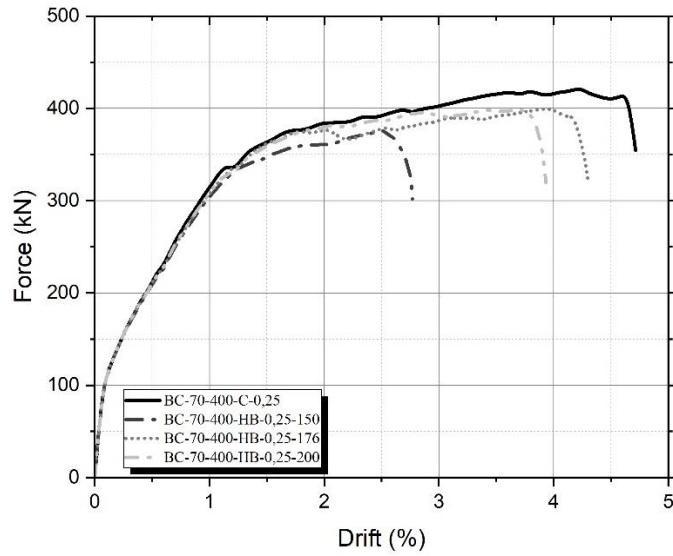
Kurva beban dan *drift* spesimen hubungan balok-kolom interior dapat dilihat pada gambar 4.5 sampai gambar 4.12.



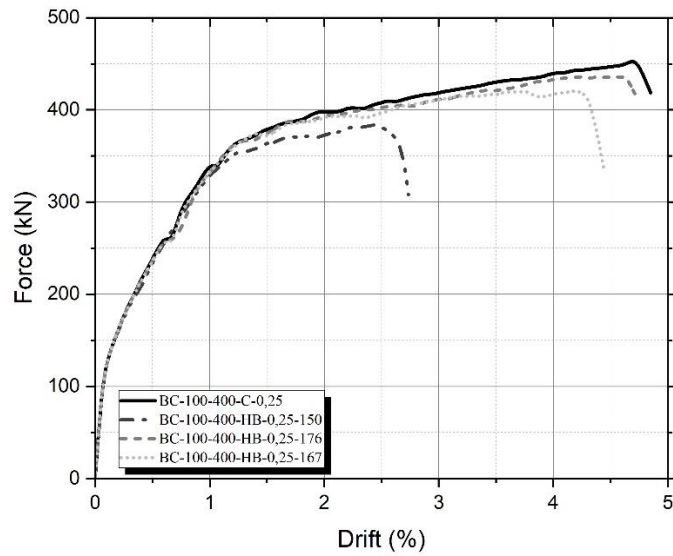
Gambar 4. 5 Kurva Beban dan Drift Output vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 25$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y = 400$ MPa)



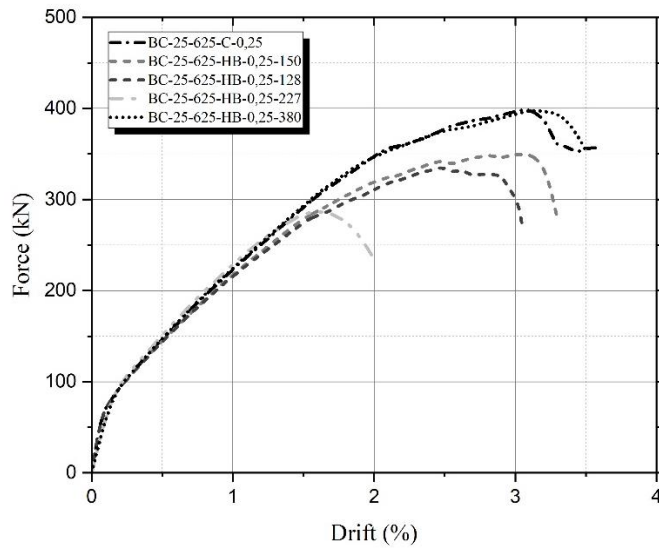
Gambar 4. 6 Kurva Beban dan Drift Output vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 40$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y = 400$ MPa)



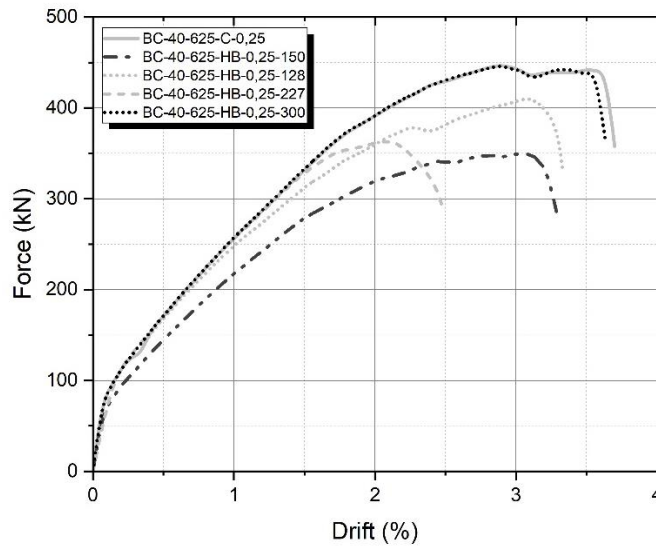
Gambar 4. 7 Kurva Beban dan Drift Output vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c' = 70$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y = 400$ MPa)



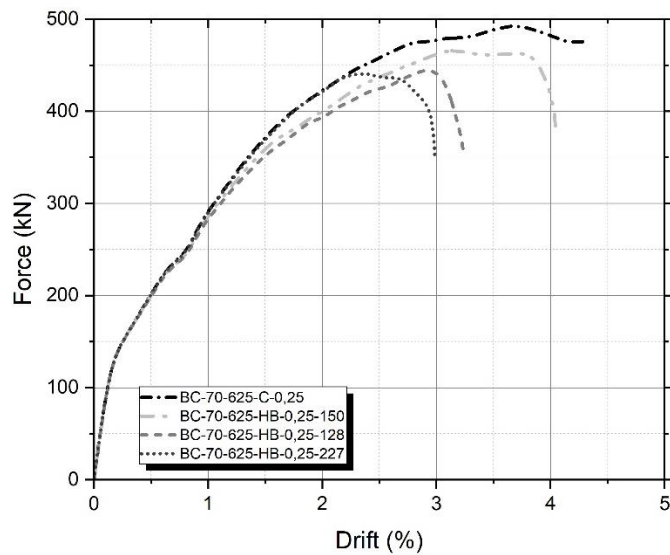
Gambar 4. 8 Kurva Beban dan Drift Output vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c' = 100$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y = 400$ MPa)



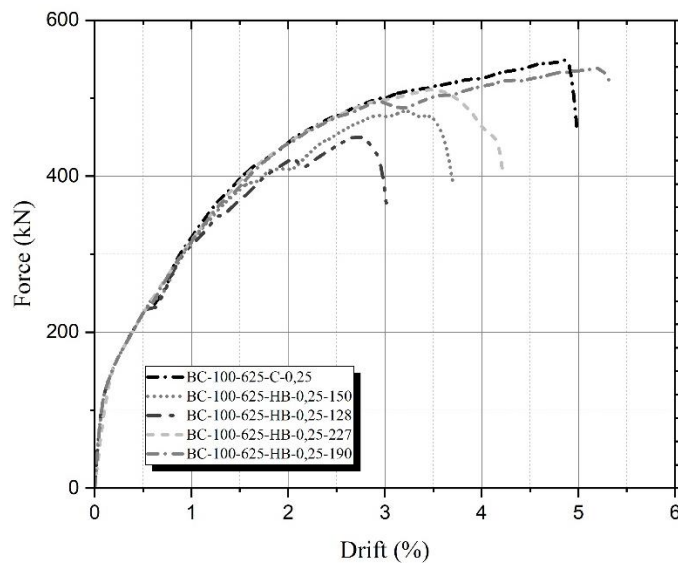
Gambar 4. 9 Kurva Beban dan Drift Output vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 25 \text{ MPa}$) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y = 625 \text{ MPa}$)



Gambar 4. 10 Kurva Beban dan Drift Output vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 40 \text{ MPa}$) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y = 625 \text{ MPa}$)



Gambar 4. 11 Kurva Beban dan Drift Output vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa)



Gambar 4. 12 Kurva Beban dan Drift Output vector2 Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=100$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa)

Gambar grafik 4.5 sampai gambar grafik 4.12 menunjukkan bahwa 75% kurva beban dan *drift* spesimen dengan tipe penjangkaran *headed bar* semakin mendekati

kurva beban dan *drift* spesimen konvensional seiring dengan bertambah panjang jarak penjangkaran *headed bar*.

Berdasarkan data grafik beban dan *drift* peneliti kemudian menyajikan nilai beban maksimum, daktilitas, hubungan perbandingan nilai gaya geser maksimum spesimen dengan tipe penjangkaran *headed bar* dengan nilai gaya geser maksimum spesimen konvensional terhadap panjang penjangkaran *headed bar* dan hubungan perbandingan nilai gaya geser maksimum spesimen dengan tipe penjangkaran *headed bar* dengan nilai kuat geser nominal spesimen konvensional terhadap panjang penjangkaran *headed bar*.

Perhitungan nilai daktilitas didasarkan pada pembentukan kurva *force-displacement* yang ideal yang telah diatur dalam FEMA 356. Kuat geser leleh efektif (V_y) diperoleh dengan membuat model bilinear dari kurva kapasitas pada saat tercapai target perpindahan. Untuk memperoleh nilai V_y dengan model bilinear maka dibuat garis diagonal yang memotong titik $0,6V_y$ pada grafik dan berhenti pada nilai V_y . Setelah itu dibuat garis kedua yang merupakan garis yang menghubungkan titik perpotongan $0,6V_y$ setinggi V_y dengan nilai V_u yang diperoleh dengan cara coba-coba. Nilai *displacement* V_u merupakan nilai *displacement* pada saat V_u sebesar $0,8V_y$ setelah *force maksimum* (V_y). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan luasan area di atas dan di bawah garis bilinear sama. Perpotongan kedua garis bilinear tersebut merupakan nilai V_y . Nilai daktilitas diperoleh dari perbandingan antara nilai *displacement* pada saat kuat geser ultimit (V_u) terhadap nilai *displacement* pada saat kuat geser leleh efektif (V_y).

Berikut ini merupakan tabel hasil analisa setiap spesimen:

Tabel 4. 2 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=25$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa)

SPESIMEN	V_n	V_{max}	V_{max}/V_{max} conv.	V_{max}/V_n	DAKTILITAS
BC-25-400-C-0,25	1250,00	347,20	1,00	0,28	2,40
BC-25-400-HB-0,25-150	1250,00	314,50	0,91	0,25	2,47
BC-25-400-HB-0,25-176	1250,00	327,20	0,94	0,26	2,74
BC-25-400-HB-0,25-200	1250,00	330,40	0,95	0,26	2,37
BC-25-400-HB-0,25-334	1250,00	345,10	0,99	0,28	2,45

Tabel 4. 3 Hasil Analisa Spesimen-spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=40$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa)

SPEKIMEN	Vn	Vmax	V_{max}/V_{max} conv.	Vmax/Vn	DAKTILITAS
BC-40-400-C-0,25	1581,14	375,20	1,00	0,24	3,04
BC-40-400-HB-0,25-150	1581,14	347,10	0,93	0,22	2,60
BC-40-400-HB-0,25-176	1581,14	361,80	0,96	0,23	3,23
BC-40-400-HB-0,25-200	1581,14	357,10	0,95	0,23	2,58
BC-40-400-HB-0,25-264	1581,14	367,00	0,98	0,23	3,23

Tabel 4. 4 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa)

SPEKIMEN	Vn	Vmax	V_{max}/V_{max} conv.	Vmax/Vn	DAKTILITAS
BC-70-400-C-0,25	2091,65	421,20	1,00	0,20	4,13
BC-70-400-HB-0,25-150	2091,65	376,90	0,89	0,18	2,74
BC-70-400-HB-0,25-176	2091,65	399,60	0,95	0,19	3,99
BC-70-400-HB-0,25-200	2091,65	399,20	0,95	0,19	3,66

Tabel 4. 5 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=100$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Normal ($f_y=400$ MPa)

SPEKIMEN	Vn	Vmax	V_{max}/V_{max} conv.	Vmax/Vn	DAKTILITAS
BC-100-400-C-0,25	2500,00	454,70	1,00	0,18	4,13
BC-100-400-HB-0,25-150	2500,00	384,90	0,85	0,15	3,37
BC-100-400-HB-0,25-176	2500,00	436,30	0,96	0,17	4,04
BC-100-400-HB-0,25-167	2500,00	420,80	0,93	0,17	4,65

Tabel 4. 6 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=25$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa)

SPEKIMEN	Vn	Vmax	V_{max}/V_{max} conv.	Vmax/Vn	DAKTILITAS
BC-25-625-C-0,25	1250,00	398,80	1,00	0,32	1,92
BC-25-625-HB-0,25-150	1250,00	349,90	0,88	0,28	2,10
BC-25-625-HB-0,25-128	1250,00	336,30	0,84	0,27	2,05
BC-25-625-HB-0,25-227	1250,00	288,30	0,72	0,23	1,92
BC-25-625-HB-0,25-380	1250,00	398,60	1,00	0,32	1,90

Tabel 4. 7 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=40$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa)

SPESIMEN	Vn	Vmax	V_{max}/V_{max} conv.	Vmax/Vn	DAKTILITAS
BC-40-625-C-0,25	1581,14	447,20	1,00	0,28	2,06
BC-40-625-HB-0,25-150	1581,14	349,90	0,78	0,22	2,10
BC-40-625-HB-0,25-128	1581,14	411,10	0,92	0,26	2,02
BC-40-625-HB-0,25-227	1581,14	363,90	0,81	0,23	1,94
BC-40-625-HB-0,25-300	1581,14	447,30	1,00	0,28	2,04

Tabel 4. 8 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa)

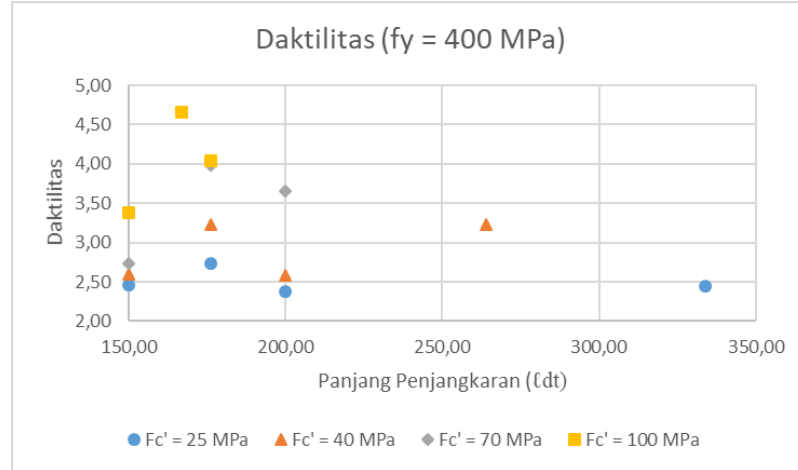
SPESIMEN	Vn	Vmax	V_{max}/V_{max} conv.	Vmax/Vc	DAKTILITAS
BC-70-625-C-0,25	2091,65	493,00	1,00	0,24	2,52
BC-70-625-HB-0,25-150	2091,65	466,50	0,95	0,22	2,53
BC-70-625-HB-0,25-128	2091,65	446,40	0,91	0,21	2,12
BC-70-625-HB-0,25-227	2091,65	440,90	0,89	0,21	2,03

Tabel 4. 9 Hasil Analisa Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c'=100$ MPa) dan Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi ($f_y=625$ MPa)

SPESIMEN	Vc	Vmax	V_{max}/V_{max} conv.	Vmax/Vn	DAKTILITAS
BC-100-625-C-0,25	2500,00	551,90	1,00	0,22	2,83
BC-100-625-HB-0,25-150	2500,00	484,50	0,88	0,19	2,56
BC-100-625-HB-0,25-128	2500,00	451,50	0,82	0,18	2,31
BC-100-625-HB-0,25-227	2500,00	512,70	0,93	0,21	2,68
BC-100-625-HB-0,25-190	2500,00	539,00	0,98	0,22	3,06

4.4.2 Hubungan Daktilitas dengan Panjang Penjangkaran

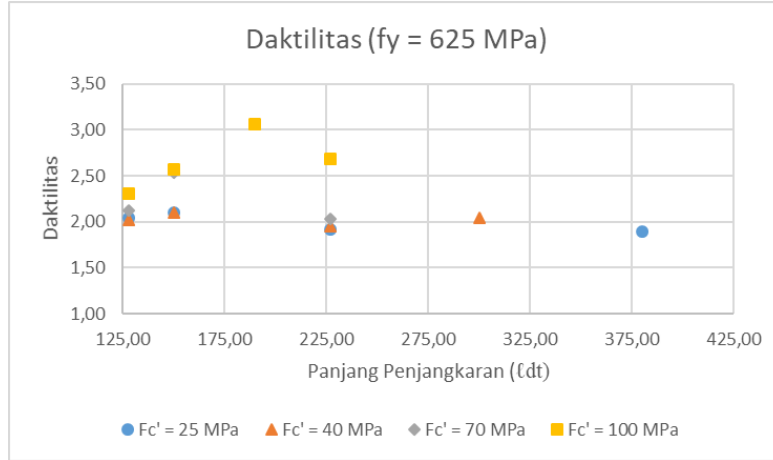
Hasil *output* program *vector2* berupa grafik *force vs displacement* kemudian dianalisa untuk mengetahui nilai daktilitas setiap spesimen berdasarkan mutu beton, mutu tulangan longitudinal dan panjang penjangkaran *headed bar* (ℓ_{dt}).



Gambar 4. 13 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Tulangan Longitudinal 400 MPa

Gambar 4.13 merupakan gambar grafik hubungan antara daktilitas dengan panjang penjangkaran spesimen-spesimen yang menggunakan *headed bar* sebagai tipe penjangkaran dengan tulangan longitudinal mutu normal ($f_y=400$ MPa). Pada gambar tersebut terlihat ada 4 jenis simbol dengan warna yang berbeda. Warna biru dengan simbol bulat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Warna *orange* dengan simbol segitiga menunjukkan spesimen dengan mutu beton 40 MPa. Warna abu-abu dengan simbol jajar genjang menunjukkan spesimen dengan mutu beton 70 MPa. Warna kuning dengan simbol segi empat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 100 MPa. Grafik ini menjelaskan tentang pengaruh mutu beton dan panjang penjangkaran terhadap daktilitas untuk semua spesimen dengan mutu tulangan longitudinal 400 MPa.

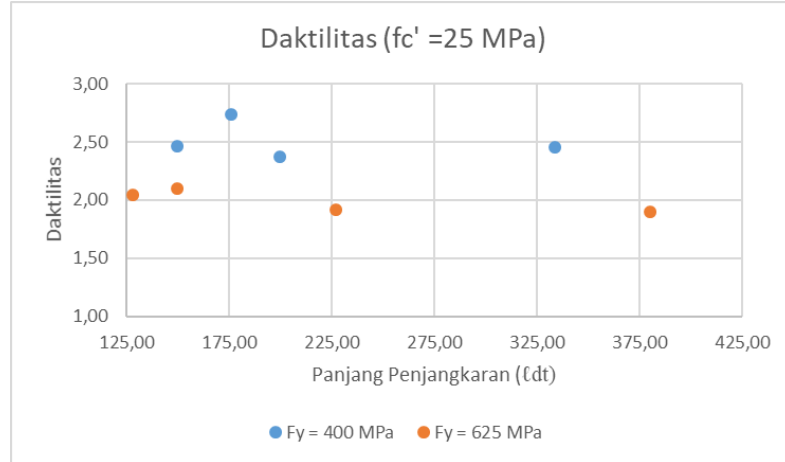
Simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa berada paling rendah. Simbol segi tiga, jajar genjang dan segi empat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 40, 70 dan 100 MPa secara berurutan berada di atas simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa nilai daktilitas semakin meningkat selaras dengan meningkatkannya mutu beton. Selain itu nilai daktilitas tidak berbanding lurus dengan semakin panjang jarak penjangkaran.



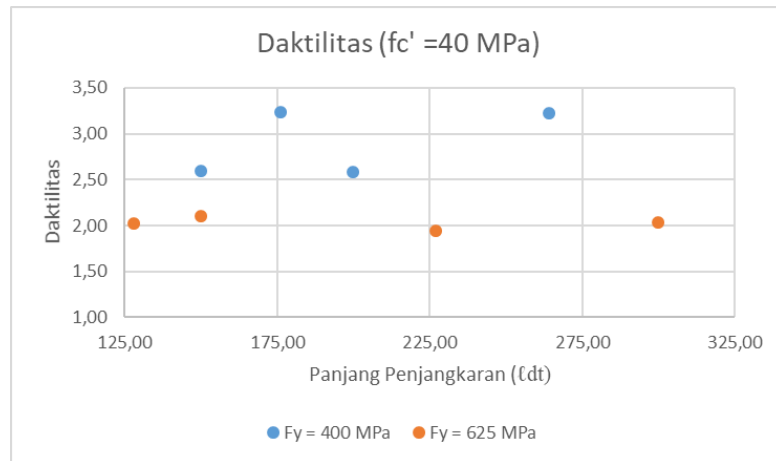
Gambar 4. 14 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Tulangan Longitudinal 625 MPa

Gambar 4.14 merupakan gambar grafik hubungan antara daktilitas dengan panjang penjangkaran spesimen-spesimen yang menggunakan *headed bar* sebagai tipe penjangkaran dengan tulangan longitudinal mutu tinggi ($f_y=625$ MPa). Pada gambar tersebut terlihat ada 4 jenis simbol dengan warna yang berbeda. Warna biru dengan simbol bulat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Warna *orange* dengan simbol segitiga menunjukkan spesimen dengan mutu beton 40 MPa. Warna abu-abu dengan simbol jajar genjang menunjukkan spesimen dengan mutu beton 70 MPa. Warna kuning dengan simbol segi empat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 100 MPa. Grafik ini menjelaskan tentang pengaruh mutu beton dan panjang penjangkaran terhadap daktilitas untuk semua spesimen dengan mutu tulangan longitudinal 625 MPa.

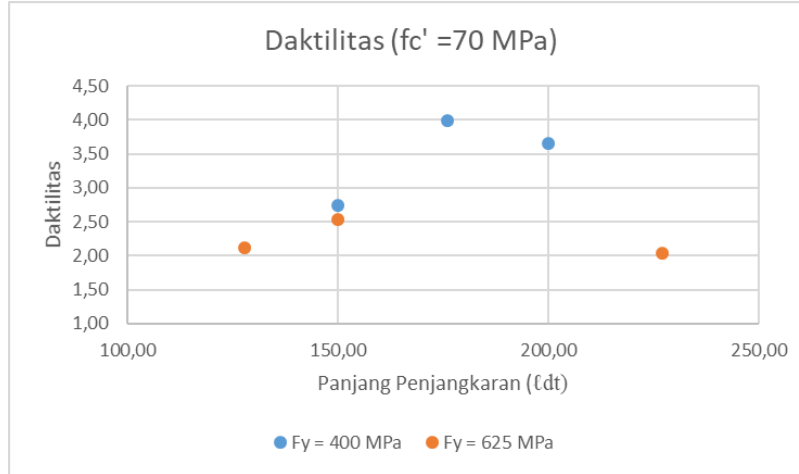
Simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa berada paling rendah. Simbol segi tiga, jajar genjang dan segi empat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 40, 70 dan 100 MPa secara berurutan berada di atas simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa nilai daktilitas semakin meningkat selaras dengan meningkatkannya mutu beton. Selain itu nilai daktilitas tidak berbanding lurus dengan semakin panjang jarak penjangkaran.



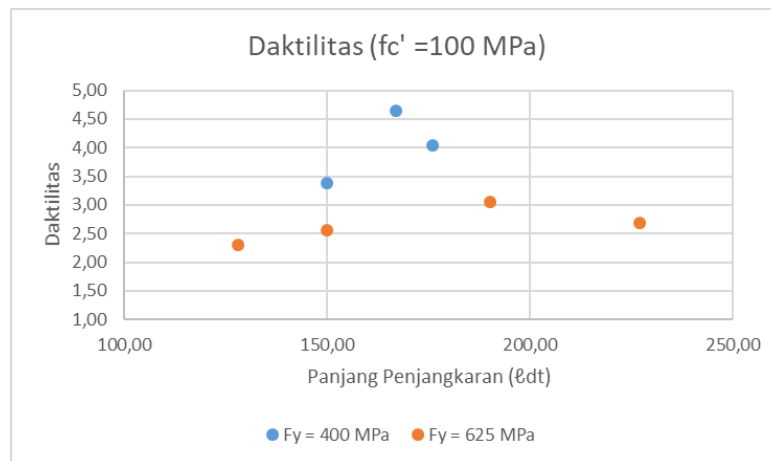
Gambar 4. 15 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu beton 25 MPa



Gambar 4. 16 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Beton 40 MPa



Gambar 4. 17 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Beton 70 MPa



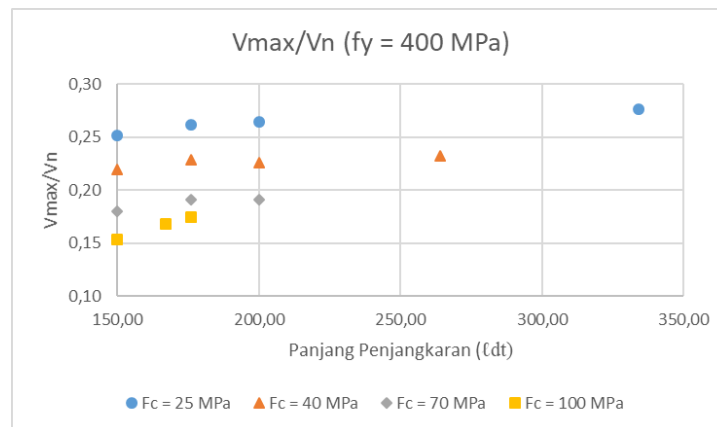
Gambar 4. 18 Grafik Hubungan Daktilitas Terhadap Panjang Penjangkaran untuk Spesimen-Spesimen dengan Mutu Beton 100 MPa

Gambar 4.15 sampai gambar 4.18 merupakan gambar-gambar grafik hubungan antara daktilitas dengan panjang penjangkaran spesimen-spesimen yang menggunakan *headed bar* sebagai tipe penjangkaran dengan beton mutu normal ($f_c' = 25$ dan 40 MPa) dan beton mutu tinggi ($f_c' = 70$ dan 100 MPa). Pada gambar tersebut terlihat simbol bulat dengan 2 jenis warna yang berbeda. Warna biru menunjukkan spesimen dengan tulangan longitudinal mutu normal ($f_y = 400$ MPa). Warna *orange* menunjukkan spesimen dengan tulangan longitudinal mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa). Grafik ini

menjelaskan tentang pengaruh mutu tulangan longitudinal dan panjang penjangkaran terhadap daktilitas untuk semua spesimen dengan mutu beton 25, 40, 70 dan 100 MPa.

Simbol bulat dengan warna biru yang menerangkan spesimen dengan tulangan longitudinal mutu normal ($f_y=400$ MPa) berada di atas simbol bulat berwarna *orange* yang menerangkan spesimen dengan tulangan longitudinal mutu tinggi ($f_y=625$ MPa). Hal ini menunjukkan bahwa spesimen-spesimen yang menggunakan *headed bar* sebagai tipe penjangkaran dengan tulangan longitudinal mutu normal ($f_y=400$ MPa) memiliki nilai daktilitas lebih tinggi dari spesimen-spesimen yang menggunakan *headed bar* sebagai tipe penjangkaran dengan tulangan longitudinal mutu tinggi ($f_y=625$ MPa). Selain itu nilai daktilitas tidak berbanding lurus dengan semakin panjang jarak penjangkaran.

4.4.3 Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran *Headed Bar* dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran

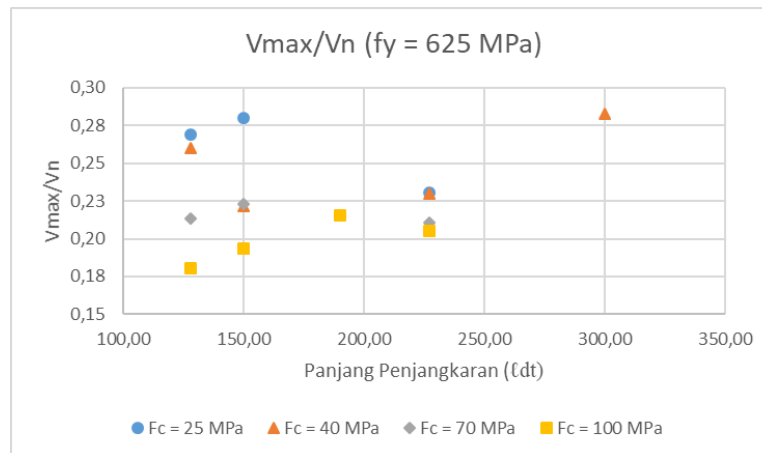


Gambar 4. 19 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran *Headed Bar* dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Tulangan Mutu normal($f_y= 400$ MPa)

Gambar 4.19 merupakan gambar grafik hubungan antara perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan *headed bar* sebagai tipe pengankuran dan kuat geser nominal terhadap panjang penjangkaran *headed bar* dengan mutu tulangan longitudinal 400 MPa (mutu normal). Pada gambar tersebut terlihat ada 4 jenis simbol

dengan warna yang berbeda. Warna biru dengan simbol bulat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Warna *orange* dengan simbol segitiga menunjukkan spesimen dengan mutu beton 40 MPa. Warna abu-abu dengan simbol jajar genjang menunjukkan spesimen dengan mutu beton 70 MPa. Warna kuning dengan simbol segi empat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 100 MPa.

Simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa berada paling rendah. Simbol segi tiga, jajar genjang dan segi empat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 40, 70 dan 100 MPa secara berurutan berada di bawah simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya mutu beton dan semakin pendek panjang penjangkaran *headed bar* maka nilai perbandingan gaya geser maksimum dengan gaya geser nominal makin kecil.

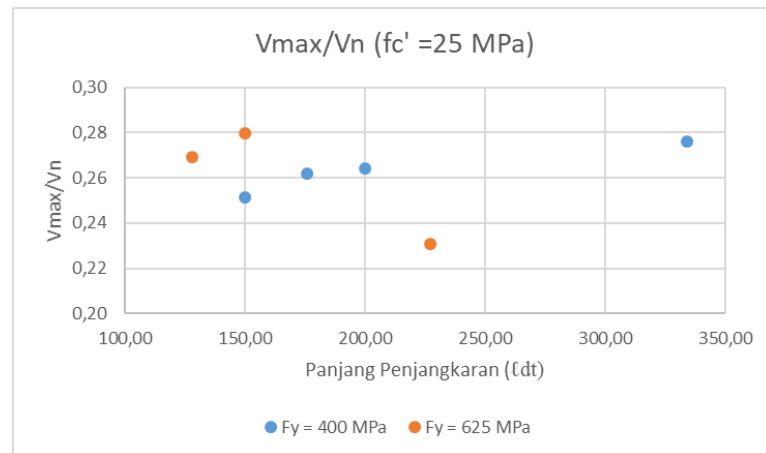


Gambar 4. 20 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran Headed Bar dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Tulangan Mutu Tinggi(fy= 625 MPa)

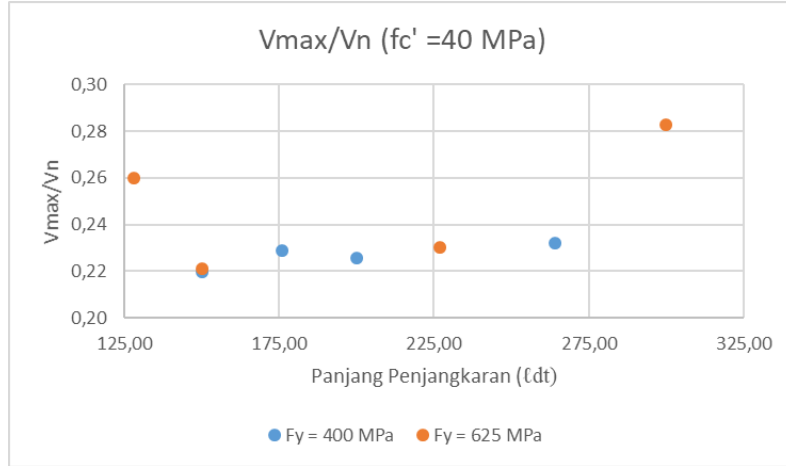
Gambar 4.20 merupakan gambar grafik hubungan perbandingan gaya geser maksimum dengan gaya geser nominal terhadap panjang penjangkaran spesimen-spesimen yang menggunakan *headed bar* sebagai tipe penjangkaran dengan tulangan mutu tinggi (fy=625 MPa). Pada gambar tersebut terlihat ada 4 jenis simbol dengan warna yang berbeda. Warna biru dengan simbol bulat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Warna *orange* dengan simbol segitiga menunjukkan spesimen

dengan mutu beton 40 MPa. Warna abu-abu dengan simbol jajar genjang menunjukkan spesimen dengan mutu beton 70 MPa. Warna kuning dengan simbol segi empat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 100 MPa.

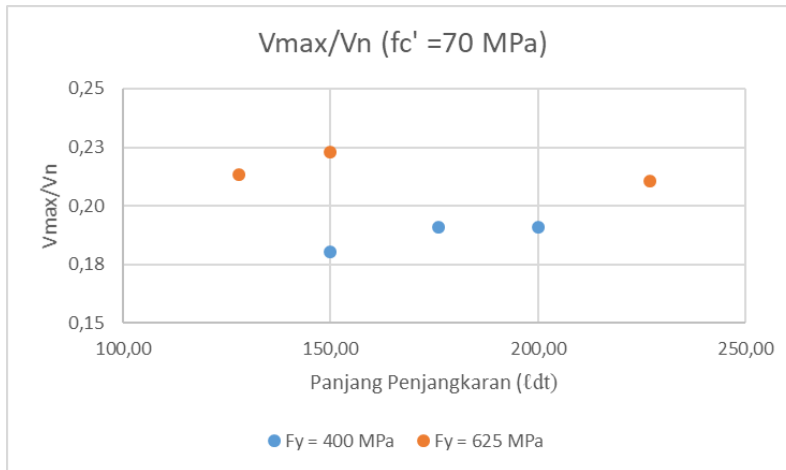
Simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa berada paling tinggi. Simbol segi tiga, jajar genjang dan segi empat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 40, 70 dan 100 MPa secara berurutan berada di bawah simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya mutu beton mempengaruhi nilai perbandingan gaya geser maksimum dengan kuat geser nominal yang semakin kecil. Pertambahan panjang penjangkaran tidak menunjukkan peningkatan atau penurunan secara konsisten pada nilai perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan *headed bar* sebagai tipe penjangkaran dengan kuat geser nominal.



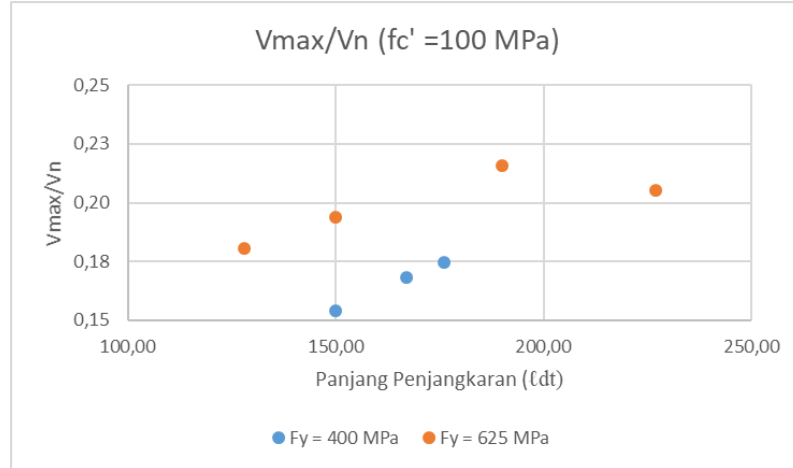
Gambar 4. 21 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran Headed Bar dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 25$ MPa)



Gambar 4. 22 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran Headed Bar dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran Beton Mutu Normal ($f_c' = 40$ MPa)



Gambar 4. 23 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran Headed Bar dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c' = 70$ MPa)

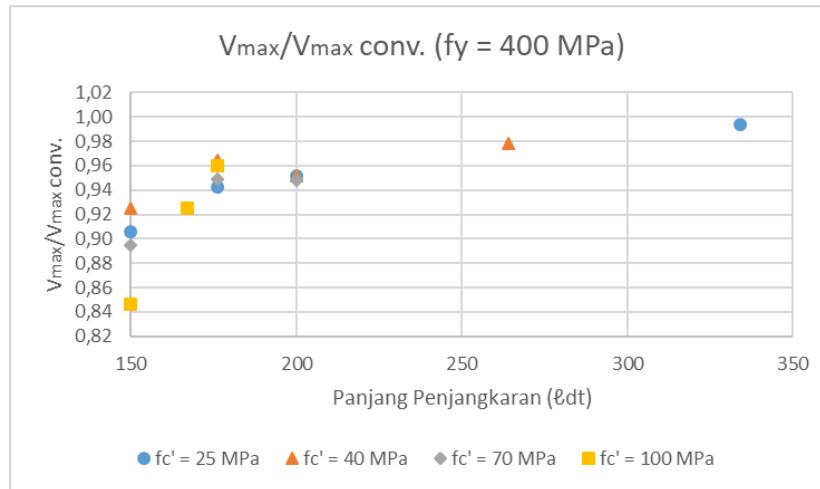


Gambar 4. 24 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum Spesimen dengan Tipe Pengankuran Headed Bar dan Kuat Geser Nominal Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c' = 100$ MPa)

Gambar 4.21 sampai gambar 4.24 merupakan gambar-gambar grafik hubungan antara perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan pengankuran *headed bar* dengan kuat geser nominal terhadap panjang penjangkaran dengan beton mutu 25, 40, 70 dan 100 MPa. Pada gambar tersebut terlihat simbol bulat dengan warna yang berbeda. Warna biru menunjukkan spesimen dengan mutu tulangan 400 MPa. Warna *orange* menunjukkan spesimen dengan mutu tulangan 625 MPa.

Simbol bulat yang menerangkan spesimen dengan mutu tulangan 400 MPa berada dibawah dari spesimen dengan mutu tulangan 625 MPa untuk spesimen dengan beton mutu tinggi. Sedangkan spesimen mutu normal terlihat dengan posisi tidak beraturan. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya mutu beton mempengaruhi nilai perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan *headed bar* sebagai tipe penjangkaran dengan kuat geser nominal semakin besar hanya untuk spesimen dengan beton mutu tinggi. Pertambahan panjang penjangkaran tidak menunjukkan peningkatan atau penurunan secara konsisten pada nilai perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan *headed bar* sebagai tipe pengankuran dengan kuat geser nominal.

4.4.4 Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran Headed Bar dengan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran

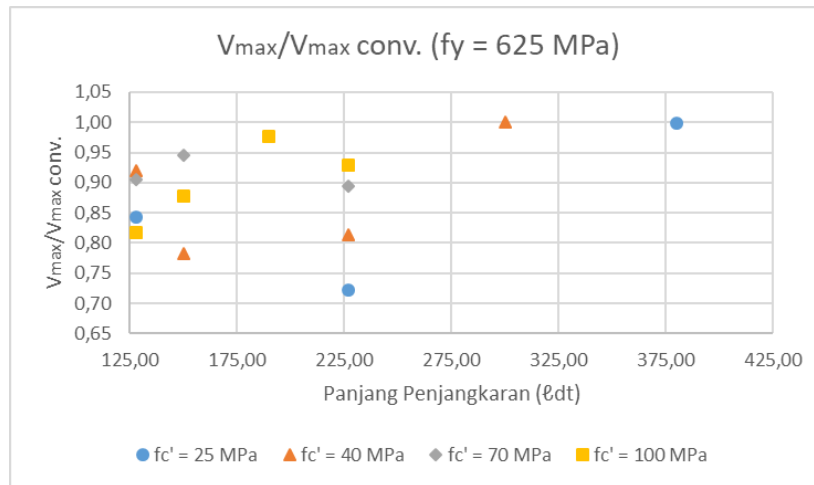


Gambar 4. 25 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran Headed Bar dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Tulangan Mutu Normal ($f_c' = 400\ MPa$)

Gambar 4.25 merupakan gambar grafik hubungan antara perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan tipe penjangkaraan *headed bar* dengan gaya geser maksimum spesimen konvensional terhadap panjang penjangkaran dengan tulangan mutu normal ($f_y=400\ MPa$). Pada gambar tersebut terlihat ada 4 jenis simbol dengan warna yang berbeda. Warna biru dengan simbol bulat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Warna *orange* dengan simbol segitiga menunjukkan spesimen dengan mutu beton 40 MPa. Warna abu-abu dengan simbol jajar genjang menunjukkan spesimen dengan mutu beton 70 MPa. Warna kuning dengan simbol segi empat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 100 MPa.

Spesimen pada setiap mutu beton terlihat grafik hubungan perbandingan antara gaya geser maksimum spesimen dengan tipe penjangkaran *headed bar* dan gaya geser maksimum spesimen konvensional semakin menurun seiring bertambah panjang penjangkaran *headed bar* dan tidak menurun secara beraturan seiring bertambahnya mutu beton. Semakin kecil nilai perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan

headed bar sebagai tipe pengankuran dengan gaya geser spesimen konvensional, maka semakin kecil selisih antara gaya geser maksimum spesimen konvensional dengan gaya geser maksimum spesimen dengan penjangkaran *headed bar*.

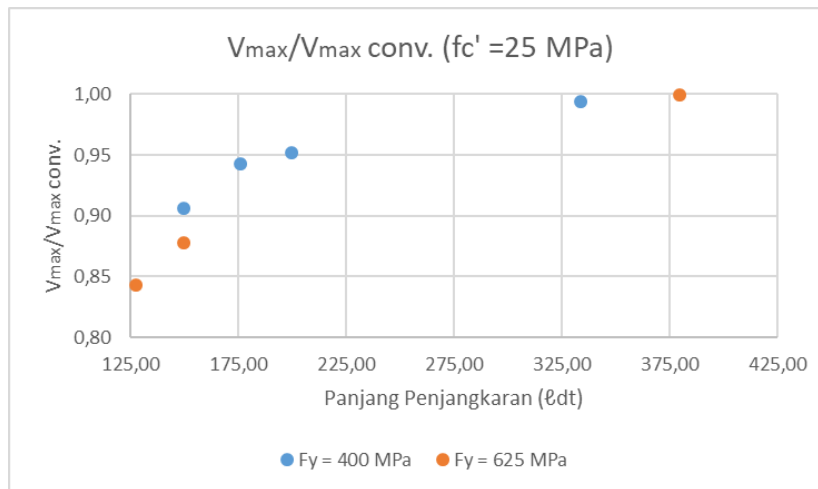


Gambar 4. 26 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran Headed Bar dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Tulangan Mutu Tinggi ($f_c' = 625$ MPa)

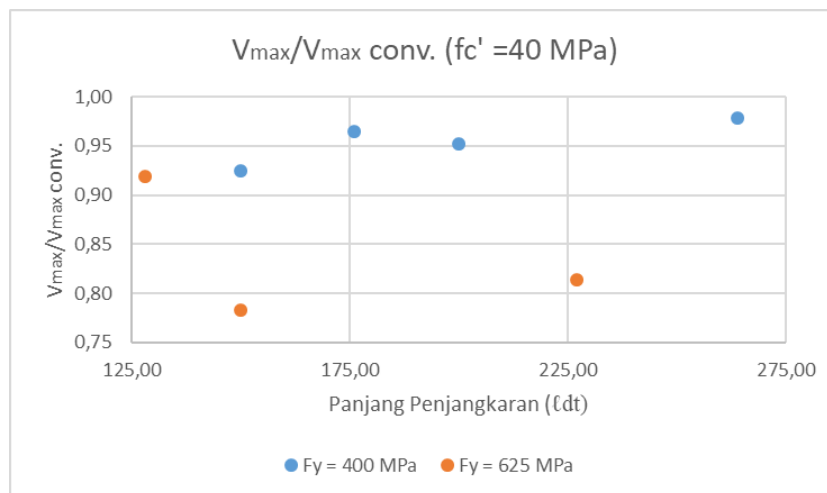
Gambar 4.26 merupakan gambar grafik hubungan antara perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan tipe penjangkaraan *headed bar* dengan gaya geser maksimum spesimen konvensional terhadap panjang penjangkaran dengan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa). Pada gambar tersebut terlihat ada 4 jenis simbol dengan warna yang berbeda. Warna biru dengan simbol bulat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 25 MPa. Warna *orange* dengan simbol segitiga menunjukkan spesimen dengan mutu beton 40 MPa. Warna abu-abu dengan simbol jajar genjang menunjukkan spesimen dengan mutu beton 70 MPa. Warna kuning dengan simbol segi empat menunjukkan spesimen dengan mutu beton 100 MPa.

Spesimen pada setiap mutu beton terlihat grafik hubungan perbandingan antara gaya geser maksimum spesimen dengan tipe penjangkaran *headed bar* dan gaya geser maksimum spesimen konvensional semakin meningkat ataupun menurun secara tidak konsisten seiring bertambah panjang penjangkaran *headed bar* dan meningkatnya mutu beton. Semakin kecil nilai perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan

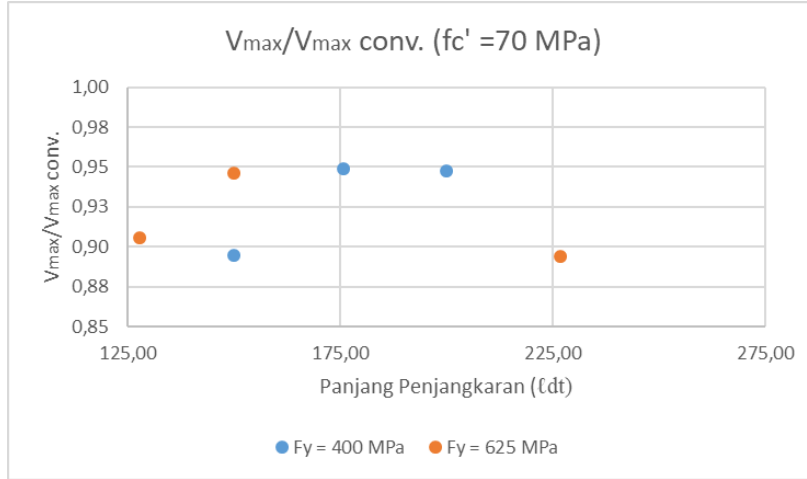
headed bar sebagai tipe pengankuran dengan gaya geser maksimum spesimen konvensional, maka semakin kecil selisih antara gaya geser maksimum spesimen konvensional dengan gaya geser maksimum spesimen dengan penjangkaran *headed bar*.



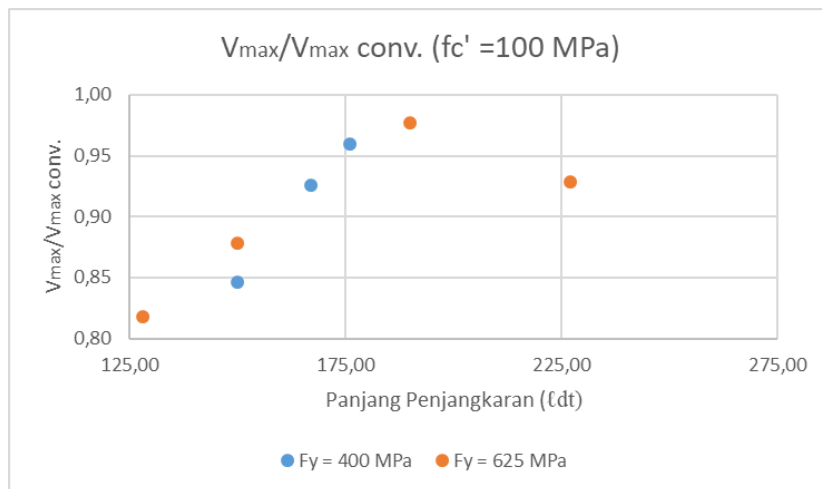
Gambar 4. 27 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran *Headed Bar* dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 25$ MPa)



Gambar 4. 28 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran *Headed Bar* dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Normal ($f_c' = 40$ MPa)



Gambar 4. 29 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran Headed Bar dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c' = 70$ MPa)



Gambar 4. 30 Grafik Hubungan Perbandingan Gaya Geser Maksimum dengan Tipe Penjangkaran Headed Bar dan Gaya Geser Maksimum Spesimen Konvensional Terhadap Panjang Penjangkaran dengan Beton Mutu Tinggi ($f_c' = 100$ MPa)

Gambar 4.27 sampai gambar 4.30 merupakan gambar grafik hubungan antara perbandingan gaya geser maksimum spesimen dengan tipe penjangkaran *headed bar* dengan gaya geser maksimum spesimen konvensional terhadap panjang penjangkaran dengan beton mutu normal ($f_c' = 25$ dan 40 MPa) dan beton mutu tinggi ($f_c' = 70$ dan 100 MPa). Pada gambar tersebut terlihat simbol bulat dengan warna yang berbeda.

Warna biru menunjukkan spesimen dengan tulangan mutu normal ($f_y=400$ MPa) dan warna *orange* menunjukkan tulangan mutu tinggi ($f_y=625$ MPa).

Spesimen pada setiap mutu beton terlihat grafik hubungan perbandingan antara gaya geser maksimum spesimen dengan tipe penjangkaran *headed bar* dan gaya geser maksimum spesimen konvensional semakin meningkat ataupun menurun secara tidak konsisten seiring bertambah panjang penjangkaran *headed bar* dan meningkatnya mutu tulangan. Semakin kecil nilai perbandingan gaya geser Maksimum dengan tipe penjangkaran *headed bar* dan gaya geser maksimum spesimen konvensional. Maka semakin kecil selisih antara gaya geser maksimum spesimen konvensional dengan gaya geser maksimum spesimen dengan penjangkaran *headed bar*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil semua simulasi yang telah dilakukan didapat bahwa penggunaan headed bar pada hubungan balok-kolom didapatkan hal sebagai berikut :

- Penggunaan *headed bar* pada hubungan balok kolom tetap menghasilkan perilaku lentur /daktail . Hal ini ditunjukkan dengan gaya geser maksimum tiap spesimen masih di bawah kuat geser nominal hubungan balok kolom, dan pelelehan tulangan pada balok.
- Pada spesimen yang menggunakan *headed bar*, semakin pendek panjang penjangkaran *headed bar* maka semakin berkurang nilai kuat geser spesimen yang menggunakan *headed bar* dibandingkan dengan spesimen hubungan balok kolom konvensional.
- Penggunaan besi beton dengan mutu normal ($f_y = 400$ MPa) menghasilkan perilaku hubungan balok-kolom interior yang lebih daktail dari pada penggunaan besi beton dengan mutu tinggi ($f_y = 600$ MPa) pada tiap mutu beton.
- Pada setiap mutu besi beton didapat bahwa semakin tinggi nilai kuat tekan maka semakin daktail perilaku hubungan balok kolom
- Dari hasil simulasi didapat bahwa penggunaan *headed bar* dapat dipakai pada hubungan balok kolom interior namun diperlukan kajian experimental untuk mendapatkan hasil yang aktual

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya diantaranya sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut menggunakan *software* metode elemen hingga lainnya untuk mengetahui lebih dalam tingkat akurasi hasil simulasi.

2. Perlu adanya variasi jarak penjangkaran (ℓ_{dt}) *headed bar*, mutu beton dan baja tulangan pada simulasi hubungan balok-kolom interior menggunakan program bantu metode elemen hingga.
3. Perlu adanya variasi dimensi profil balok dan kolom, mutu baja dan beton serta jumlah tulangan longitudinal pada simulasi hubungan balok-kolom interior menggunakan program bantu metode elemen hingga.

DAFTAR PUSTAKA

- Alrasyid, Harun, Yehezkiel Septian Yoganata, Munarus Suluch, and Data Iranata. 2017. "Headed Reinforcement in Concrete Structure: State of the Art." *AIP Conference Proceedings* 1903.
- Chun, Sung-chul, and Dae-young Kim. 2004. "Evaluation of Mechanical Anchorage of Reinforcement By Exterior Beam-Column Joint Experiments." *Test* (0326).
- Chun, Sung Chul et al. 2007. "Mechanical Anchorage in Exterior Beam-Column Joints Subjected to Cyclic Loading." *ACI Structural Journal* 104(1): 102–12.
- Erico. "Lenton Terminator." *Middle East*.
- FEMA 356. 2000. "FEMA 356 Prestandard." (November): 2–15.
- Francesco Mrachetto. 2015. "Use of Headed Reinforcement Bars in Construction." *PhD Dissertation*.
- Gabel, Jason, Annan Shehadi, Shawn Ursini, and Marshall Gerometta. 2018. "Tall Trends of 2016." *Ctbuh*.
- "HRC Hight Standard & Hight Performance T-Headed Bar." 2009.
- Kang, T H K, M Shin, and N Mitra. 2009. "Headed Reinforcement Applications for Reinforced Concrete Beam-Column Connections." *2009 Structures Congress - Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*: 1505–14.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-69949147217&partnerID=40&md5=c59dfcf7a187c9c9c23b8f0b1fb14124>.
- Rajagopal, S., and S. Prabavathy. 2014. "Seismic Behavior of Exterior Beam-Column Joint Using Mechanical Anchorage under Reversal Loading: An Experimental Study." *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil*

Engineering 38(C2): 345–58.

Setiawan, Agus. 2016. *Perancangan Struktur Beton Bertulang*. ed. Lameda Simarmata. Jakarta: Erlangga.

SNI 2847 2013. 2013. “Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung.” *Bandung: Badan Standardisasi Indonesia*: 1–265.

Suharjanto. 2013. *Rekayasa Gempa*. Yogyakarta: Kepel Press.

Thompson, M K, J O Jirsa, J E Breen, and R E Klingner. 2002. “Anchorage Behavior of Headed Reinforcement : LITERATURE REVIEW.” *Structural Concrete* CRT 1855-1(22).

Vecchio, Frank J. 2000. “The Distributed Stress Field Model Fo Reinforced Concrete.” *Journal of Structure Engineering*.

Vecchio, Frank J., and Michael P Collins. 1986. “The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Element Subjected to Shear.” *ACI Journal*.

Wallace, J. W., S. W. McConnell, P. Gupta, and P. A. Cote. 1998. “Use of Headed Reinforcement in Beam-Column Joints Subjected to Earthquake Loads.” *ACI Structural Journal* 95(5): 590–606.

Wong, P S, Frank J Vecchio, and H. Trommels. 2013. “VecTor2 and Formworks User’s Manual.” *University of Toronto*.
http://www.vectoranalysisgroup.com/user_manuals/manual1.pdf.

Yang, Hong, Wentong Zhao, Zhenzhen Zhu, and Jianping Fu. 2018. “Seismic Behavior Comparison of Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joints Based on Different Loading Methods.” *Engineering Structures* 166: 31–45.

BIODATA PENULIS



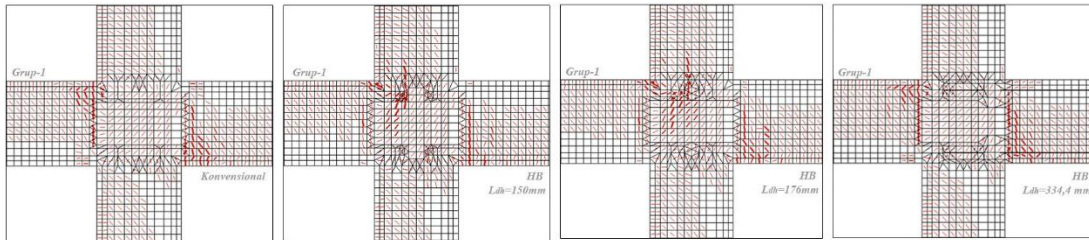
Nama : Yohanes Gualbertus Guswanto Lesu Duran
Tempat, Tanggal Lahir : Maumere, 18 agustus 1990
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Alamat : Talibura, Kabupaten Sikka, Nusa Tenggara Timur
Email : talibura1990@gmail.com
Pendidikan Formal : SDK 041 Talibura (2003)
SMPK St. Yohanes Berchmans Toda-Belu (2006)
SMAK Syuradikara (2009)
Institut Teknologi Nasional, Malang (2014)
Publikasi Jurnal : Jurnal Aplikasi Teknik Sipil

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

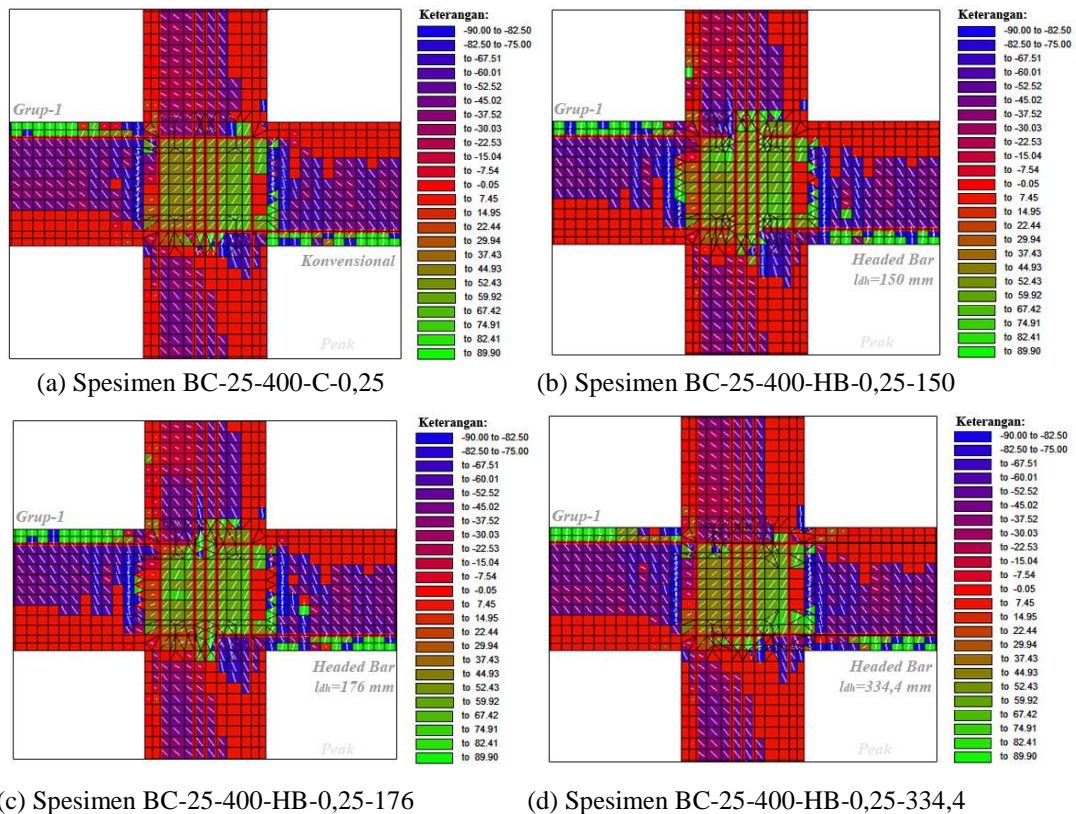
LAMPIRAN

Lampiran 1A

Output vector2 berupa pola retak dan sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c'=25$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y=400$ MPa)



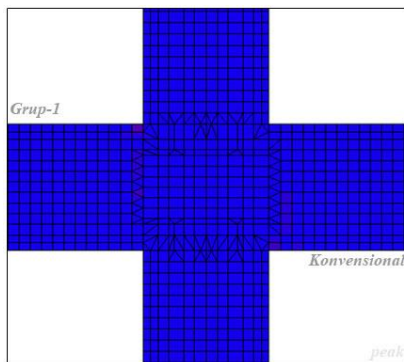
Gambar 1 Pola retak spesimen BC-25-400-C-0,25, BC-25-400-HB-0,25-150, BC-25-400-HB-0,25-176 dan BC-25-400-HB-0,25-334,4 (dari kiri ke kanan)



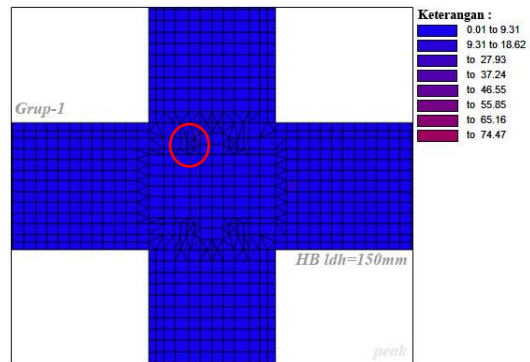
Gambar 2 Sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c'=25$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y=400$ MPa)

Lampiran 1B

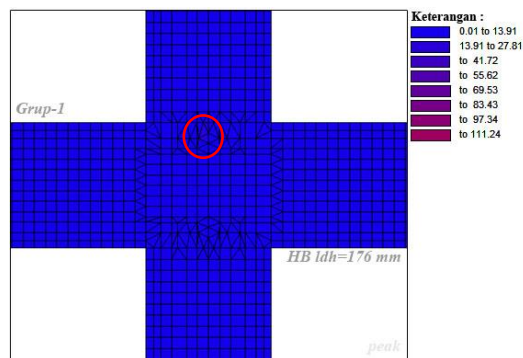
Output vector2 berupa lebar retak spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c'=25$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y=400$ MPa)



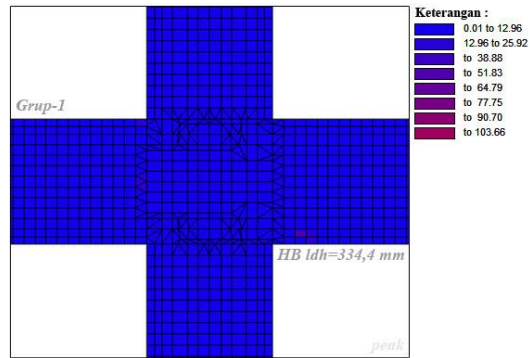
(a) Spesimen BC-25-400-C-0,25



(b) Spesimen BC-25-400-HB-0,25-150



(c) Spesimen BC-25-400-HB-0,25-176

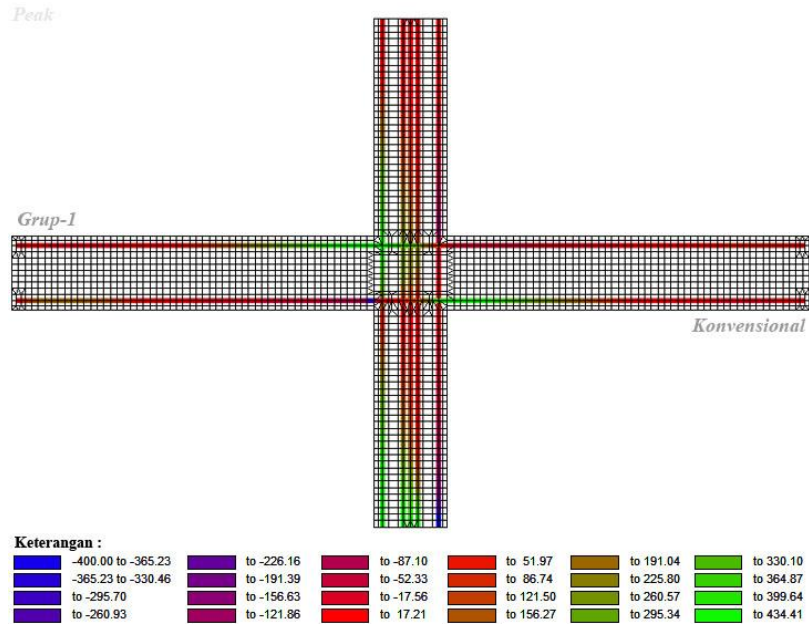


(d) Spesimen BC-25-400-HB-0,25-334,4

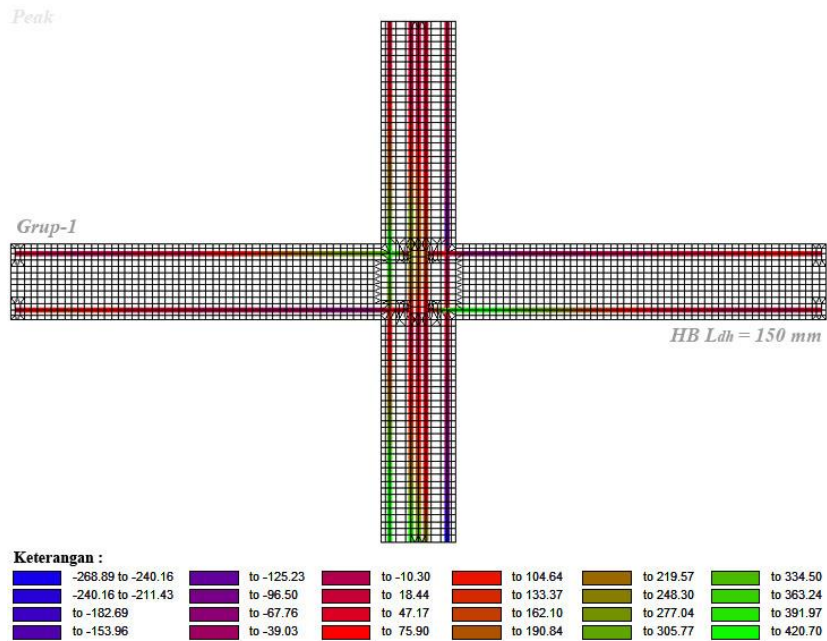
Gambar 3 Lebar Retak Spesimen-Spesimen dengan Beton Mutu Normal ($f_c'=25$ MPa) dan Tulangan Mutu Normal ($f_y=400$ MPa)

Lampiran 1C

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 25$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



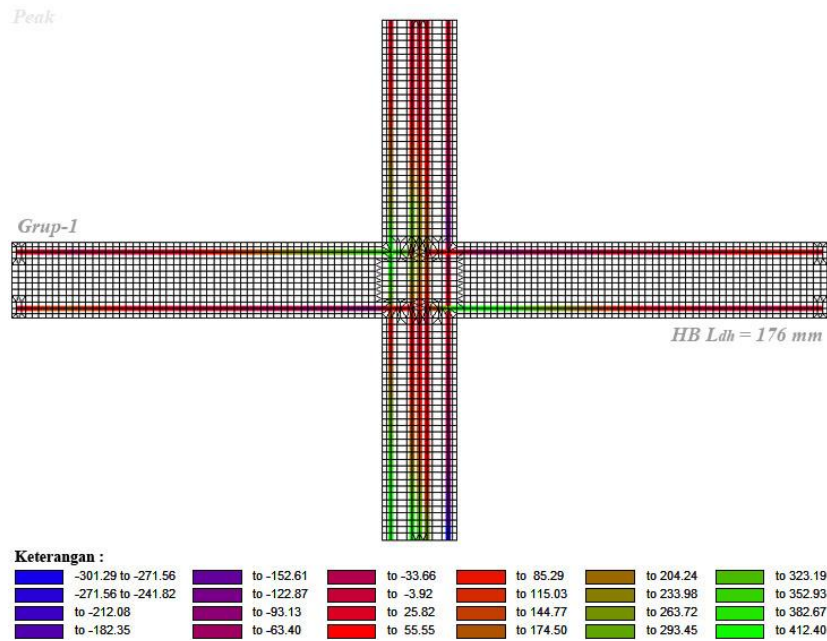
Gambar 4 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-25-400-C-0,25



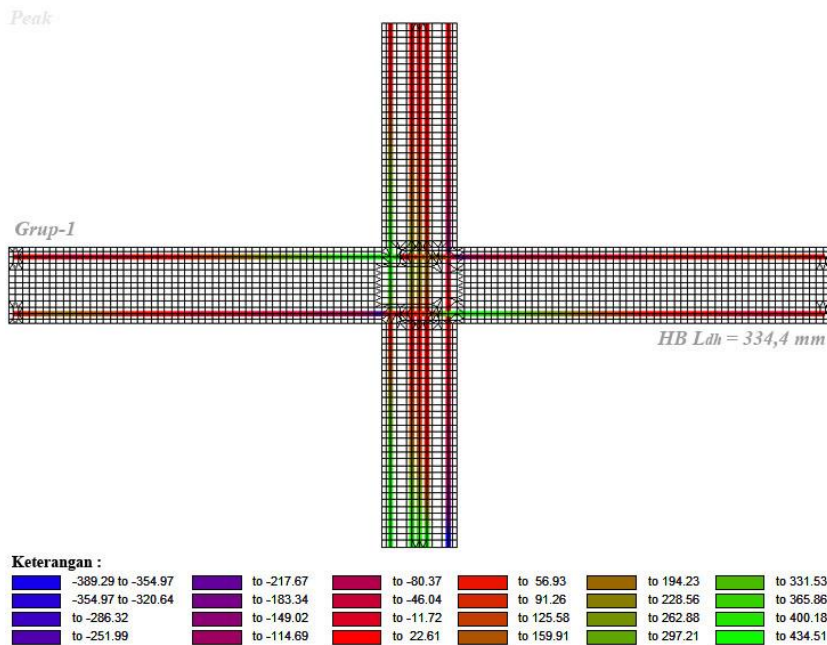
Gambar 5 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-25-400-HB-0,25-150

Lampiran 1D

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 25$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



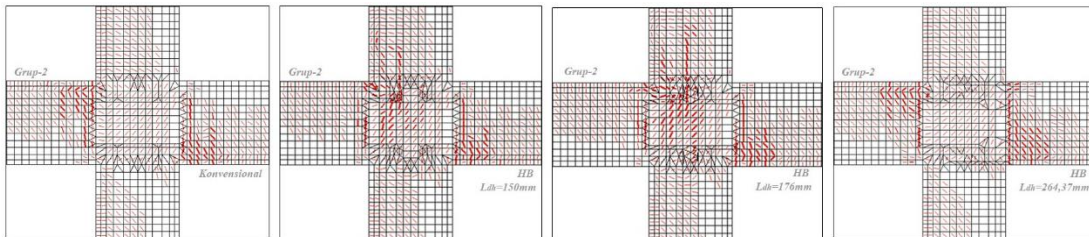
Gambar 6 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-25-400-HB-0,25-176



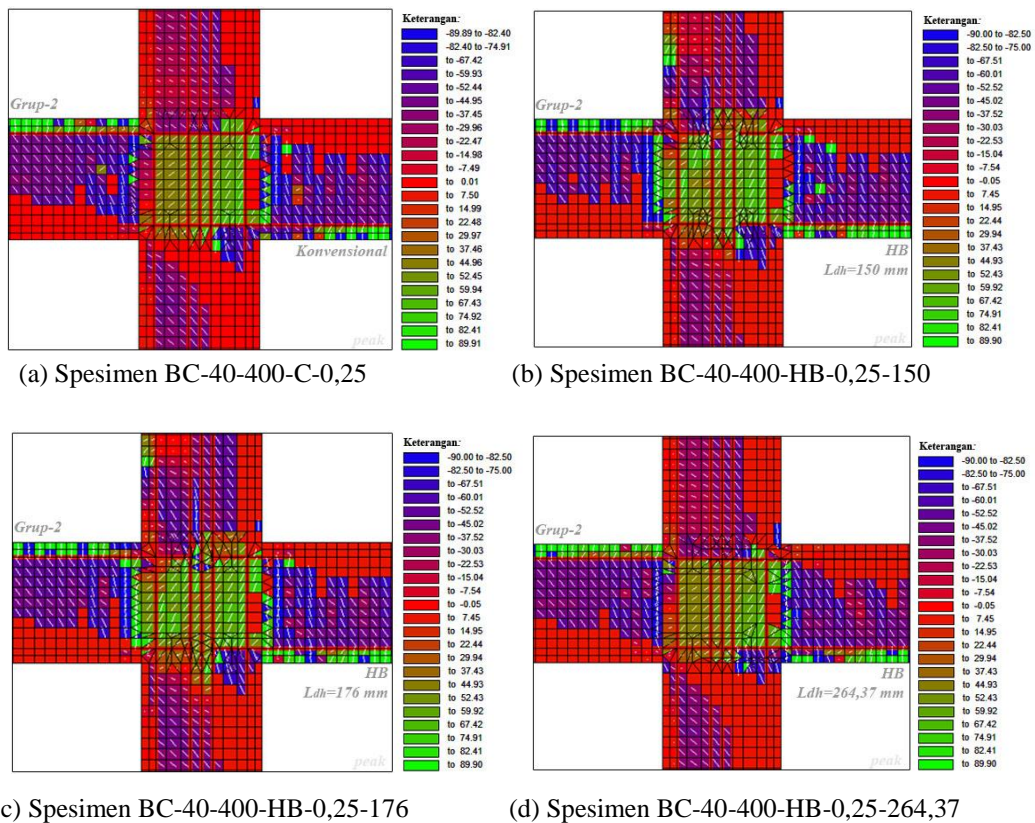
Gambar 7 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-25-400-HB-0,25-334,4

Lampiran 2A

Output vector2 berupa pola retak dan sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 40$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



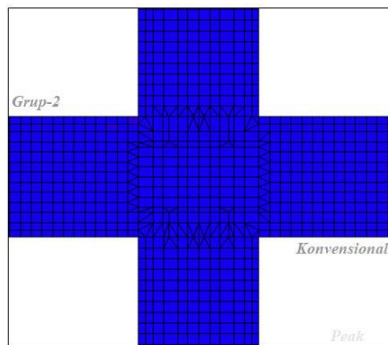
Gambar 8 Pola retak spesimen BC-40-400-C-0,25, BC-40-400-HB-0,25-150, BC-40-400-HB-0,25-176 dan BC-40-400-HB-0,25-264,37 (dari kiri ke kanan)



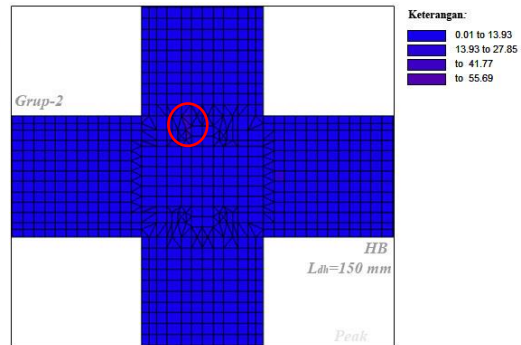
Gambar 9 Sudut geser spesimen-spesimen grup-2

Lampiran 2B

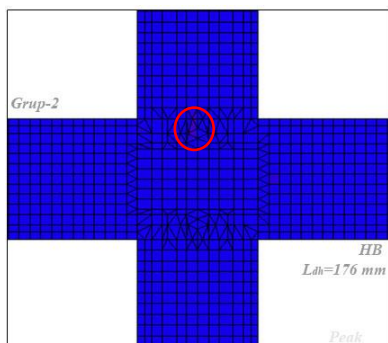
Output vector2 berupa lebar retak spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c'=40$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y=400$ MPa)



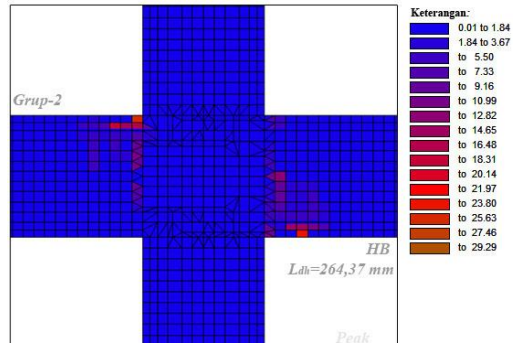
(a) Spesimen BC-40-400-C-0,25



(b) Spesimen BC-40-400-HB-0,25-150



(c) Spesimen BC-40-400-HB-0,25-176

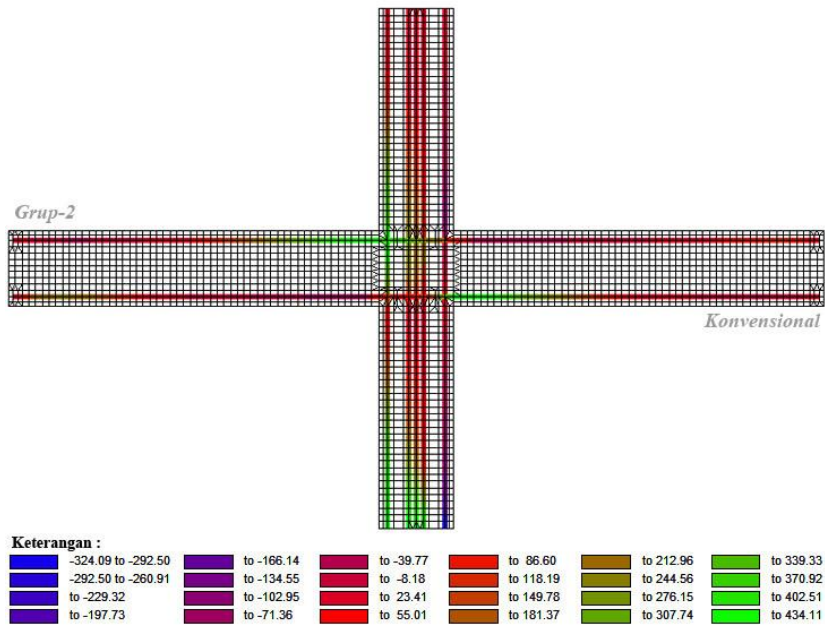


(d) Spesimen BC-40-400-HB-0,25-264,37

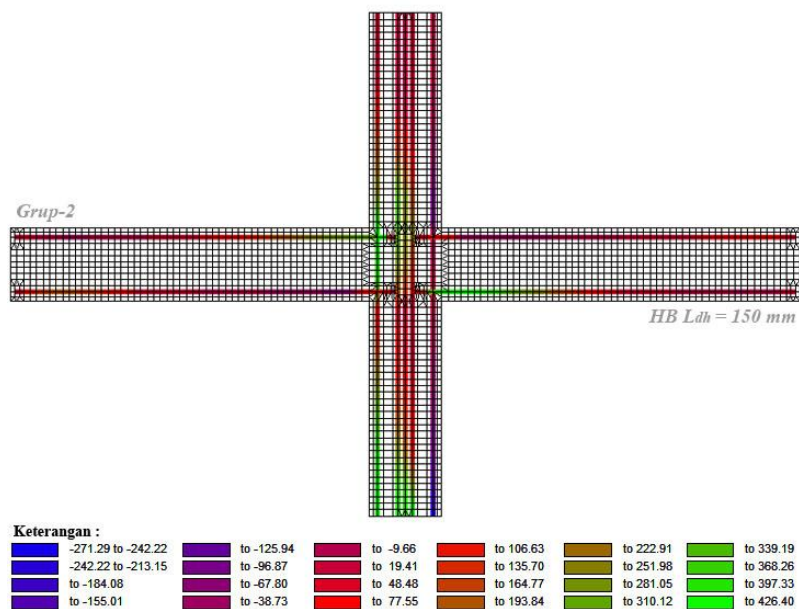
Gambar 10 Lebar retak spesimen-spesimen grup-2

Lampiran 2C

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 40$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



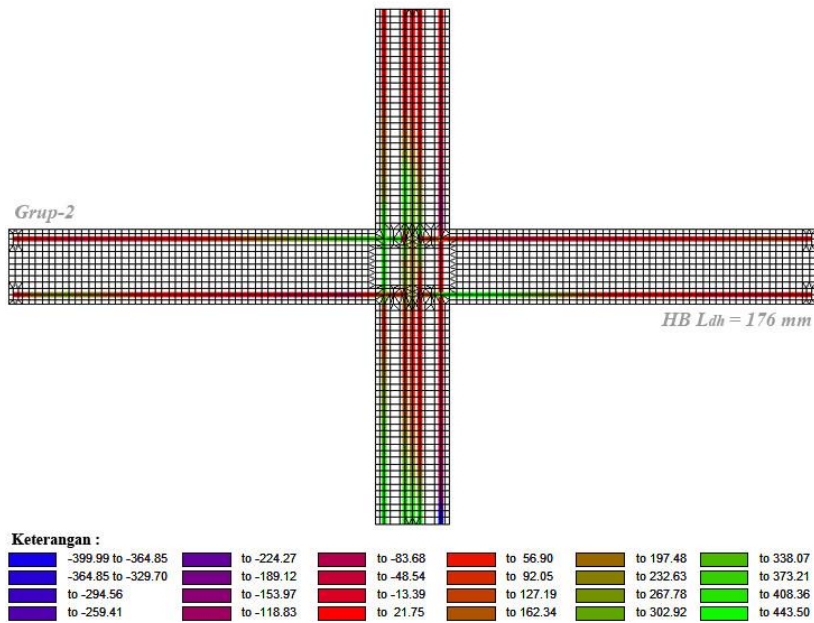
Gambar 11 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-40-400-C-0,25



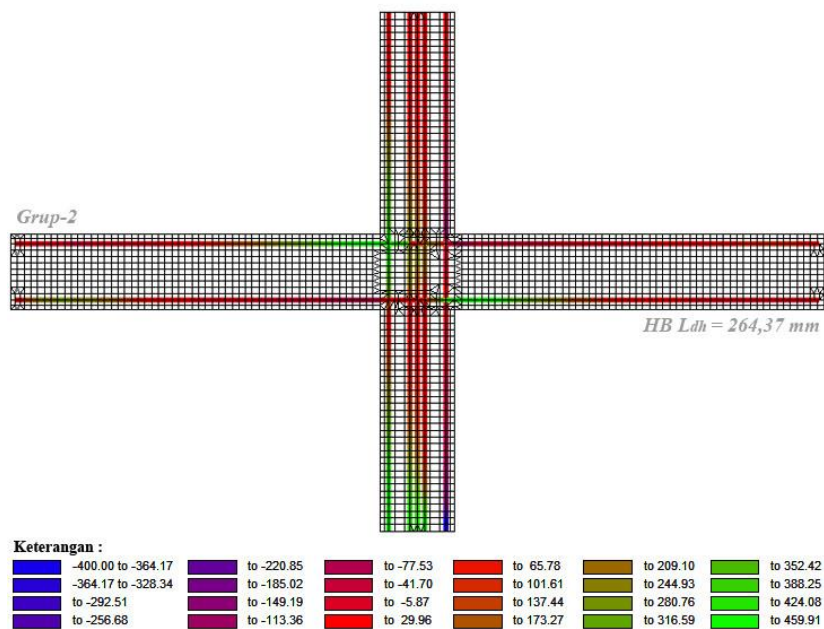
Gambar 12 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-40-400-HB-0,25-150

Lampiran 2D

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 40$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



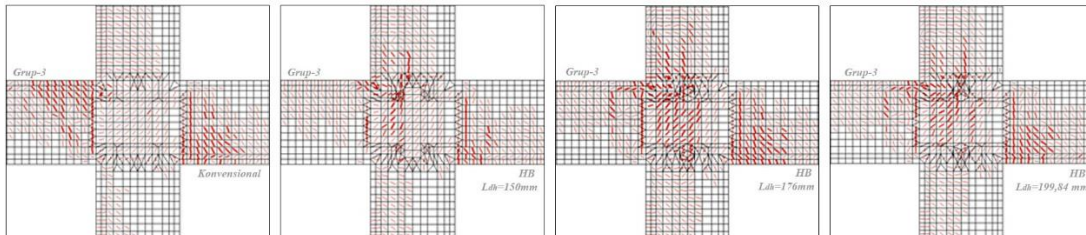
Gambar 13 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-40-400-HB-0,25-176



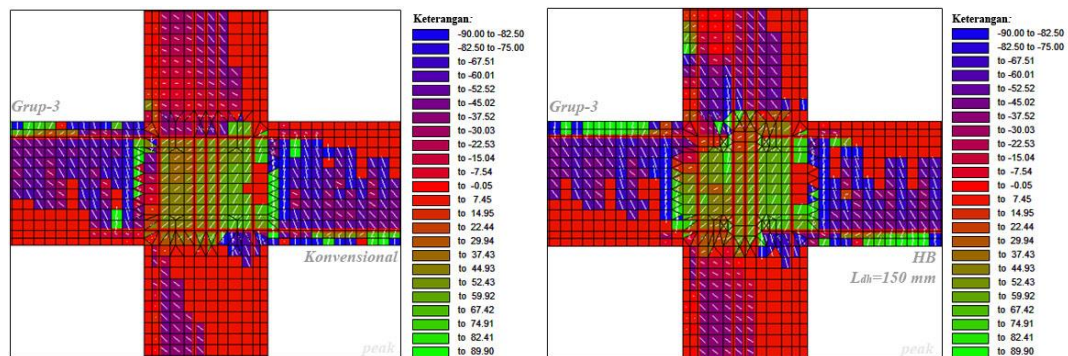
Gambar 14 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-40-400-HB-0,25-264,37

Lampiran 3A

Output vector2 berupa pola retak dan sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 70$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)

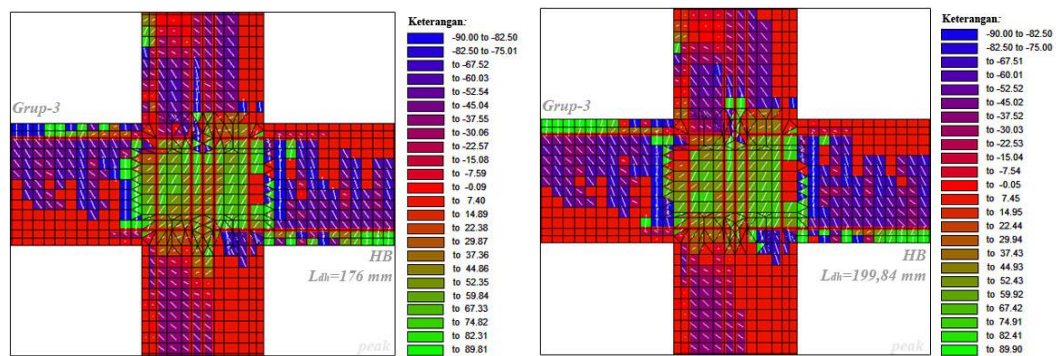


Gambar 15 Pola retak spesimen spesimen BC-70-400-C-0,25, BC-70-400-HB-0,25-150, BC-70-400-HB-0,25-176 dan BC-70-400-HB-0,25-199,84 (dari kiri ke kanan)



(a) Spesimen BC-70-400-C-0,25

(b) Spesimen BC-70-400-HB-0,25-150



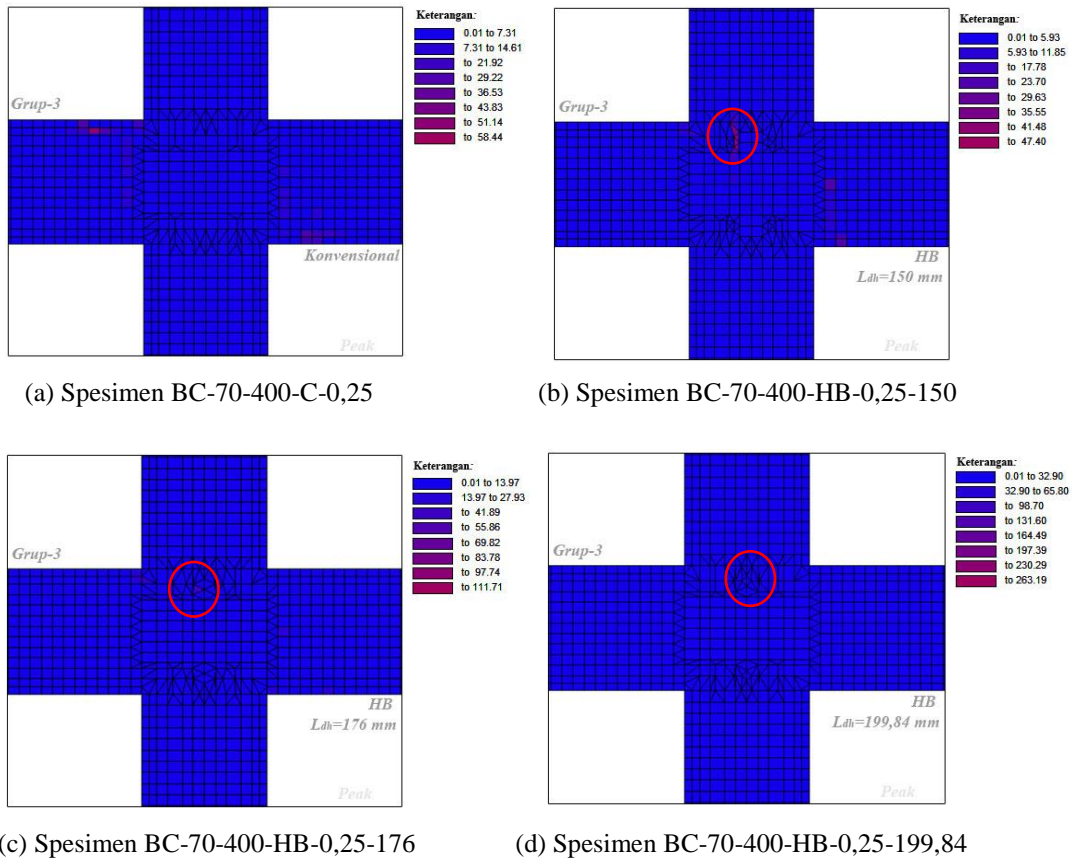
(c) Spesimen BC-70-400-HB-0,25-176

(d) Spesimen BC-70-400-HB-0,25-199,84

Gambar 16 Sudut geser spesimen-spesimen grup-3

Lampiran 3B

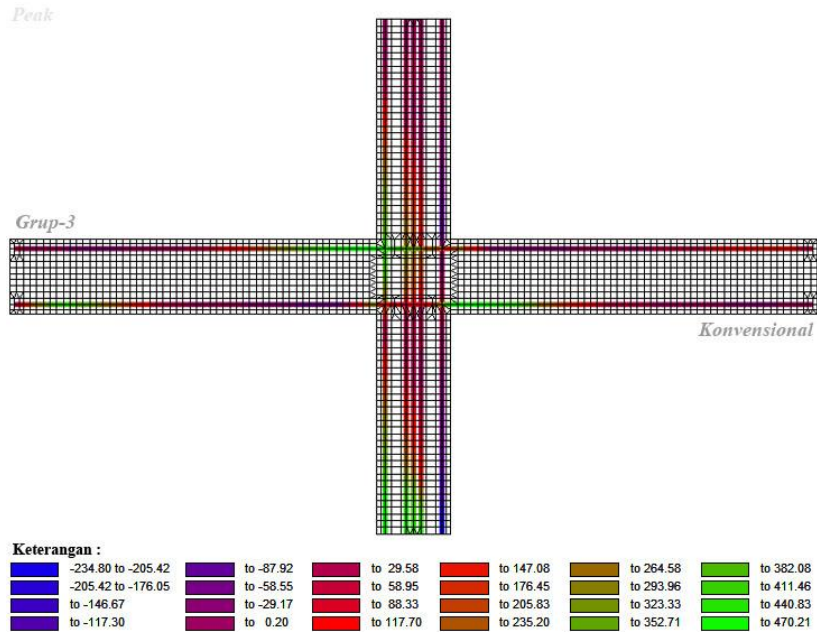
Output vector2 berupa lebar retak spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y=400$ MPa)



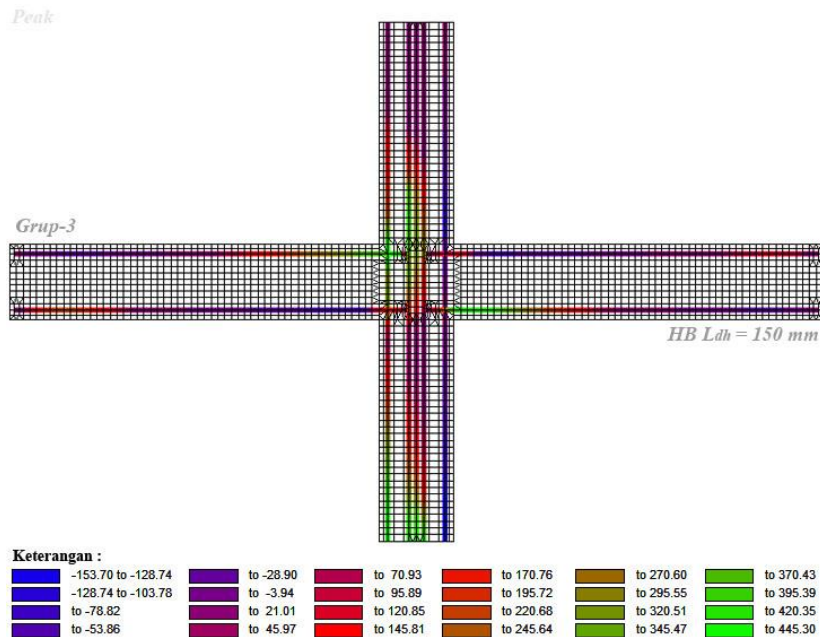
Gambar 17 Lebar retak spesimen-spesimen grup-3

Lampiran 3C

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan mutu tinggi ($f_c' = 70$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



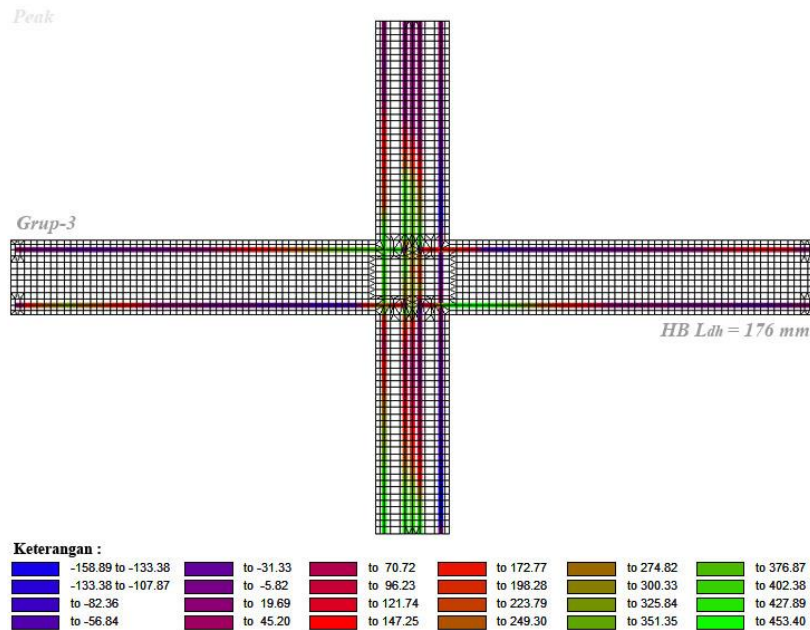
Gambar 18 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-70-400-C-0,25



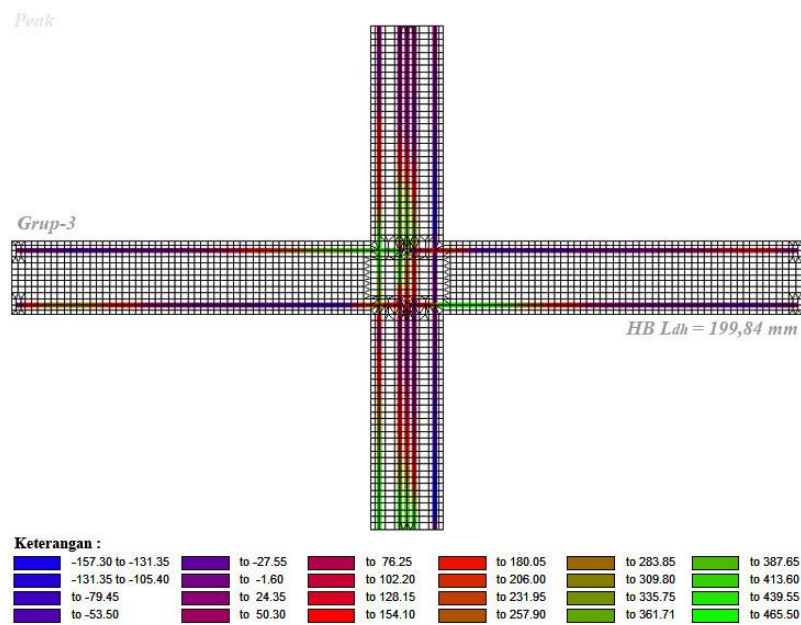
Gambar 19 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-70-400-HB-0,25-150

Lampiran 3D

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan mutu tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y=400$ MPa)



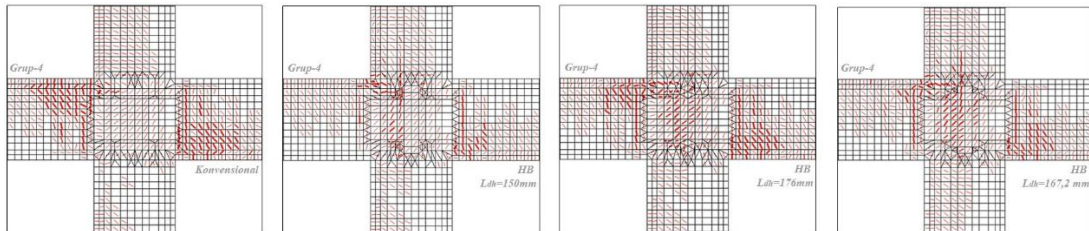
Gambar 20 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-70-400-HB-0,25-176



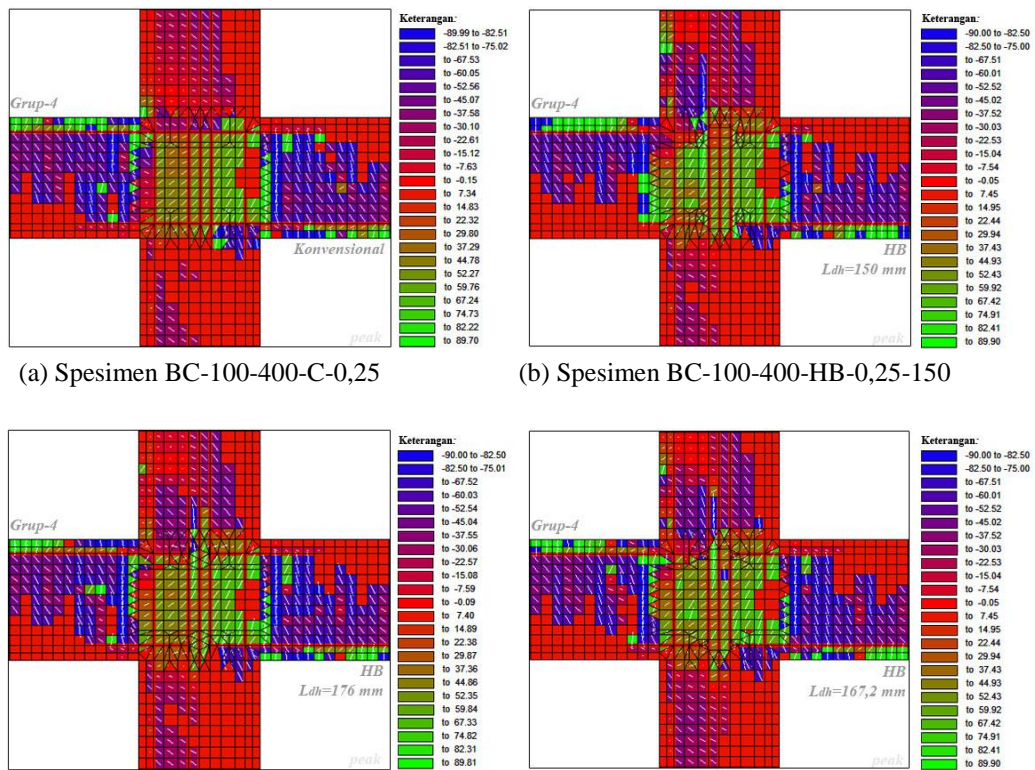
Gambar 21 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-70-400-HB-0,25-200

Lampiran 4A

Output vector2 berupa pola retak dan sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 100$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



Gambar 22 Pola retak spesimen BC-100-400-C-0,25, BC-100-400-HB-0,25-150, BC-100-400-HB-0,25-176 dan BC-100-400-HB-0,25-167 (dari kiri ke kanan)



(a) Spesimen BC-100-400-C-0,25

(b) Spesimen BC-100-400-HB-0,25-150

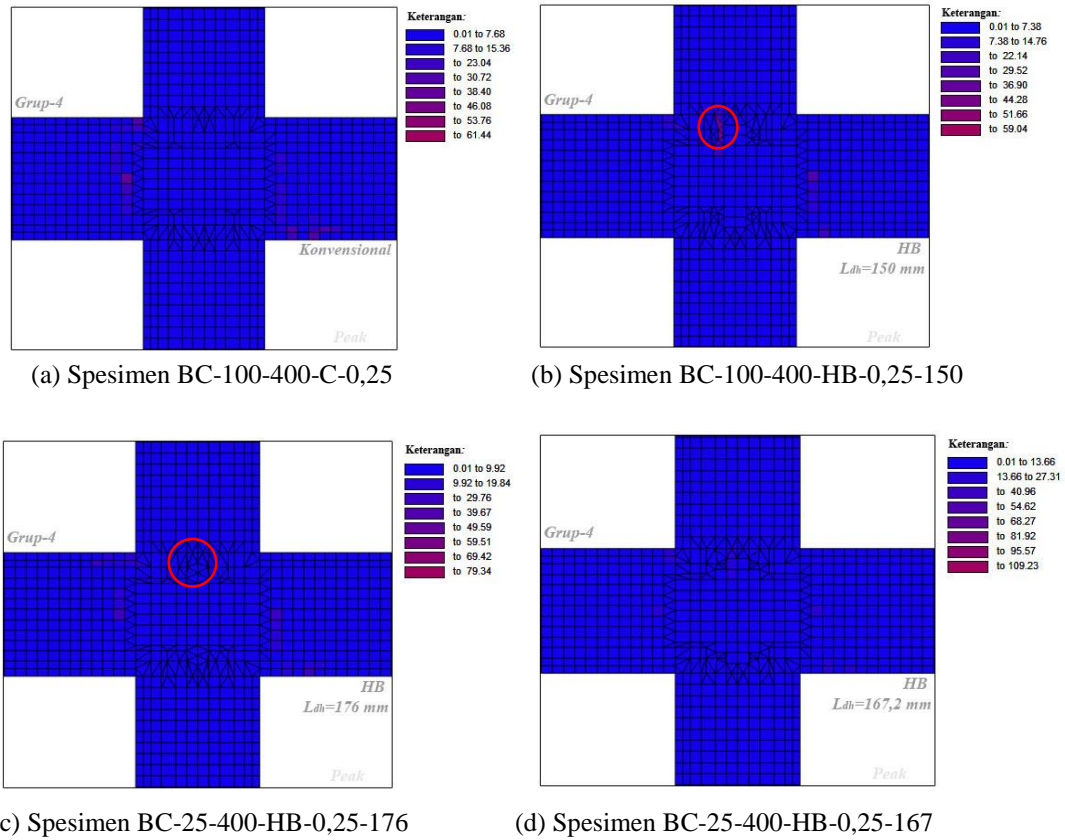
(c) Spesimen BC-100-400-HB-0,25-176

(d) Spesimen BC-100-400-HB-0,25-167

Gambar 23 Sudut geser spesimen-spesimen grup-4

Lampiran 4B

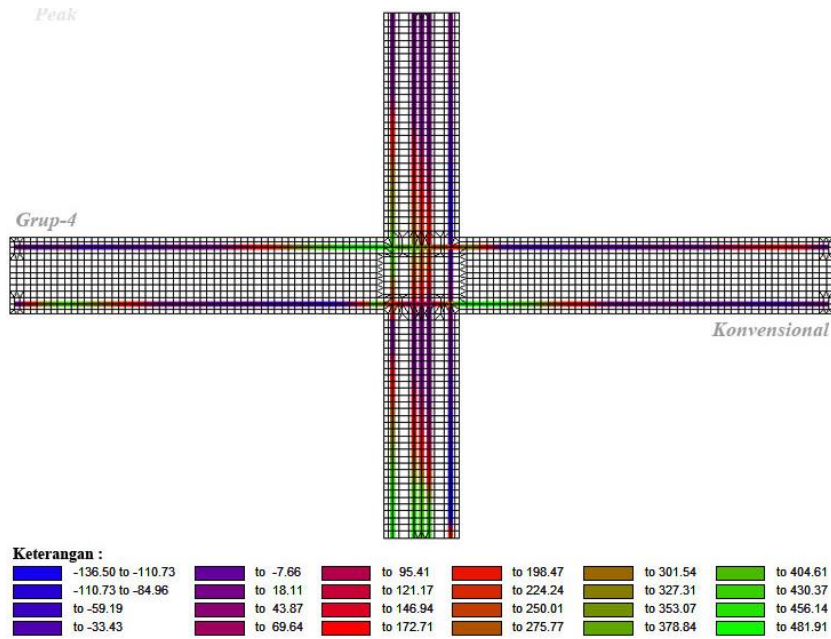
Output vector2 berupa lebar retak spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 100$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



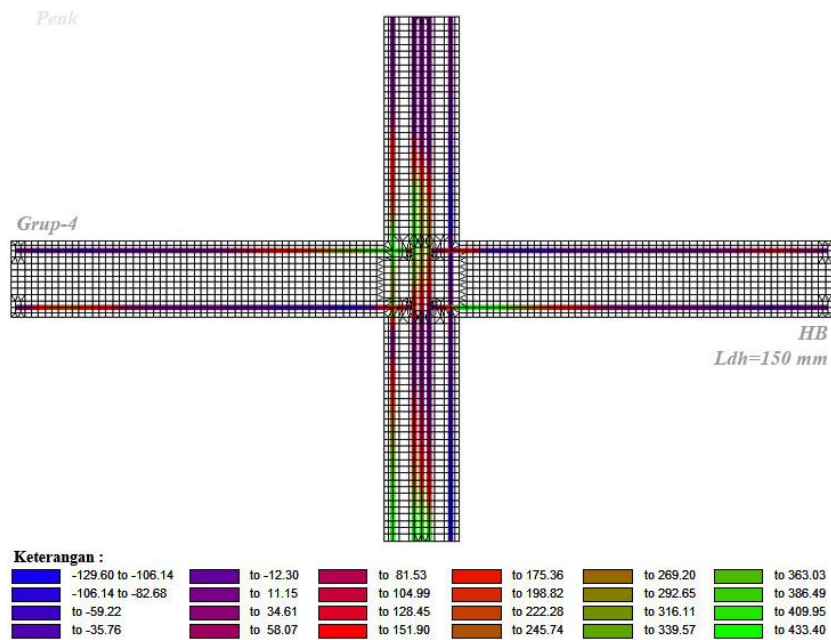
Gambar 24 Lebar retak spesimen-spesimen grup-4

Lampiran 4C

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 100 \text{ MPa}$) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400 \text{ MPa}$)



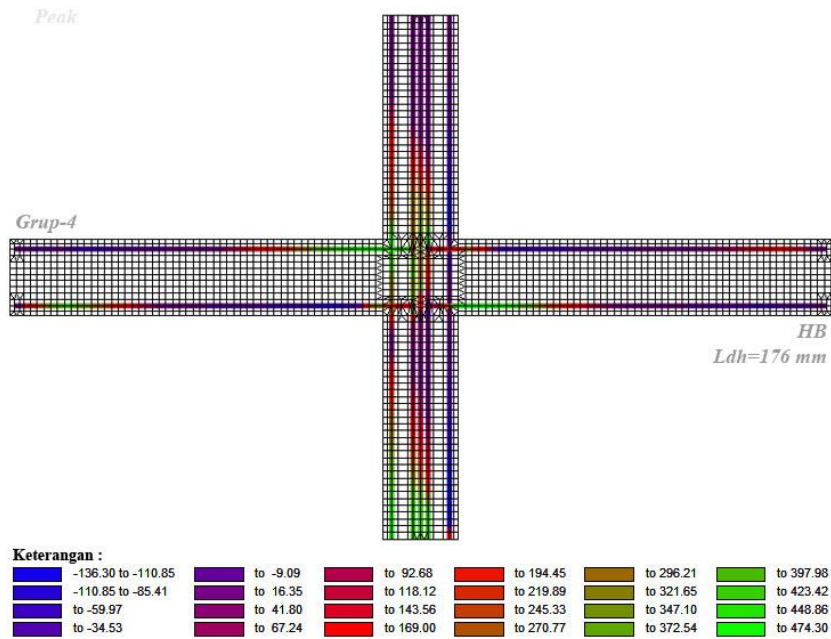
Gambar 25 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-100-400-C-0,25



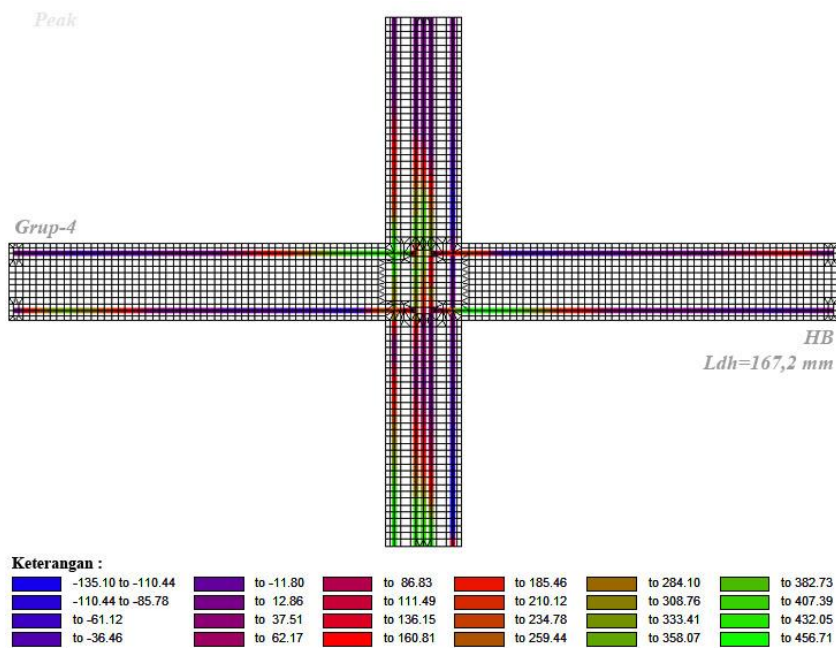
Gambar 26 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-100-400-HB-0,25-150

Lampiran 4D

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 100$ MPa) dan tulangan mutu normal ($f_y = 400$ MPa)



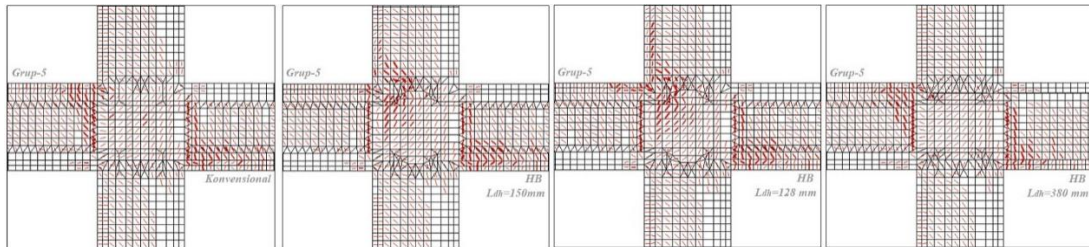
Gambar 27 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-100-400-HB-0,25-176



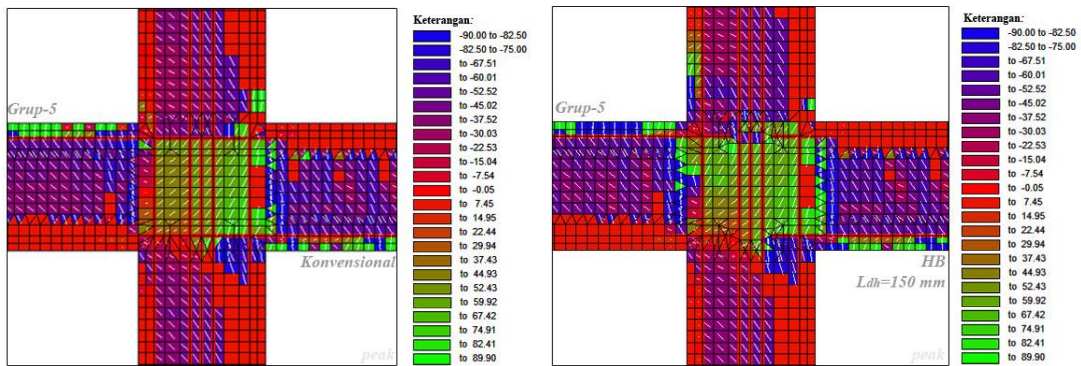
Gambar 28 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-100-400-HB-0,25-167

Lampiran 5A

Output vector2 berupa pola retak dan sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 25$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)

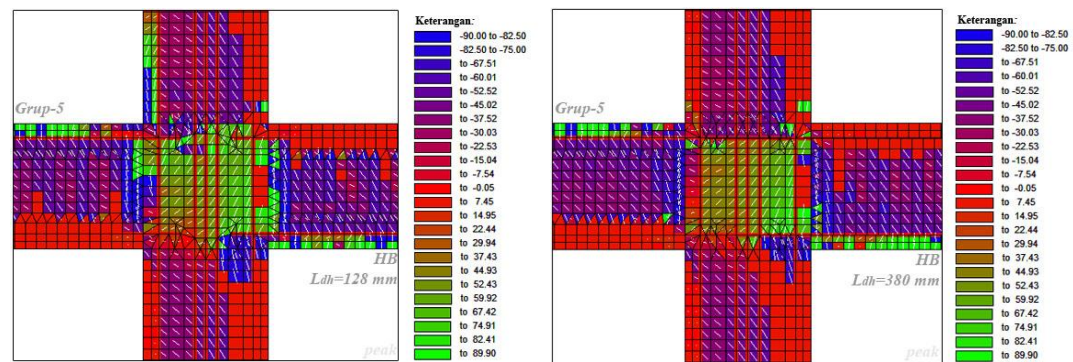


Gambar 29 Pola retak spesimen BC-25-625-C-0,25, BC-25-625-HB-0,25-150, BC-25-625-HB-0,25-128 dan BC-25-625-HB-0,25-380 (dari kiri ke kanan)



(a) Spesimen BC-25-625-C-0,25

(b) Spesimen BC-25-625-HB-0,25-150



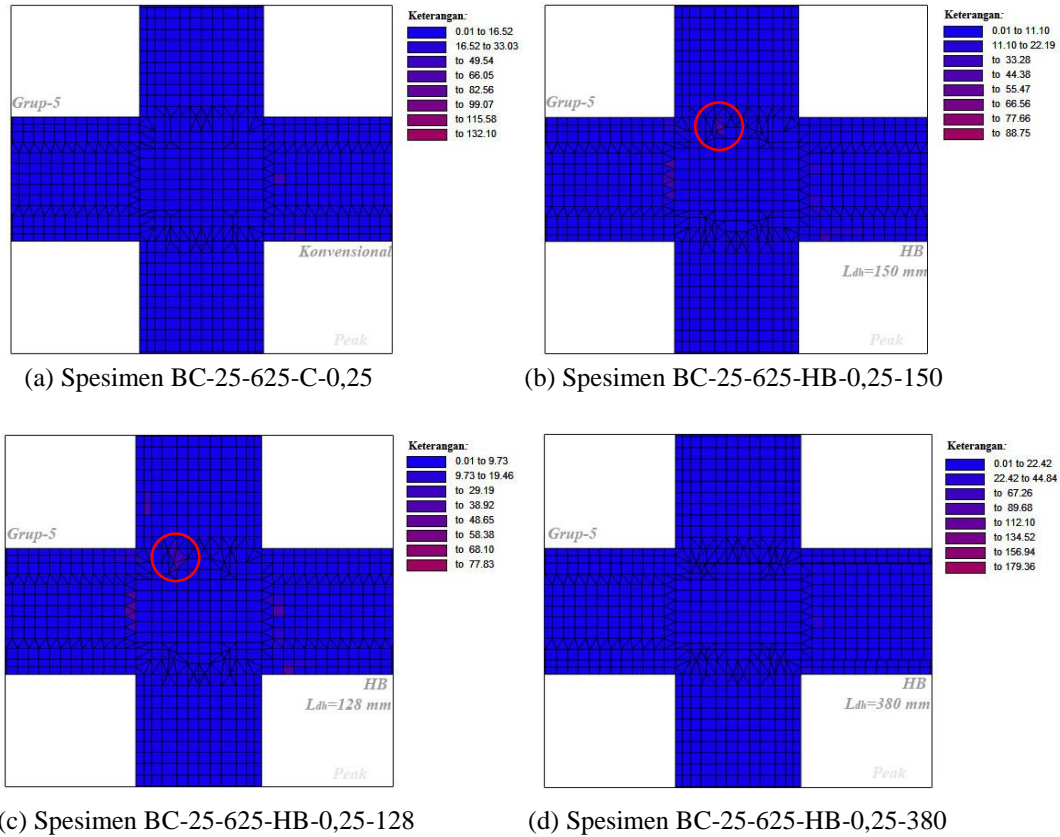
(c) Spesimen BC-25-625-HB-0,25-128

(d) Spesimen BC-25-625-HB-0,25-380

Gambar 30 Sudut geser spesimen-spesimen grup-5

Lampiran 5B

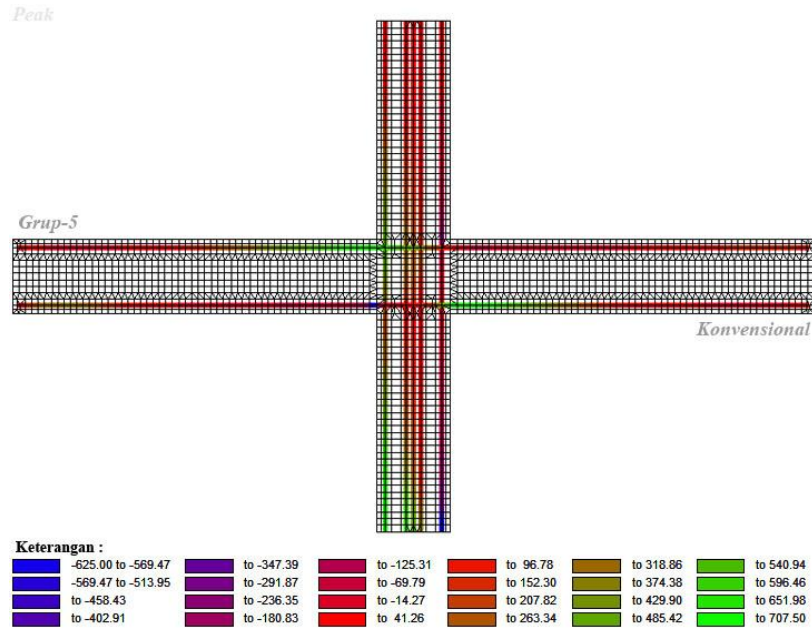
Output vector2 berupa lebar retak spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c'=25$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y=625$ MPa)



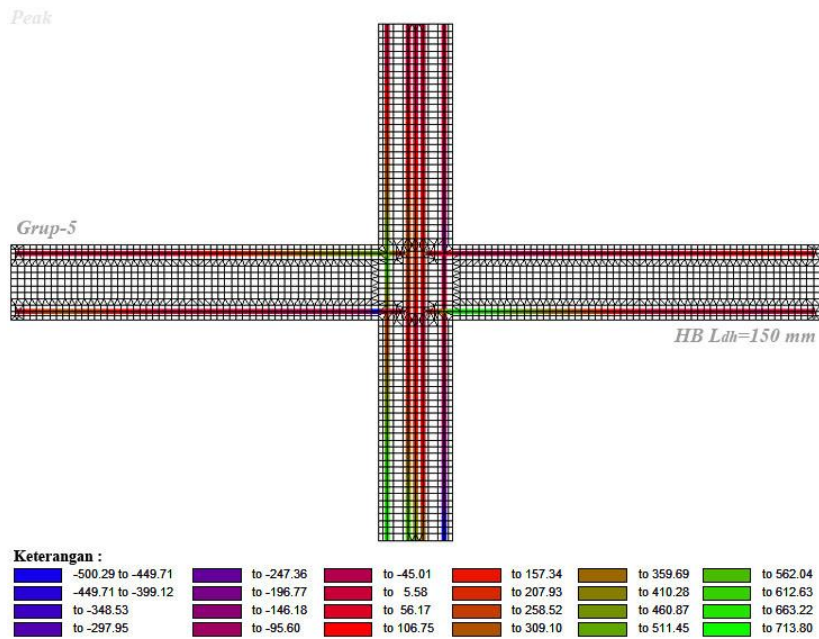
Gambar 31 Lebar retak spesimen-spesimen grup-5

Lampiran 5C

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c'=25$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y=625$ MPa)



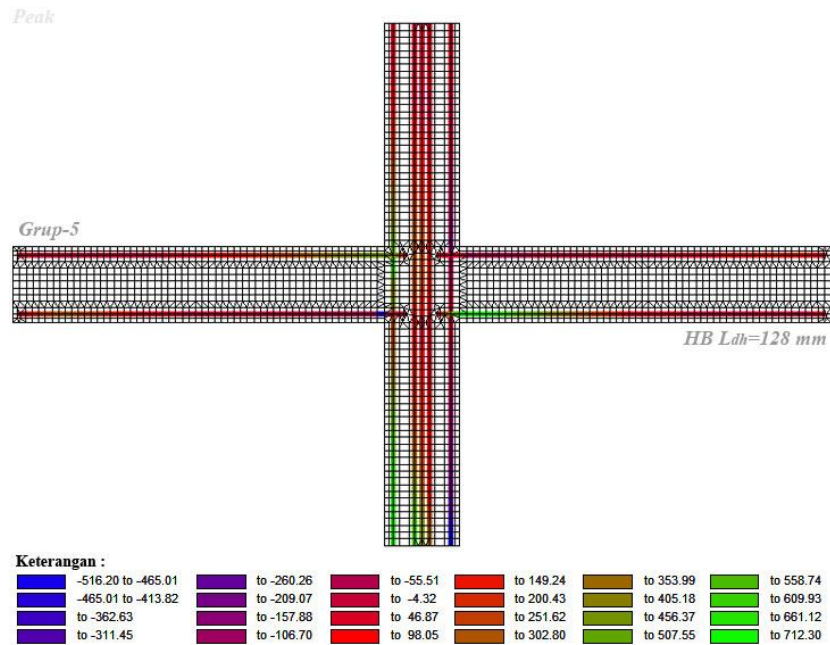
Gambar 32 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-25-625-C-0,25



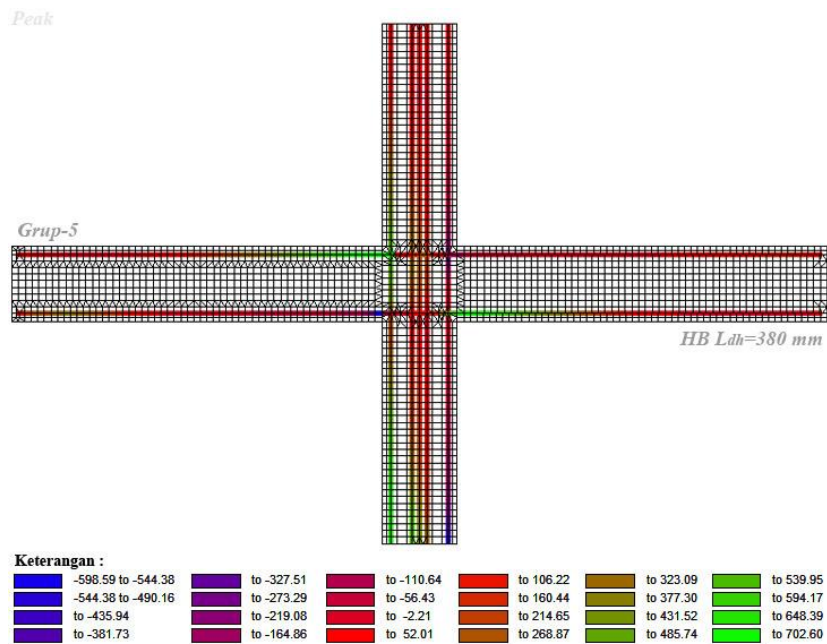
Gambar 33 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-25-625-HB-0,25-150

Lampiran 5D

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 25$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)



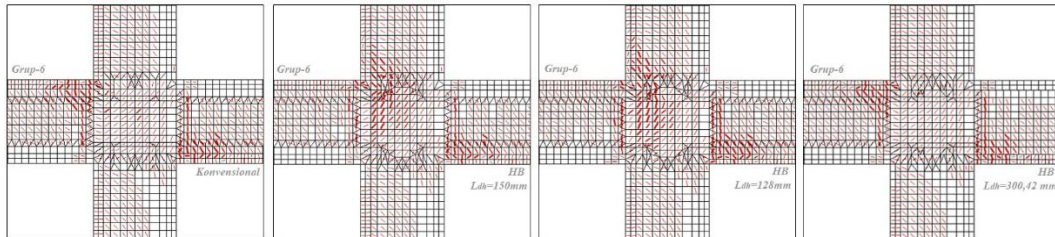
Gambar 34 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-25-625-HB-0,25-128



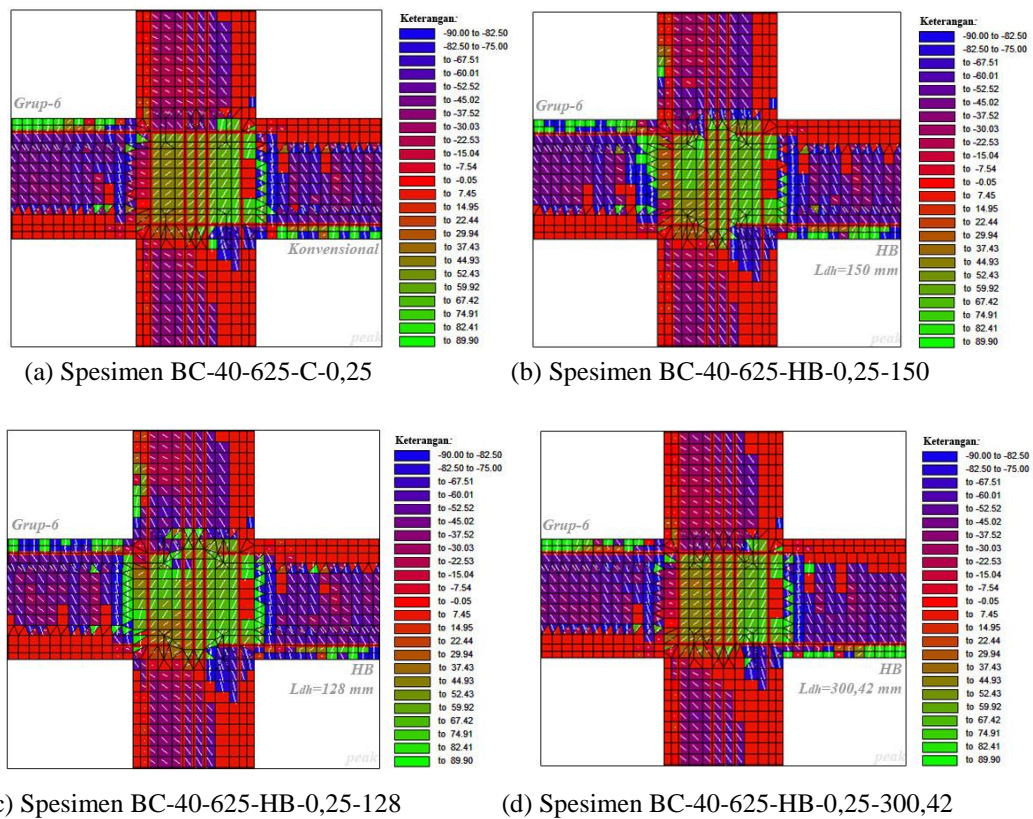
Gambar 35 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-25-625-HB-0,25-380

Lampiran 6A

Output vector2 berupa pola retak dan sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 40$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)



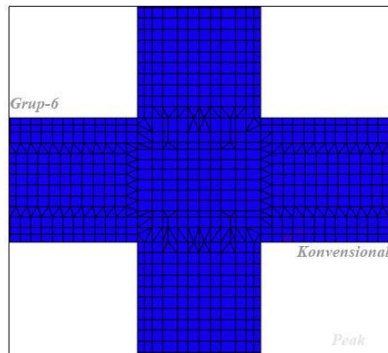
Gambar 36 Pola retak spesimen BC-40-625-C-0,25, BC-40-625-HB-0,25-150, BC-40-625-HB-0,25-128 dan BC-40-625-HB-0,25-300,42 (dari kiri ke kanan)



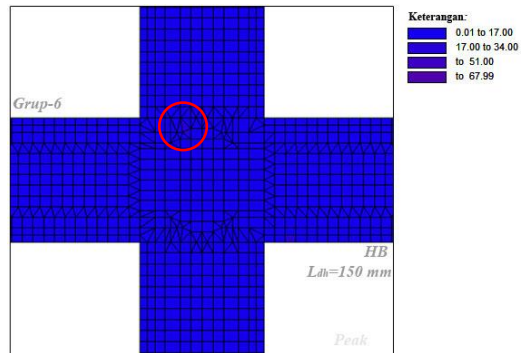
Gambar 37 Sudut geser spesimen-spesimen grup-6

Lampiran 6B

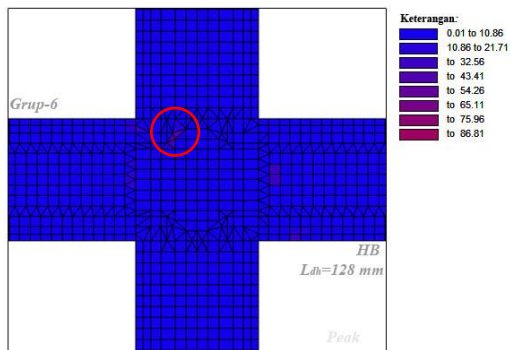
Output vector2 berupa lebar retak spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c'=40$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y=625$ MPa)



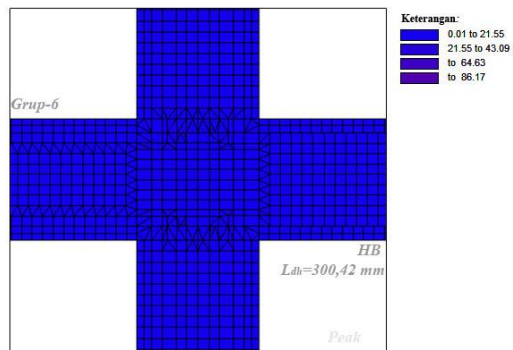
(a) Spesimen BC-40-625-C-0,25



(b) Spesimen BC-40-625-HB-0,25-150



(c) Spesimen BC-40-625-HB-0,25-128

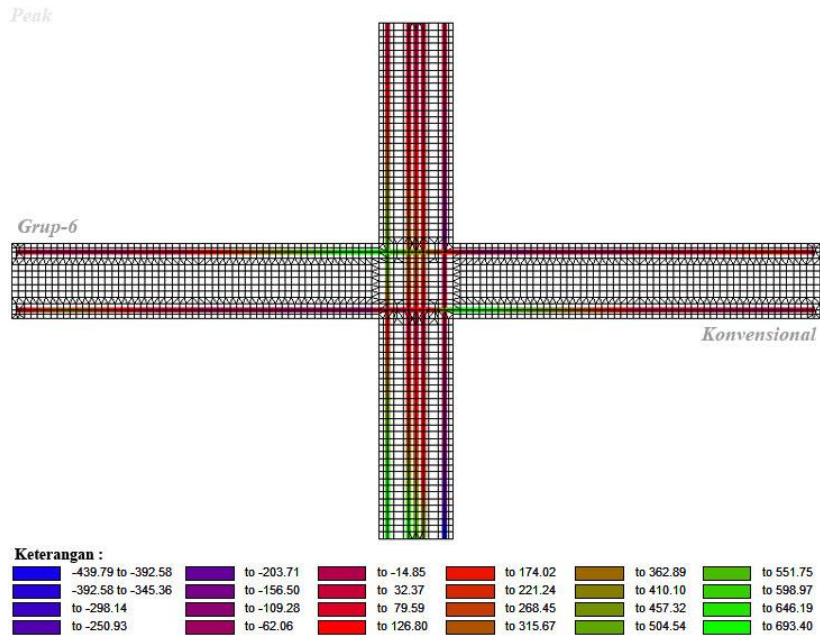


(d) Spesimen BC-40-625-HB-0,25-300,42

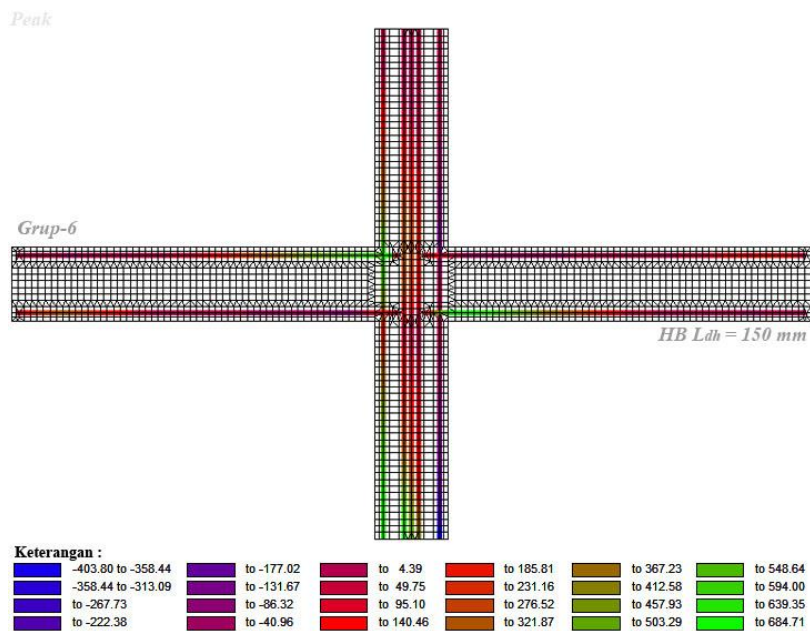
Gambar 38 Lebar retak spesimen-spesimen grup-6

Lampiran 6C

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 40$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)



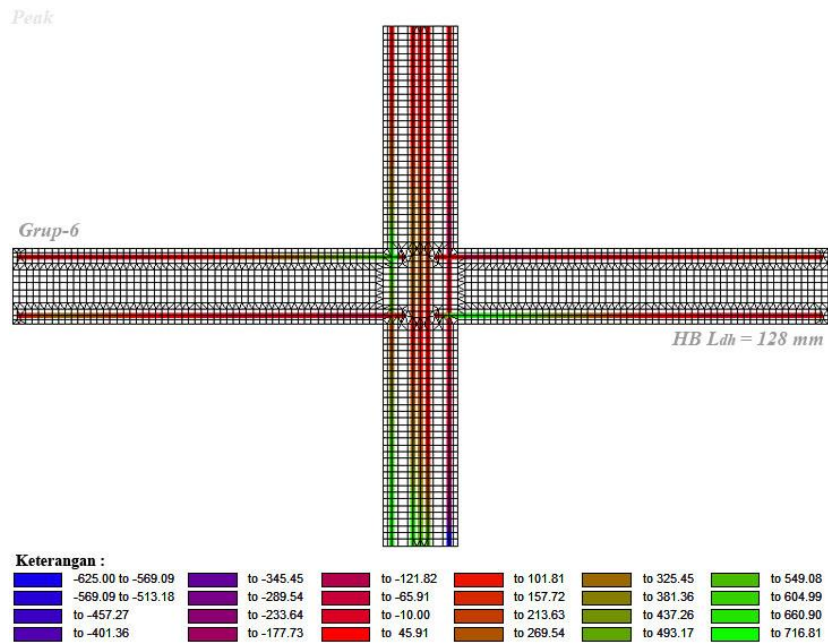
Gambar 39 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-40-625-C-0,25



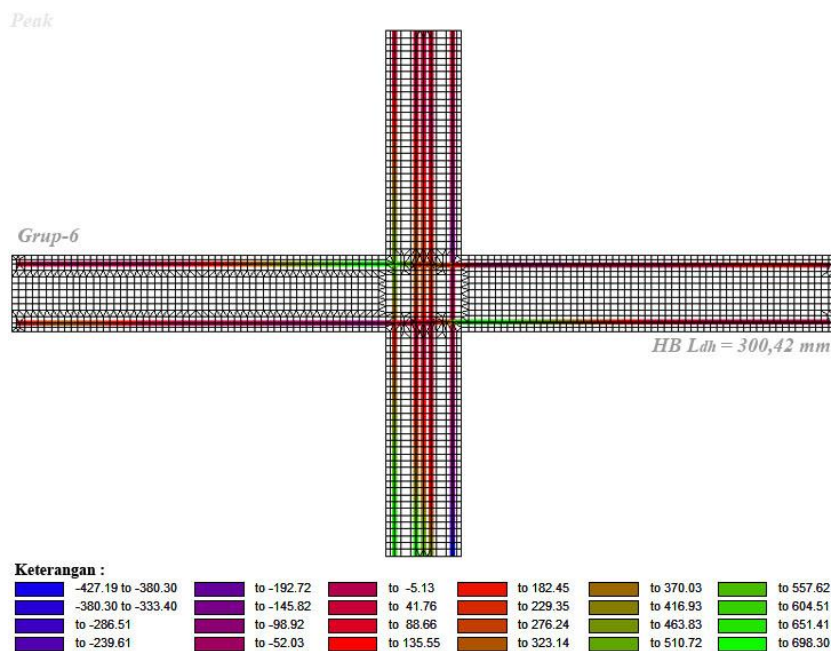
Gambar 40 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-40-625-HB-0,25-150

Lampiran 6D

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu normal ($f_c' = 40$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)



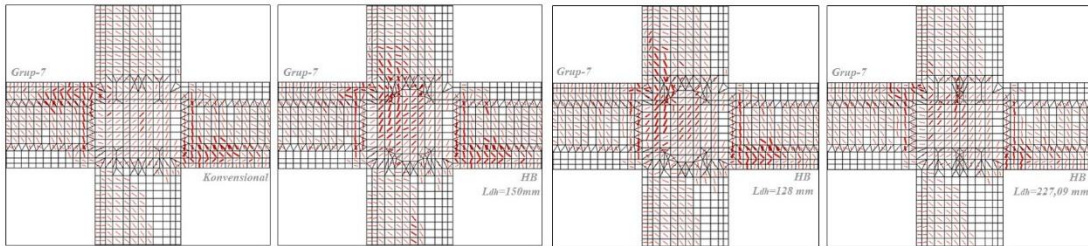
Gambar 41 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-40-625-HB-0,25-128



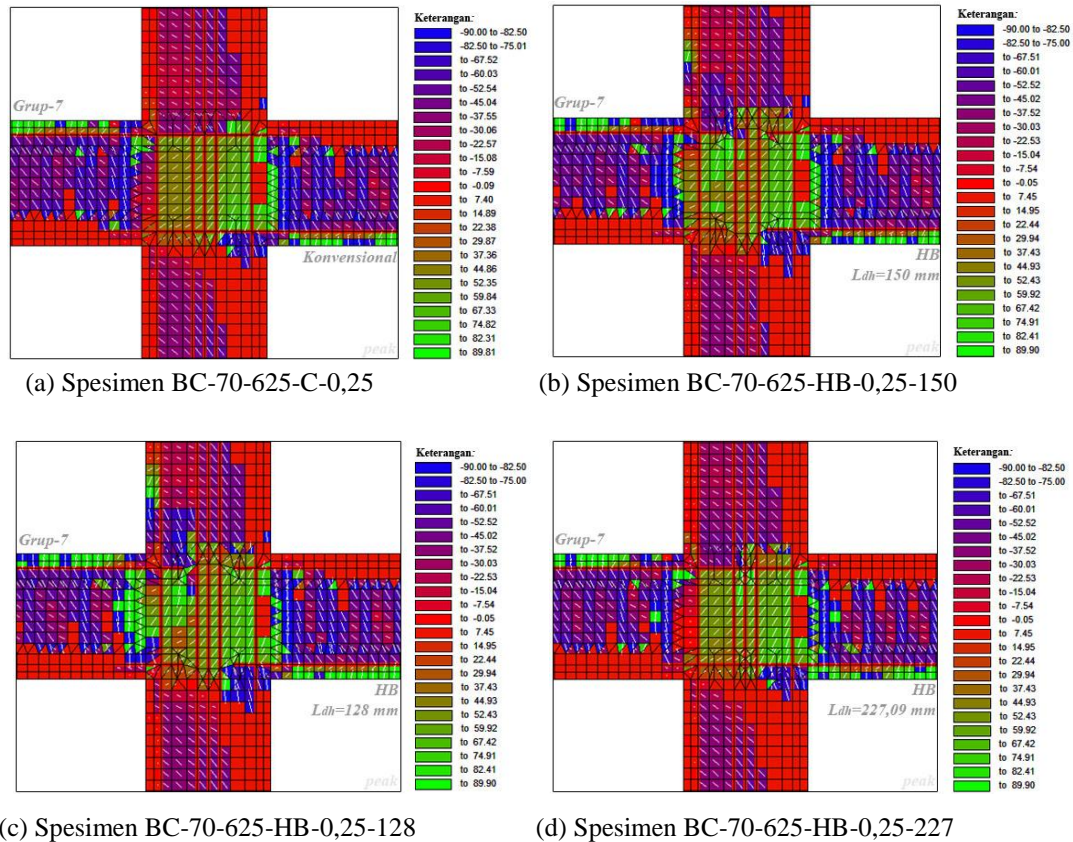
Gambar 42 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-40-625-HB-0,25-300

Lampiran 7A

Output vector2 berupa pola retak dan sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y=625$ MPa)



Gambar 43 Pola retak spesimen BC-70-625-C-0,25, BC-70-625-HB-0,25-150, BC-70-625-HB-0,25-128 dan BC-70-625-HB-0,25-227 (dari kiri ke kanan)

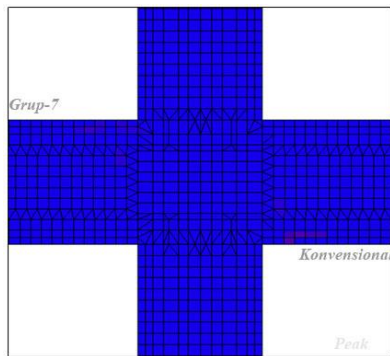


(a) Spesimen BC-70-625-C-0,25 (b) Spesimen BC-70-625-HB-0,25-150 (c) Spesimen BC-70-625-HB-0,25-128 (d) Spesimen BC-70-625-HB-0,25-227

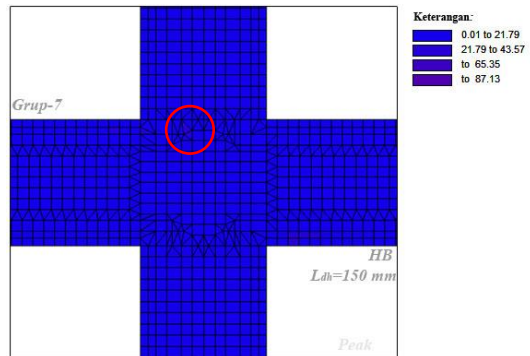
Gambar 44 Sudut geser spesimen-spesimen grup-7

Lampiran 7B

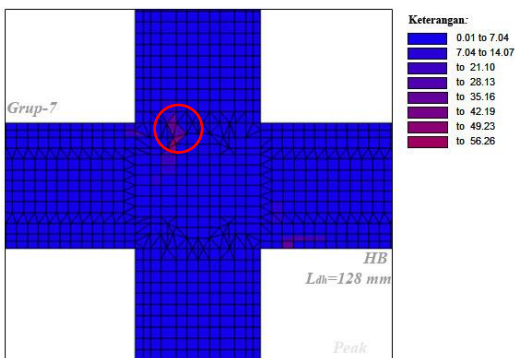
Output vector2 berupa lebar retak spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c'=70$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y=625$ MPa)



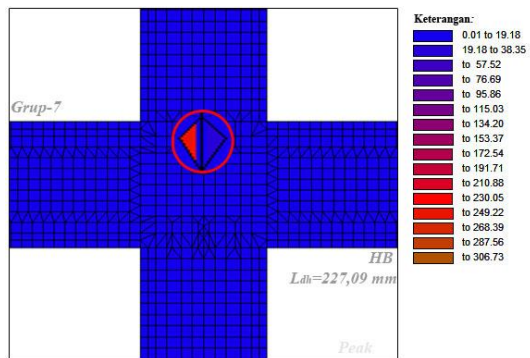
(a) Spesimen BC-70-625-C-0,25



(b) Spesimen BC-70-625-HB-0,25-150



(c) Spesimen BC-70-625-HB-0,25-128

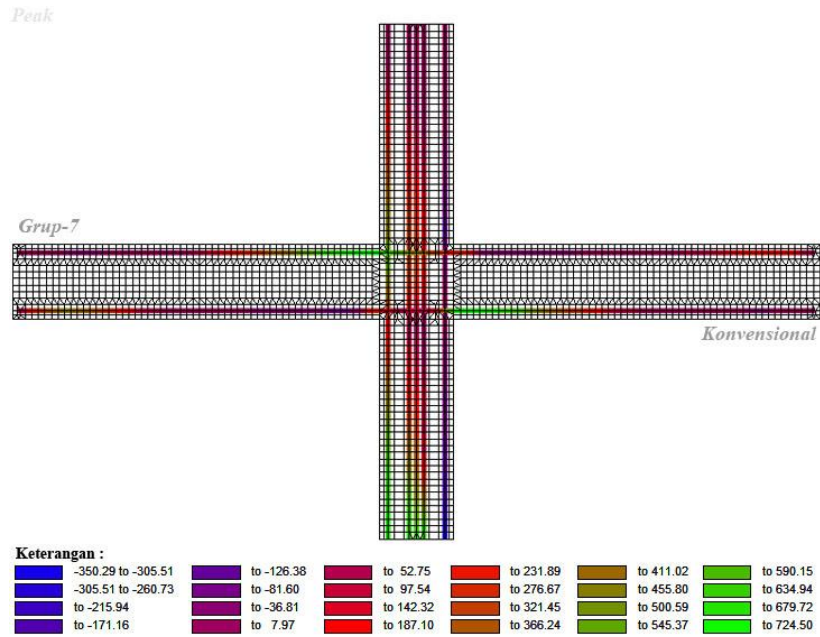


(d) Spesimen BC-70-625-HB-0,25-227

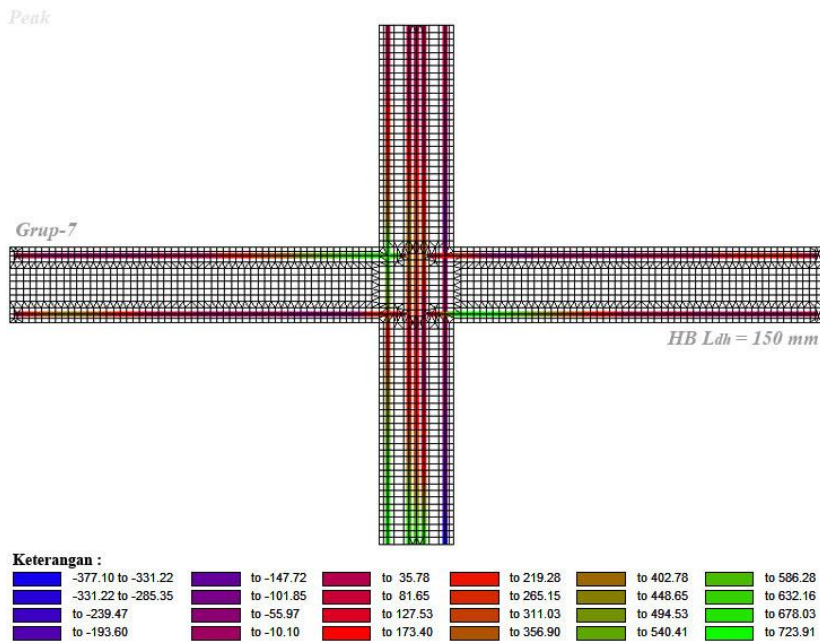
Gambar 45 Lebar retak spesimen-spesimen grup-7

Lampiran 7C

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 70$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)



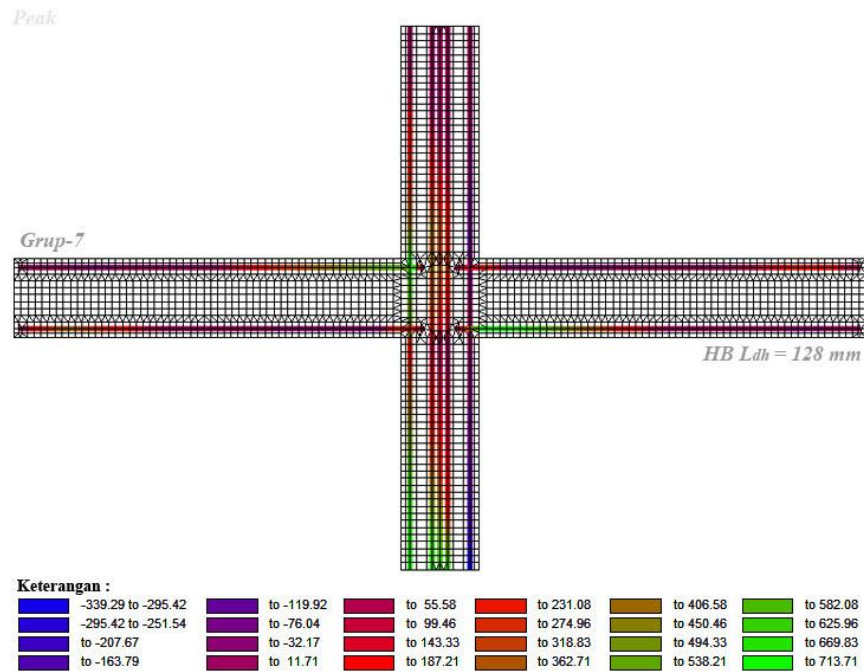
Gambar 46 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-70-625-C-0,25



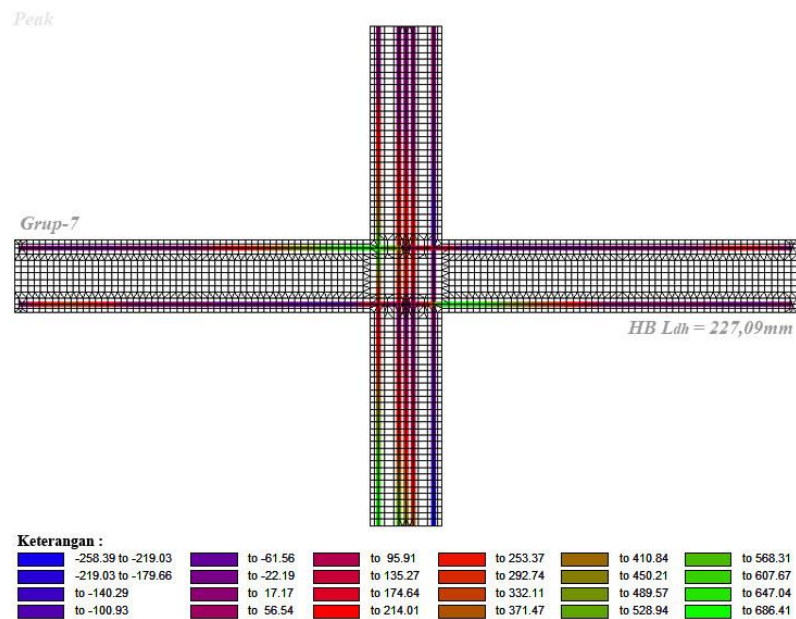
Gambar 47 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-70-625-HB-0,25-150

Lampiran 7D

Output vector2 berupa tegangan geser tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 70$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)



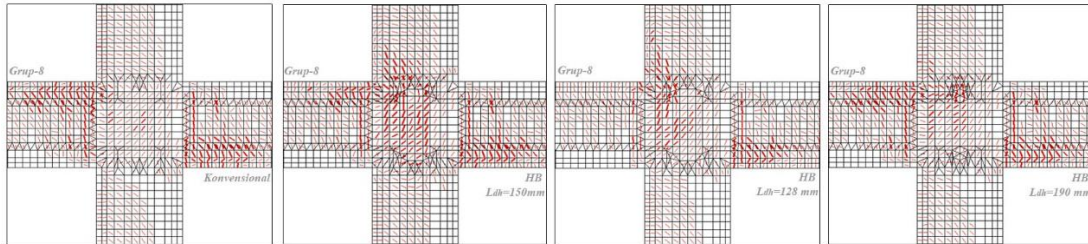
Gambar 48 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-70-625-HB-0,25-128



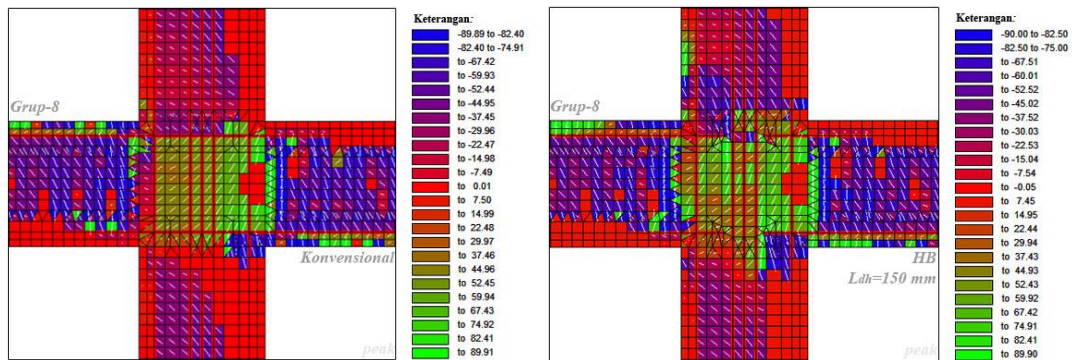
Gambar 49 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-70-625-HB-0,25-227

Lampiran 8A

Output vector2 berupa pola retak dan sudut geser spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 100$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)

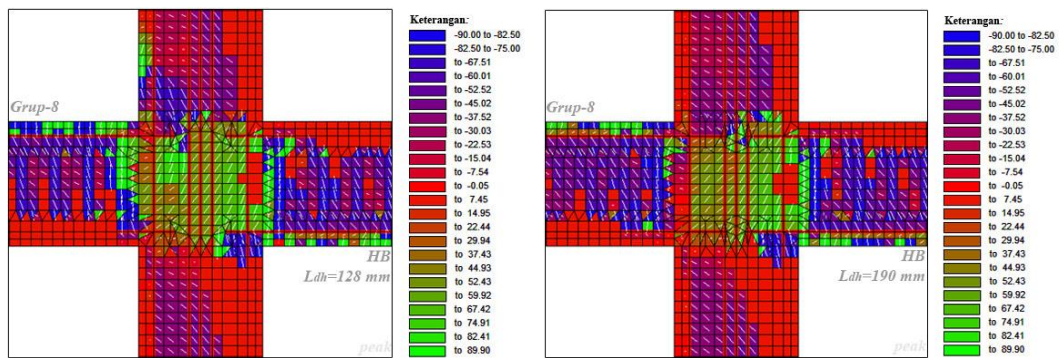


Gambar 50 Pola retak spesimen BC-100-625-C-0,25, BC-100-625-HB-0,25-150, BC-100-625-HB-0,25-128 dan BC-100-625-HB-0,25-190 (dari kiri ke kanan)



(a) Spesimen BC-100-625-C-0,25

(b) Spesimen BC-100-625-HB-0,25-150



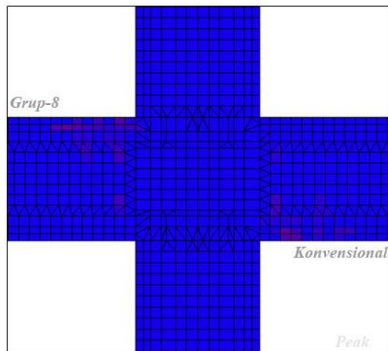
(c) Spesimen BC-100-625-HB-0,25-128

(d) Spesimen BC-100-625-HB-0,25-190

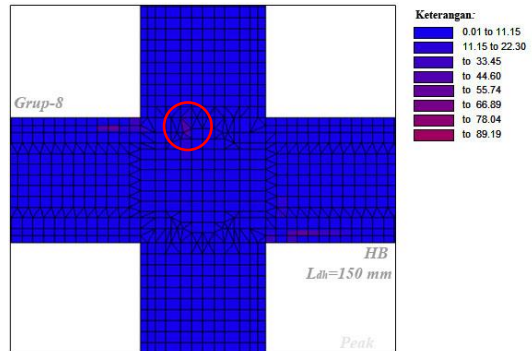
Gambar 51 Sudut geser spesimen-spesimen grup-8

Lampiran 8B

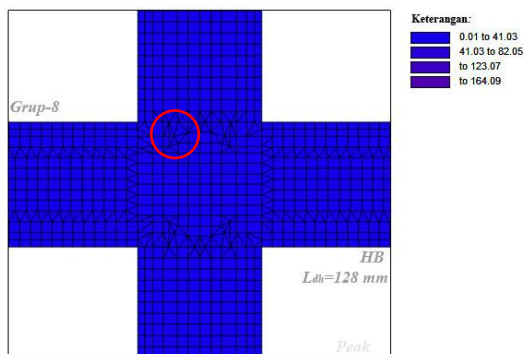
Output vector2 berupa lebar retak spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c'=100$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y=625$ MPa)



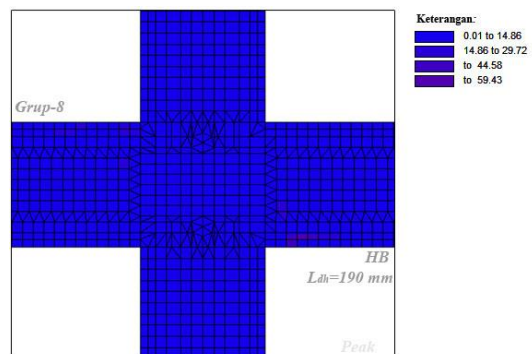
(a) Spesimen BC-100-625-C-0,25



(b) Spesimen BC-100-625-HB-0,25-150



(c) Spesimen BC-100-625-HB-0,25-128

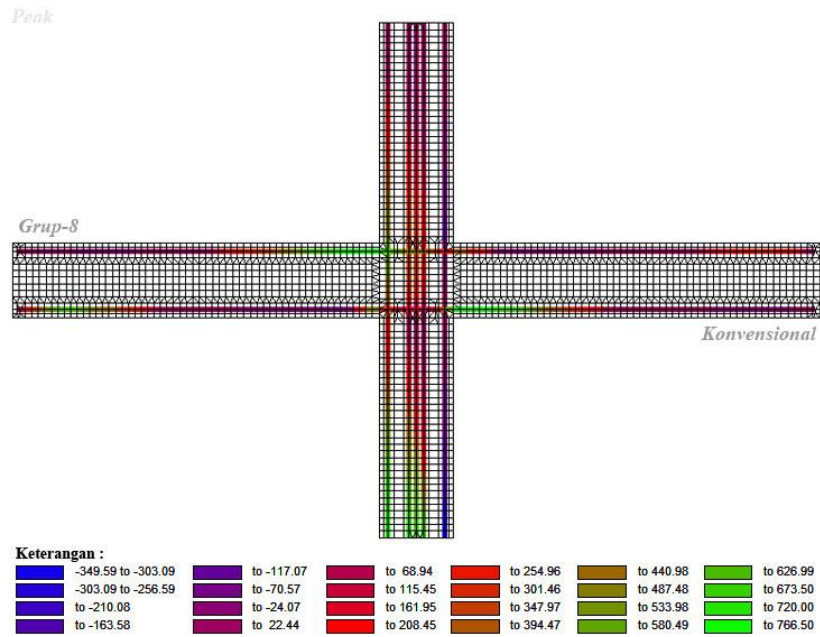


(d) Spesimen BC-100-625-HB-0,25-190

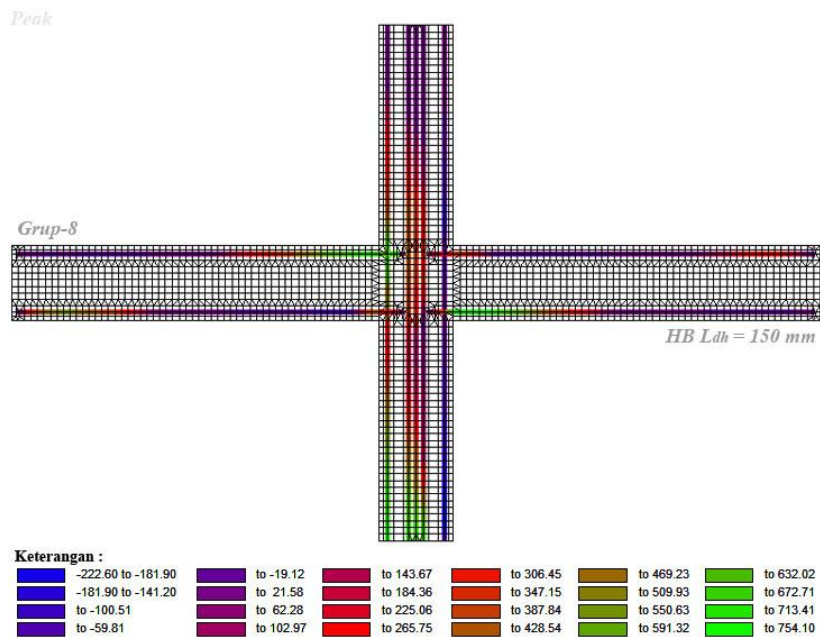
Gambar 52 Lebar retak spesimen-spesimen grup-8

Lampiran 8C

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 100$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)



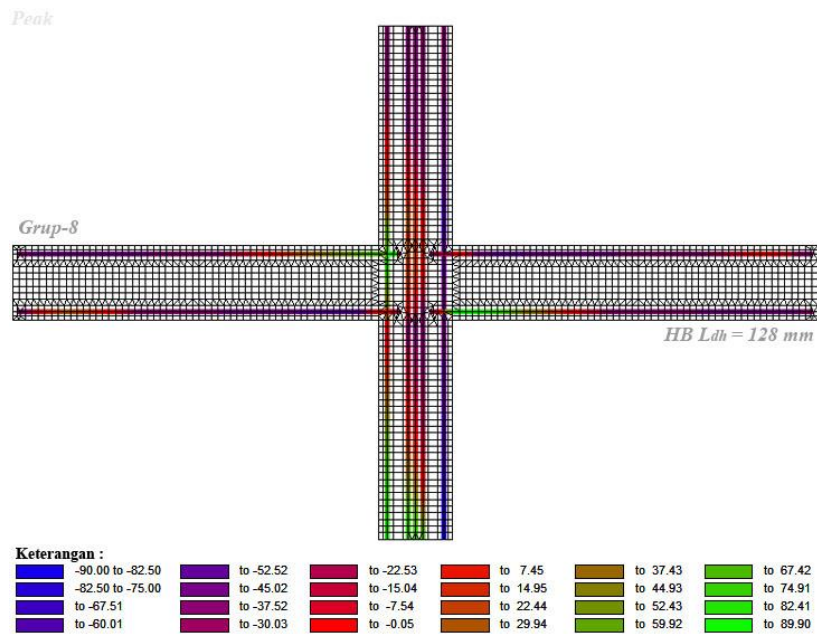
Gambar 53 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-100-625-C-0,25



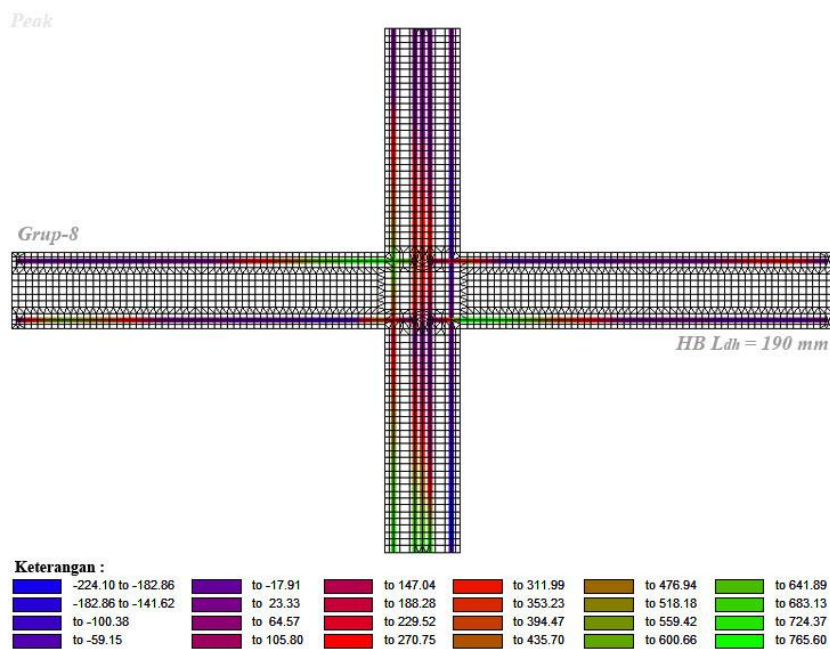
Gambar 54 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-100-625-HB-0,25-150

Lampiran 8D

Output vector2 berupa tegangan tulangan longitudinal spesimen-spesimen dengan beton mutu tinggi ($f_c' = 100$ MPa) dan tulangan mutu tinggi ($f_y = 625$ MPa)



Gambar 55 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-100-625-HB-0,25-128



Gambar 56 Tegangan tulangan longitudinal spesimen BC-100-625-HB-0,25-190