

**PERKUATAN GESER BALOK BETON BERTULANG
MENGUNAKAN SENGGANG LUAR**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
MINAT REKAYASA STRUKTUR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



ARGA SAPUTRA
NIM. 176060100111012

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**





TESIS

**PERKUATAN GESER BALOK BETON BERTULANG
MENGUNAKAN SENGGANG LUAR**

ARGA SAPUTRA
NIM. 176060100111012

telah dipertahankan di depan penguji
pada tanggal 28 Mei 2019
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Komisi Pembimbing,

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, M.S.

Dr. Eng. Lilya Susanti, S.T., M.T.

Malang, 21 Juni 2019

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil
Ketua Program Magister Teknik Sipil

Ari Wibowo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19740619 200012 1 002

JUDUL TESIS:

PERKUATAN GESER BALOK BETON BERTULANG MENGGUNAKAN SENGKANG LUAR

Nama Mahasiswa : ARGA SAPUTRA

NIM : 176060100111012

Program Studi : Magister Teknik Sipil

Minat : Rekayasa Struktur

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, M.S.

Anggota : Dr. Eng. Lilya Susanti, S.T., M.T.

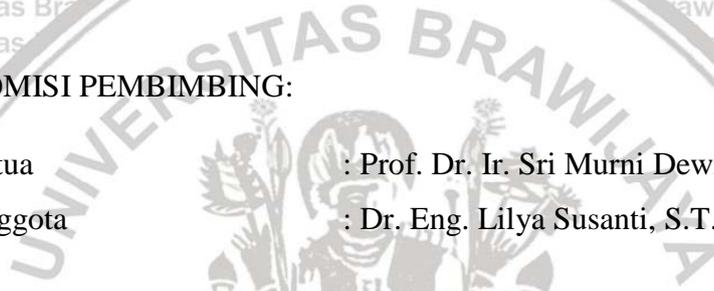
TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Devi Nuralinah, S.T., M.T.

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Ming Narto Wijaya, S.T., M.T., M.Sc.

Tanggal Ujian : 28 Mei 2019

SK Penguji : NOMOR 2658 TAHUN 2018





*Karya ilmiah ini kutujukan kepada:
Ayahanda dan Ibunda tercinta*

RIWAYAT HIDUP

Penulis lahir di Banyuwangi, pada tanggal 21 Juni 1994 dari pasangan ayah Sukasi dan Ibu Sri Kustini. Sejak kecil sampai sampai remaja tinggal di Banyuwangi Jawa Timur. Pendidikan sekolah dasar di SD Negeri 5 Cluring lulus tahun 2006, sekolah menengah pertama di SMP Negeri 1 Cluring lulus tahun 2009 serta sekolah menengah atas di SMA Negeri 1 Cluring dan lulus tahun 2012.

Tahun 2012 melanjutkan pendidikan pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember. Selama menjalani pendidikan pada tingkat ini penulis beberapa kali menjadi asisten dosen maupun asisten laboratorium antara lain sebagai Asisten Dosen dalam kegiatan Tugas Besar pada Mata Kuliah Mekanika Bahan semester gasal 2014/2015, Asisten Dosen dalam kegiatan Tugas Besar pada Mata Kuliah Tugas Geometri Jalan Raya semester genap 2014/2015, asisten laboratorium dalam kegiatan praktikum pada Mata Kuliah Praktikum Perkerasan Jalan Raya semester gasal 2015/2016, asisten laboratorium pada Mata Kuliah Praktikum Uji Material Bangunan semester gasal 2015/2016 dan Asisten Dosen dalam kegiatan Tugas Besar pada Mata Kuliah Struktur Beton semester gasal 2015/2016. Penulis pada tanggal 13 Juni 2016 memperoleh gelar Sarjana setelah mempertahankan Tesis yang berjudul “Konsep Desain Jembatan Pelengkung Batu Menggunakan Metode *Pippard's Elastic*”.

Sejak pertengahan tahun 2017 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Pascasarjana Universitas Brawijaya. Awal tahun 2019 penulis memulai karier sebagai Calon Pegawai Negeri Sipil pada Dinas Perumahan dan Kawasan Permukiman Kabupaten Banyuwangi sebagai staf pada Bidang Kawasan Permukiman. Pada tanggal 28 Mei 2019 penulis mempertahankan Tesis dengan judul “Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Menggunakan Sengkang Luar”.

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 21 Juni 2019

Mahasiswa,

Arga Saputra
NIM. 176060100111012

RINGKASAN

Arga Saputra, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, 15 Mei 2019, *Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Menggunakan Sengkang Luar*, Dosen Pembimbing: Sri Murni Dewi dan Lilya Susanti.

Peningkatan kekuatan struktur bangunan telah menjadi bahasan yang penting akhir-akhir ini. Alih fungsi suatu bangunan, kegagalan pada struktur seperti balok dan kolom karena umur, lingkungan yang mempengaruhi penurunan kekuatan struktur bahkan kesalahan desain awal yang lemah atau kurang maupun akibat kejadian-kejadian alam seperti gempa.

Pada penelitian ini dilakukan penelitian tentang perkuatan geser pada balok beton bertulang menggunakan sengkang luar. Benda uji yang digunakan merupakan benda uji peneliti terdahulu yaitu balok beton bertulang yang diperkuat dengan sengkang luar dan sengkang luar yang digunakan untuk perkuatan menggunakan diameter sengkang yang sama seperti sengkang yang terpasang di dalam balok yaitu diameter 6 mm. Selain itu benda uji yang digunakan menggunakan campuran material lain, namun dalam penelitian ini tidak membahas pengaruh dari material bahan yang digunakan.

Hasil dari perhitungan analisis, kapasitas geser dapat meningkat sampai 137,82%; 133,42% dan 137,12% sedangkan dari hasil pengujian mengalami peningkatan sebesar 31,58%; 0% dan 4,76% dalam hal ini peningkatan beban tidak terlihat signifikan dari hasil analisis perhitungan, namun jika dilihat dari pola retak yang terjadi beton tanpa perkuatan sengkang luar mengalami kombinasi retak lentur dan geser yang cukup banyak, selain kombinasi retak lentur dan geser, juga terjadi retak akibat balok tekan yang mencapai kapasitas tekan terlebih dahulu daripada balok tarik karena rasio tulangan yang terpasang *over reinforced*. Sementara itu pada balok dengan perkuatan sengkang luar, pola retak yang terjadi juga kombinasi retak lentur dan retak geser, namun retak yang terjadi relatif lebih sedikit daripada balok tanpa perkuatan. Jika ditinjau dari lendutan yang terjadi pada saat *crack* pertama, balok yang diberi perkuatan mengalami lendutan yang

relatif lebih kecil yaitu 0,61 mm; 0,31 mm dan 0,18 mm daripada balok tanpa perkuatan 1,28 mm; 0,55 mm dan 0,32 mm sehingga balok yang diperkuat dengan sengkang luar dapat dikatakan lebih kaku daripada balok tanpa perkuatan.

Kata kunci: Perkuatan, Geser, Balok, Beton, Sengkang



SUMMARY

Arga Saputra, Departement of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, May 2019, Shear Strengthening Reinforced Concrete Beam Using External Stirrup, Academic Supervisor: Sri Murni Dewi and Lilya Susanti.

Increasing the strength of building structures has become an important topic lately. Transfer of functions a building, failure of structures such as beams and columns due to age, environment that affects the decrease in structural strength and even initial design errors that are weak or lacking or due to natural events such as earthquakes.

In this study a study of shear reinforcement in reinforced concrete beams was carried out using external stirrup. The specimens used were the test specimens of the previous researchers, namely reinforced concrete beams which were reinforced with external stirrup and the external stirrup used for strengthening using the same diameter as internal stirrup which is 6 mm. In addition, the test material used uses a mixture of other materials, but in this study does not discuss the effect of the material used.

The results of calculation analysis, shear capacity can increased up to 137.82%; 133.42% and 137.12% while the test results increased by 31.58%; 0% and 4.76% in this case load did not look significant from the results of calculation analysis, but when viewed from crack pattern that occurs without external stirrup, outer ring has a combination of flexural and shear cracks occurs quite much, besides of flexural and shear cracks, combination of crack also occurs because of pressure beam reach pressure capacity first rather than pull beam because the ratio of installed reinforcement is over reinforced. Meanwhile in the beam with external stirrup, the crack pattern that occurs is also a combination of bending and shear cracks, but the cracks that occur are relatively less than the beam without external stirrup. When viewed from the deflection that occurred during the first crack, the reinforced beam experienced a relatively smaller deflection of

*0.61 mm beam; 0.31 mm and 0.18 mm rather than beams without external stirrup
1.28 mm; 0.55 mm and 0.32 mm, so that the beam with external stirrup can be
said to be more rigid than the beam without external stirrup.*

Keywords: Strengthening, Shear, Stirrup



KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Menggunakan Sengkang Luar”. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Magister (S2) pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penyusunan Tesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, M.S., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Dr. Eng. Lilya Susanti, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan Tesis ini;
2. Dr. Eng. Devi Nuralinah, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji Utama, dan Dr. Eng. Ming Narto Wijaya, S.T., M.T. M.Sc, selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan Tesis ini;
3. Seluruh Dosen dan Staf Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan ilmu, sarana dan prasarana selama pengerjaan Tesis ini;
4. Ibunda Sri Kustini dan Ayahanda Sukasi tercinta yang telah membantu baik moral dan materi serta mendoakan hingga terselesaikannya Tesis ini;
5. rekan seangkatan Program Magister Teknik Sipil Minat Rekayasa Struktur Fakultas Teknik Universitas Brawijaya angkatan Tahun 2017 yang telah bersatu dan berjuang bersama serta memberi dorongan/semangat selama proses pembimbingan Tesis;
6. teman-teman terbaikku Adha Q. Muttawakillah, S.Pd., Ahmad Faisol Zulqowim, S.T., Ari Trisna Sanubari S.T., Hendra Andiananta P, S.Tp., Lya Martha Hayu, S.H., Novi Wahyuningtyas, S.H., Ujang Fauzi, S.Pd. dan Yusi Putra Darmawan, S.Pd yang selalu mendoakan dan memberi semangat dalam pengerjaan Tesis ini;

7. semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan Tesis ini. Akhirnya penulis berharap, semoga Tesis ini dapat bermanfaat.

Malang, 21 Juni 2019

Penulis



DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	1
HALAMAN PENGESAHAN	1
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS	1
HALAMAN IDENTITAS PENGUJI TESIS	1
RIWAYAT HIDUP	1
PUBLIKASI ILMIAH	1
RINGKASAN	1
SUMMARY	1
KATA PENGANTAR	1
DAFTAR ISI	1
DAFTAR TABEL	1
DAFTAR GAMBAR	1
DAFTAR LAMPIRAN	1
BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Tinjauan Umum	5
2.2 Retakan Miring dan Tulangan Geser.....	6
2.3 Perilaku Balok Dengan Tulangan Geser	6
2.4 Lendutan Balok Beton Bertulang	9
2.5 <i>Retrofit</i>	11
BAB 3. KERANGKA KONSEP PENELITIAN	
3.1 Kerangka Konsep Penelitian	15
3.2 Hipotesis	16

BAB 4. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tempat Penelitian 17

4.2 Desain Penelitian 17

4.3 Populasi dan Sampel 18

 4.3.1 Populasi Penelitian 18

 4.3.2 Sampel Penelitian 18

4.4 Teknik Pengumpulan Data 19

 4.4.1 Identifikasi Variable 19

 4.4.2 Sumber Data 20

 4.4.3 Teknik Pengumpulan Data 20

4.5 Prosedur Penelitian 20

 4.5.1 Rancangan Penelitian 20

 4.5.2 Tahapan Penelitian 21

 4.5.2.1 Analisis Teori Awal 21

 4.5.2.2 Tahapan Persiapan Benda Uji 21

 4.5.2.3 Tahapan Pengujian 22

 4.5.5 Alur Penelitian 23

 4.5.5.1 Studi Pustaka dan Pengumpulan Data 23

 4.5.5.2 Pengolahan dan Analisis Data 24

 4.5.5.3 Penarikan Kesimpulan 24

BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisa Penampang Balok 25

 5.1.1 Statika Balok 25

 5.1.2 Sampel Penelitian 26

5.2 Rasio Tulangan 27

5.3 Kapasitas Geser dan Beban Geser 28

5.4 Kapasitas Lentur 30

5.5 Lendutan 31

5.6 Hasil Eksperimen 35

5.7 Pola Retak 36

BAB 6. PENUTUP



6.1 Kesimpulan 39

6.2 Saran 40

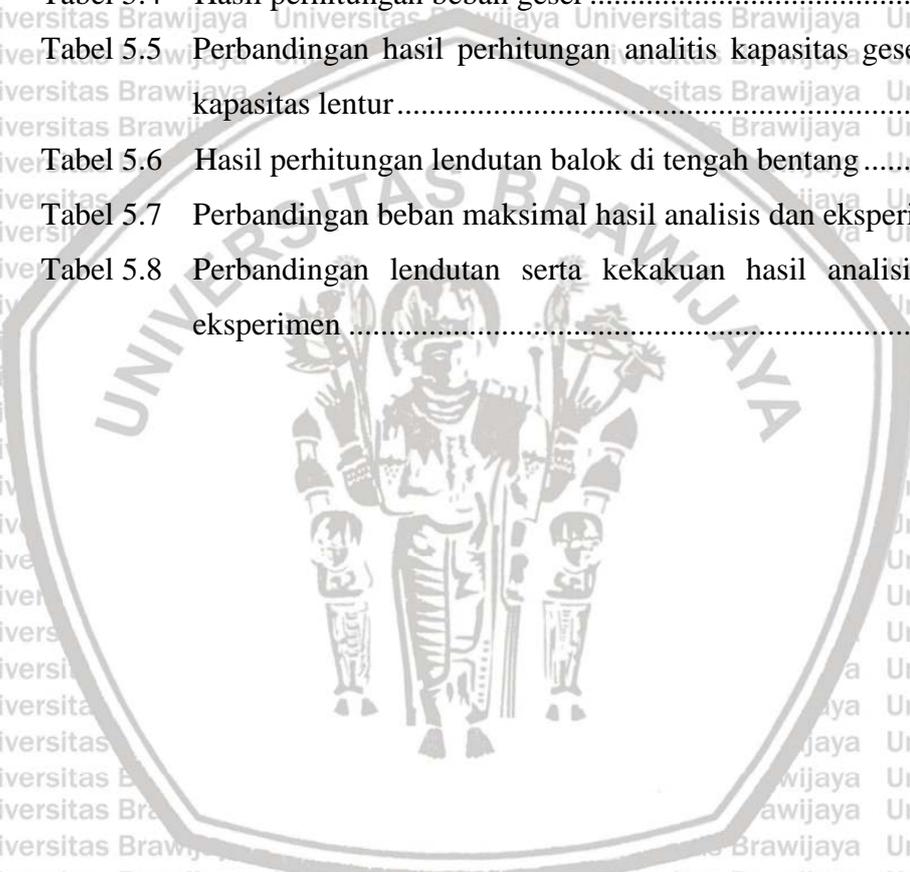
DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Benda Uji	18
Tabel 4.2 Form Pengujian	21
Tabel 5.1 Parameter hasil pengujian dan perhitungan pada silinder dan balok (B1a dan B1b)	26
Tabel 5.2 Parameter hasil pengujian dan perhitungan pada silinder dan balok (B2a dan B2b)	27
Tabel 5.3 Parameter hasil pengujian dan perhitungan pada silinder dan balok (B2a dan B2b)	27
Tabel 5.4 Hasil perhitungan beban geser	30
Tabel 5.5 Perbandingan hasil perhitungan analitis kapasitas geser dan kapasitas lentur	31
Tabel 5.6 Hasil perhitungan lendutan balok di tengah bentang	33
Tabel 5.7 Perbandingan beban maksimal hasil analisis dan eksperimen	33
Tabel 5.8 Perbandingan lendutan serta kekakuan hasil analisis dan eksperimen	35



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Gaya Dalam/ <i>Internal</i> Pada Balok	5
Gambar 2.2 Retakan Miring dan Tulangan Geser	6
Gambar 2.3 Kekuatan <i>Internal</i> Dalam Balok Retak Dengan Tulangan Geser	7
Gambar 2.4 Distribusi Geser <i>Internal</i> Pada Balok Dengan Tulangan Geser	8
Gambar 2.5 Lokasi Geser Maksimal (V_{ud})	9
Gambar 2.6 Skema pengujian lentur pembebanan 2 titik	10
Gambar 2.7 Teknik perkuatan	11
Gambar 3.1 Kerangka Konsep Penelitian	16
Gambar 4.1 Desain Benda Uji	17
Gambar 4.2 Detail Penempatan Benda Uji	22
Gambar 4.3 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 5.1 Jarak tumpuan dan titik pembebanan pada pengujian balok	25
Gambar 5.2 Grafik perbandingan P dan Δ Balok B1a dan B1b hasil eksperimen	34
Gambar 5.3 Grafik perbandingan P dan Δ Balok B2a dan B2b hasil eksperimen	34
Gambar 5.4 Grafik perbandingan P dan Δ Balok B3a dan B3b hasil eksperimen	34
Gambar 5.5 Grafik gabungan perbandingan P dan Δ balok hasil eksperimen.....	35
Gambar 5.6 Pola retak B1a dan B1b.....	36
Gambar 5.7 Pola retak B2a dan B2b.....	37
Gambar 5.8 Pola retak B3a dan B3b.....	37

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1	Tabel Hasil Pengujian Silinder	
Lampiran 2	Perhitungan Rasio Tulangan	
Lampiran 3	Perhitungan P_{geser}	
Lampiran 4	Perhitungan Lentutan	
Lampiran 5	Data Pengujian Lentur Benda Uji Balok	
Lampiran 6	Perbandingan hasil analisis dan eksperimen	
Lampiran 7	Perhitungan Beban Lentur	



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan kekuatan struktur bangunan telah menjadi bahasan yang penting akhir-akhir ini. Alih fungsi suatu bangunan, kegagalan pada struktur seperti balok dan kolom karena umur, lingkungan yang mempengaruhi penurunan kekuatan struktur bahkan kesalahan desain awal yang lemah atau kurang maupun akibat kejadian-kejadian alam seperti gempa. Oleh sebab itu perkuatan struktur menjadi salah satu solusi untuk memperkuat bahkan meningkatkan kekuatan struktur agar memenuhi persyaratan keamanan dan kekuatan.

Beberapa perkuatan terhadap geser khususnya telah banyak dilakukan. Sudarsana dkk., (2016) melakukan penelitian tentang penggunaan pelat baja dan baut sebagai perkuatan geser balok beton bertulang, dari penelitiannya diperoleh bahwa teknik perkuatan geser dengan pelat baja penuh tipe U & baut setengah (BPFBH) memiliki tipe keruntuhan paling baik dan menghasilkan peningkatan kapasitas nominal geser terbesar yaitu sebesar 10,95% dan 60,5% terhadap balok kontrol berturut-turut untuk beban ultimate dan retak pertama. Sedangkan balok dengan tipe perkuatan lainnya (B-PLBF, B-PFBF, B-PSBH) berturut-turut 6,57%, 6,57%, 7,30% untuk beban ultimate dan 23,7%, 52,6%, 31,6% untuk beban retak pertama. Deskarta (2009a) melakukan penelitian perkuatan geser balok beton bertulang menggunakan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), dari penelitiannya mengungkapkan bahwa penggunaan GFRP dapat merubah model keruntuhan dari keruntuhan geser tekan menjadi keruntuhan lentur dan mampu meningkatkan beban saat tulangan leleh jika dibandingkan dengan balok tanpa lapis GFRP dengan rata-rata sebesar 12,48%. Sedangkan menurut Ghai dkk., (2017a) tentang perkuatan balok terhadap geser menggunakan teknik *jacketing* dengan SCRIP (*Styrene-Butadiene-Rubber Latex Polymer*) mengungkapkan bahwa beban terakhir yang mampu ditahan oleh balok setelah diberi perkuatan adalah sebesar 12,03%. Penelitian lain tentang rehabilitasi geser pada balok beton

bertulang dilakukan oleh Sesetty (2018a) menggunakan 3 metode yaitu dengan menggunakan penambahan tulangan baja spiral, tulangan baja diagonal dan yang terakhir dengan penambahan sengkang eksternal. Dari penelitian tersebut mengatakan bahwa perkuatan menggunakan dua metode perkuatan inovatif (metode tulangan spiral dan metode tulangan diagonal) memberikan hasil yang lebih baik daripada perkuatan menggunakan sengkang eksternal, tetapi perkuatan inovatif sangat tidak memungkinkan untuk diaplikasikan dilapangan serta penggunaan sengkang eksternal dinilai lebih ekonomis daripada dua metode yang lain. Selain beberapa penelitian diatas masih banyak lagi penelitian-penelitian yang membahas tentang perkuatan geser pada balok beton bertulang.

Maka dalam penelitian ini akan dilakukan penelitian untuk mendapatkan data indeks peningkatan kekuatan dari penggunaan tulangan sengkang luar sebagai perkuatan geser pada balok beton bertulang serta untuk mendapatkan data bagaimana pola retak yang terjadi pada balok beton bertulang tanpa perkuatan dengan balok beton bertulang yang diperkuat dengan sengkang luar dengan pertimbangan karena metode ini dinilai lebih ekonomis dan mudah diaplikasikan dilapangan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan diatas, penulis merumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana indeks peningkatan kekuatan pada balok beton bertulang yang diberikan perkuatan geser berupa sengkang luar?
2. Bagaimana pola retak yang terjadi pada balok beton bertulang tanpa perkuatan dengan balok beton bertulang yang diberikan perkuatan geser menggunakan sengkang luar?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui indeks peningkatan kekuatan pada balok beton bertulang yang diberikan perkuatan geser berupa tulangan sengkang luar.

2. Mendapatkan data perbedaan dan perubahan pola retak yang terjadi pada balok beton bertulang tanpa perkuatan dan pada balok yang diberikan perkuatan geser menggunakan sengkang luar berupa tulangan baja.

1.4 Batasan Masalah

Agar masalah dalam penelitian ini menjadi lebih sederhana, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Benda uji yang digunakan adalah benda uji berupa balok beton bertulang yang sudah direncanakan dan dibuat oleh peneliti sebelumnya dengan perkuatan sengkang luar menggunakan tulangan baja $\emptyset 6-75$ mm yang dipasang pada balok daerah geser.
2. Balok beton bertulang yang digunakan sebagai benda uji menggunakan campuran bahan material lain sehingga tiap tipe balok beton memiliki mutu yang berbeda, namun dalam penelitian ini tidak membahas tentang campuran material.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah memberikan alternatif dan pengetahuan tentang perkuatan struktur khususnya pada balok beton bertulang dalam menahan geser dengan menggunakan sengkang luar.

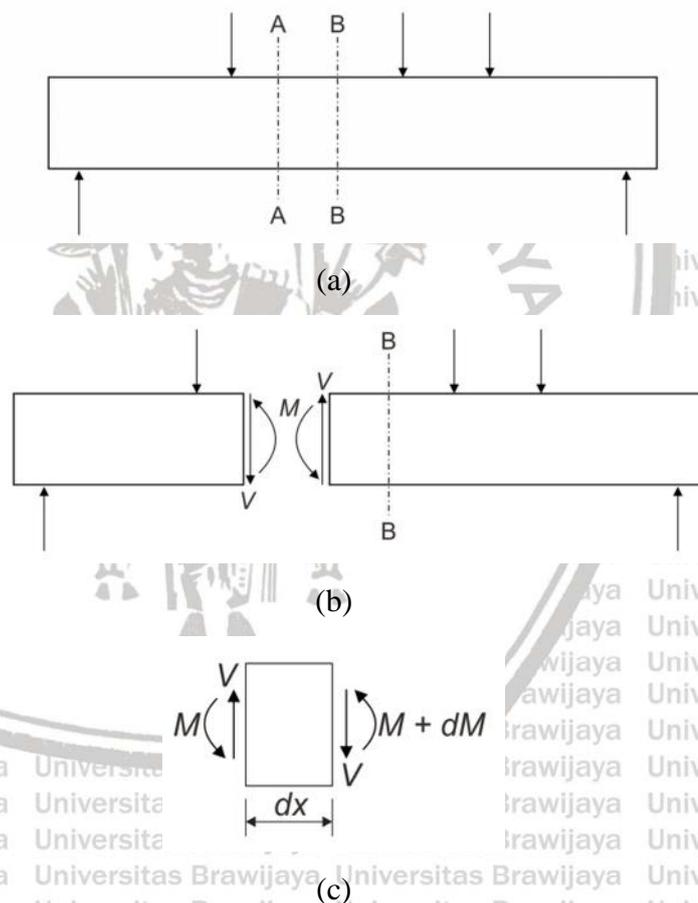


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Umum

Balok menahan beban terutama menggunakan momen *internal* M dan geser V yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Dalam suatu desain balok beton bertulang, lentur biasanya menjadi pertimbangan pertama, mengarah ke ukuran penampang dan pengaturan tulangan untuk menghasilkan momen tahanan yang diperlukan.



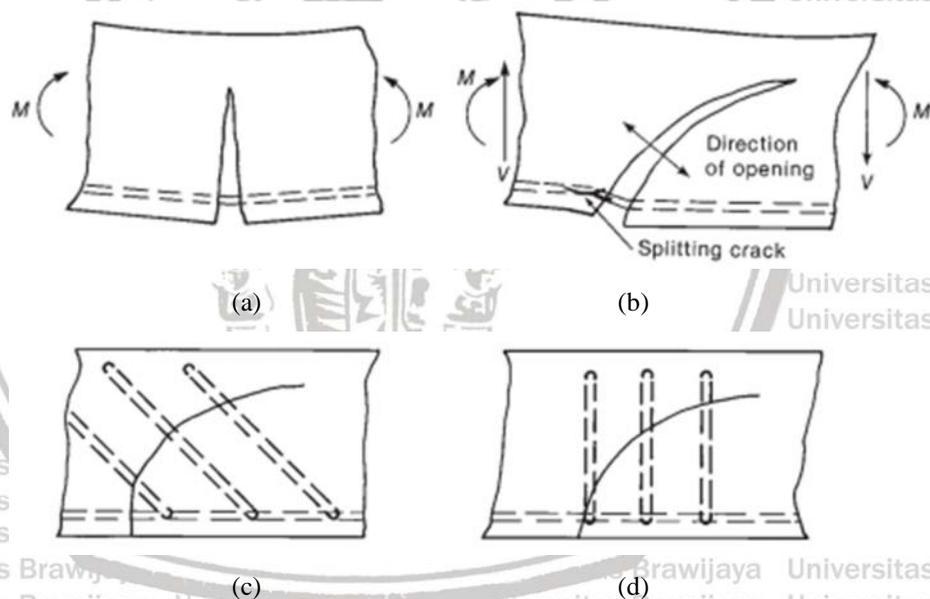
Gambar 2.1 Gaya Dalam/Internal Pada Balok (Sumber: Macgregor, 2012)

Batas-batas diberikan untuk jumlah penulangan lentur yang dapat digunakan untuk memastikan jika kegagalan terjadi itu akan berkembang secara bertahap untuk memberikan peringatan kepada penghuni bangunan. Balok yang sedemikian berarti proporsional untuk geser, karena balok dengan kegagalan geser

biasanya sering terjadi kegagalan secara mendadak dan rapuh/*brittle*. Desain untuk geser harus memastikan bahwa kekuatan geser sama atau melebihi kekuatan lentur pada semua titik pada balok. Ragam kegagalan geser dapat terjadi sangat bervariasi tergantung pada dimensi, geometri, pembebanan dan juga properties balok.

2.2 Retakan Miring Pada Balok Dengan Tulangan Geser

Tulangan horisontal diperlukan untuk menahan retak lentur (Lihat Gambar 2.2a), retak miring dengan tulangan horisontal diperlihatkan pada Gambar 2.2b, kombinasi tulangan horisontal dan tulangan diagonal (Lihat Gambar 2.2c) maupun kombinasi tulangan horisontal dan tulangan vertikal (Lihat Gambar 2.2d) diperlukan untuk menahan retak yang terlalu lebar.



(a) Retak Lentur; (b) Retak Miring; (c) Retak Miring dengan Tulangan Geser Diagonal; (d) Retak Miring dengan Tulangan Geser Vertikal

Gambar 2.2 Retakan Miring dan Tulangan Geser (Sumber: MacGregor, 2012)

2.3 Perilaku Balok Dengan Tulangan Geser

Jenis tulangan badan yang umum dikenal adalah sengkang vertical (*vertical stirrup*) yang dapat berupa baja tulangan yang berdiameter kecil. Fungsi tulangan sengkang sendiri menurut Nuralinah (2008) adalah menahan sebagian gaya geser pada bagian yang retak, mencegah penjalaran retak diagonal sehingga tidak

menerus ke bagian tekan beton dan memberi kekuatan tertentu terhadap terlepasnya beton, karena umumnya sengkang mengikat tulangan longitudinal sehingga membentuk suatu beton yang lebih masif.

MacGroger (2011) mengatakan bahwa kuat geser nominal (V_n) pada penampang beton bertulangan geser disumbangkan oleh beberapa komponen gaya yaitu sebagai berikut:

$$V_n = V_{cy} + V_d + V_{ay} + V_s \quad (2-1)$$

Dimana:

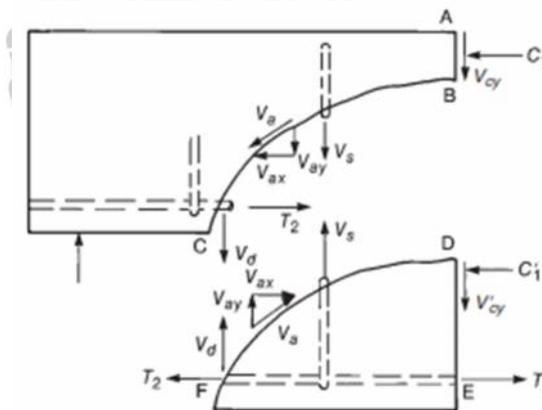
V_n = Kuat geser nominal

V_{cy} = Komponen gaya geser pada daerah blok beton tekan

V_d = Komponen gaya *dowel action* (aksi pasak) oleh tulangan memanjang

V_{ay} = Komponen gaya geser antar permukaan retak

V_s = Komponen gaya geser sumbangan dari sengkang



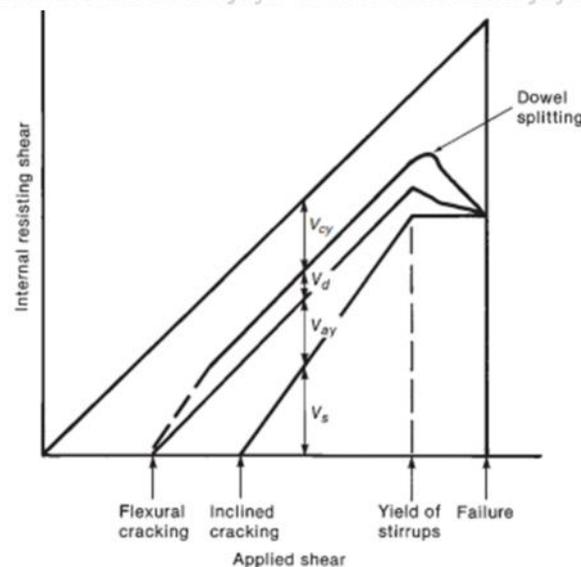
Gambar 2.3 Kekuatan Internal Dalam Balok Retak Dengan Tulangan Geser (MacGroger, 2011))

Beberapa pengujian pembebanan terhadap balok digambarkan pada Gambar

2.4. Besar gaya geser nominal harus sama dengan gaya geser yang terjadi ditunjukkan dengan garis yang linier 45°. Sebelum retak lentur, semua beban geser ditahan oleh beton. Ketika retak lentur terjadi kemudian bertambah retak geser maka awalnya ditahan oleh beton, semakin bertambah maka tulangan geser turut serta menahan gaya geser yang terjadi sampai pembebanan bertambah dan tulangan geser leleh maka retak akan lebih cepat terjadi dan retak cenderung terbuka lebih cepat. Setelah beban bertambah sampai kemampuan beton dan

senggang tidak mampu menahan geser yang terjadi maka akan terjadi *splitting* (*dowel*), area beton tekan remuk karena kombinasi geser dan tekan atau penampang hancur.

Masing-masing komponen pada proses tersebut kecuali V_c , memiliki respon terhadap *load-deflection*. Namun sulit untuk menghitung kontribusi (V_c , V_d dan V_{ay}) dalam desain, maka biasanya ketiga komponen tersebut disatukan sebagai V_c atau disebut dengan kemampuan beton dalam menahan geser.



Gambar 2.4 Distribusi Geser Internal Pada Balok Dengan Tulangan Geser (MacGroger, 2011))

Berdasarkan rumus yang digunakan sebagai dasar untuk perhitungan tulangan geser/begel balok juga tercantum dalam pasal-pasal SNI-03-2847-2013 yaitu sebagai berikut:

- 1) Pada pasal 11.1.1, gaya geser rencana (V_r), gaya geser nominal (V_n), gaya geser yang ditahan beton dan begel (V_u) dirumuskan sebagai berikut:

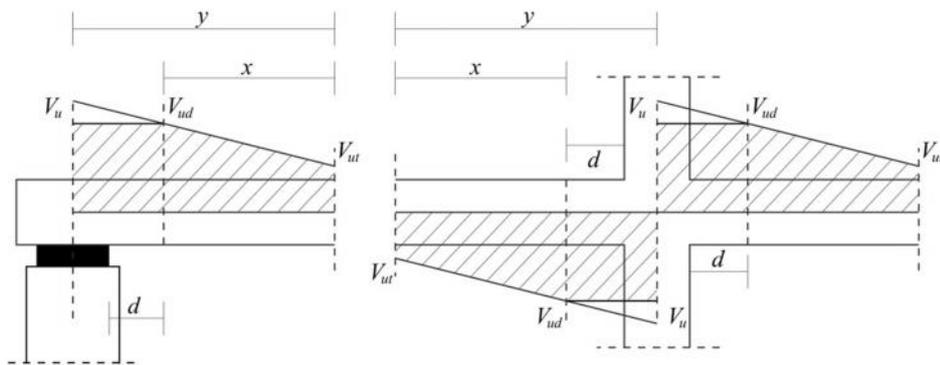
$$V_r = \phi V_n \text{ dan } \phi V_n \geq V_u \dots\dots\dots (2-2)$$

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots (2-3)$$

dimana ϕ adalah faktor reduksi geser yang diambil sebesar 0,75 (SNI 03-2847-2013 Pasal 9.3.2.3).

- 2) Pada pasal 11.1.3.1, nilai V_u boleh diambil pada jarak d (menjadi V_{ud}) dari muka kolom.

$$V_{ud} = V_{ut} + \frac{x}{y} (V_u - V_{ut}) \dots\dots\dots (2-4)$$



Gambar 2.5 Lokasi Geser Maksimal (V_{ud}) (Sumber: SNI 03-2847-2002)

- 3) Pada pasal 11.2.1.1, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dapat dihitung dengan rumus:

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b d \quad \dots \dots \dots (2-5)$$

- 4) Gaya geser yang ditahan oleh begel (V_s) dihitung berdasarkan Persamaan (2-2) dan (2-3):

$$V_s = (V_u - \phi V_c) / \phi \quad \dots \dots \dots (2-6)$$

- 5) Pasal 11.4.5.3,

$$V_s \text{ harus } \leq \frac{2}{3} \sqrt{f'_c} b d \quad \dots \dots \dots (2-7)$$

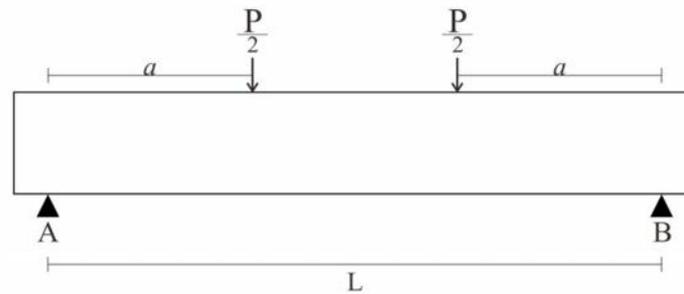
Jika $V_s > \frac{2}{3} \sqrt{f'_c} b d$, maka ukuran balok harus diperbesar.

- 6) Pada pasal 11.4.7.2, bila digunakan tulangan geser tegak lurus terhadap sumbu komponen struktur maka V_s dapat dihitung sebagai berikut, dengan A_v adalah luas penampang tulangan geser yang berada pada spasi s .

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad \dots \dots \dots (2-8)$$

2.4 Lendutan Balok Beton Bertulang

Apabila suatu balok dengan sumbu longitudinal lurus dibebani oleh gaya-gaya lateral, maka sumbu tersebut akan terdeformasi menjadi suatu lengkungan, yang disebut kurva defleksi balok Defleksi kadang-kadang dihitung untuk menyelidiki apakah harganya masih dalam batas toleransi (Gere & Timoshenko, 1997, terjemahan Suryoatmono, 2000: 116).



Gambar 2.6 Skema pengujian lentur pembebanan 2 titik (Sumber: ACI 435R-95)

Dari skema pengujian lentur balok yang sudah direncanakan dengan dua titik pembebanan sebesar P dan panjang efektif balok sebesar L dengan jarak tumpuan ketitik pembebanan adalah sebesar a , menurut ACI 435R-95 Tabel 3.2 (2002) besar lendutan yang terjadi akibat beban yang bekerja bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta = \frac{P}{2} \frac{a}{E_c I_e} (3L^2 - 4a^2) \quad (2-9)$$

Dimana E_c adalah modulus elastisitas beton yang diambil sebesar $4700\sqrt{f'_c}$ dan I_e adalah momen inersia efektif balok. Dimana momen inersia efektif balok menurut SNI 03-2847-2002 dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (2-10)$$

M_{cr} adalah momen yang menyebabkan retak, M_a adalah momen maksimum pada saat lendutan dihitung, I_g adalah momen inersia penampang bruto dan I_{cr} adalah momen inersia penampang retak yang ditransformasikan menjadi beton. Besar nilai parameter-parameter tersebut dapat diperoleh dari rumus berikut:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_c}{h - \bar{y}} \quad (2-11)$$

Sedangkan f_r adalah modulus runtuh beton yang menurut SNI 03-2847-2002 ataupun ACI 435R-95 dapat diperoleh dari:

$$f_r = 0,7\sqrt{f'_c} \quad (2-12)$$

Untuk mendapatkan momen inersia bruto I_g dan momen inersia penampang retak I_{cr} yang ditransformasikan menjadi beton dapat menggunakan persamaan berikut:

$$I_g = \frac{1}{12} b h^3 \quad (2-13)$$

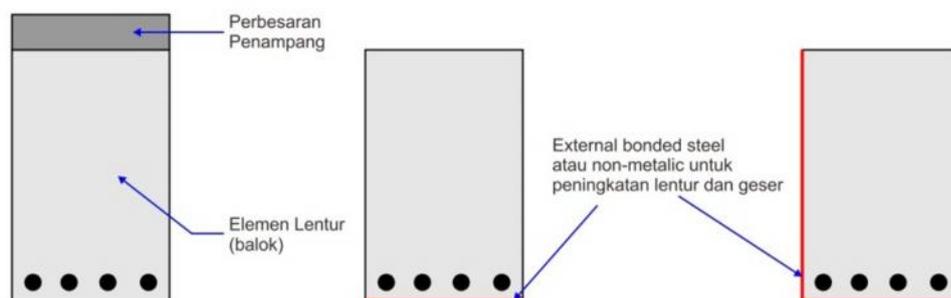
$$I_{cr} = I_g + \left[A_g \times \left(\bar{y} - \frac{h}{2} \right)^2 \right] + [(n - 1) \times A_s \times (d - \bar{y})^2] + [(n - 1) \times A_s' \times (\bar{y} - d')^2] \quad (2-14)$$

Dengan b lebar balok, h kedalaman balok, A_g luas bruto balok, n modulus ratio $\left(\frac{E_s}{E_c}\right)$, A_s luas penampang tulangan tarik, A_s' luas penampang tulangan tekan, \bar{y} tinggi garis netral penampang balok transformasi, d jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik dan d' jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tekan.

2.5 Retrofit

Bilamana suatu bangunan struktur beton dialih fungsikan dan setelah dilakukan re-analisis/*appraisal*, menunjukkan bahwa kekuatan nominal struktur atau elemen tidak cukup, maka dapat dilakukan improvisasi dengan berbagai macam teknik/variasi perkuatan (*strengthening*), atau juga bisa ditambahkan komponen yang bisa digunakan untuk meningkatkan kekuatan dari struktur tersebut yang biasa disebut dengan *retrofit* (komponen atau aksesoris yang ditambahkan ke sesuatu setelah diproduksi).

Perbaikan struktur beton yang sering dilakukan adalah perkuatan eksternal, karena perkuatan dengan perbesaran dimensi sulit untuk dilakukan. Jadi salah satu cara yang bisa dilakukan untuk meningkatkan kemampuan struktur bangunan tersebut adalah dengan menambahkan elemen struktur baru yang bisa mendukung kemampuan struktur tersebut dalam menahan beban.



Gambar 2.7 Teknik Perkuatan

Menurut Munaf dkk., (2003:30) mengatakan, Perkuatan merupakan suatu cara perbaikan sehingga dapat meningkatkan kemampuan kapasitas/kinerja penampang untuk dapat memikul beban seperti yang direncanakan ... Berbagai teknik/metoda perkuatan yang lazim dilakukan adalah seperti berikut:

1. Memperbesar penampang dan menambah tulangan (metallic/reinforcement)
2. Pelapisan lembaran metallic/steel-plate atau non-metallic (extenal bonded)
3. Kombinasi keduanya.

Ada beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya tentang perkuatan geser pada balok beton bertulang menggunakan beberapa macam bahan tambah.

Salah satunya adalah penelitian tentang perkuatan geser pada balok beton bertulang menggunakan SCRCP dan GFRP.

Penelitian tentang perkuatan geser pada balok dengan bahan lain telah dilakukan oleh Ghai dkk., (2017b) pada penelitian tersebut menyimpulkan bahwa perkuatan balok terhadap geser menggunakan teknik *jacketing* dengan SCRCP (*Styrene-Butadiene-Rubber Latex Polymer*) mengungkapkan bahwa beban terakhir yang mampu ditahan oleh balok setelah diberi perkuatan meningkat sebesar 12,03%.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Deskarta (2009b) menggunakan benda uji balok $10 \times 15 \times 95$ cm dengan empat variasi tulangan dan lapis GFRP pada balok. Tipe pertama adalah balok tanpa lapis GFRP sebagai balok kontrol, tipe kedua adalah balok dengan lapis GFRP arah $0/90^\circ$, tipe ketiga adalah balok dengan lapis GFRP arah 0° dan yang terakhir adalah balok dengan lapis GFRP arah $\pm 45^\circ$. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa:

1. Penambahan lapis GFRP pada balok dapat merubah model keruntuhan dari keruntuhan geser tekan menjadi keruntuhan lentur.
2. Penambahan lapis GFRP pada balok mampu meningkatkan beban saat tulangan leleh jika dibandingkan dengan balok tanpa lapis GFRP rata-rata sebesar 12,48%.

Penelitian lain tentang perkuatan geser pada balok juga dilakukan oleh Sudarsana dkk., (2016) yaitu tentang penggunaan pelat baja dan baut sebagai perkuatan geser balok beton bertulang, dari penelitiannya diperoleh bahwa teknik

perkuatan geser dengan pelat baja penuh tipe U & baut setengah (BPFBH) memiliki tipe keruntuhan paling baik dan menghasilkan peningkatan kapasitas nominal geser terbesar yaitu sebesar 10,95% dan 60,5% terhadap balok kontrol berturut-turut untuk beban ultimate dan retak pertama. Sedangkan balok dengan tipe perkuatan lainnya (B-PLBF, B-PFBB, B-PSBH) berturut-turut 6,57%, 6,57%, 7,30% untuk beban ultimate dan 23,7%, 52,6%, 31,6% untuk beban retak pertama.

Penelitian tentang rehabilitasi geser pada balok beton bertulang dilakukan oleh Sesetty (2018b) menggunakan 3 metode yaitu dengan menggunakan penambahan tulangan spiral, tulangan diagonal dan yang terakhir dengan penambahan sengkang eksternal.

Dari penelitian tersebut mengatakan bahwa perkuatan menggunakan dua metode perkuatan inovatif (metode tulangan spiral dan metode tulangan diagonal) memberikan hasil yang lebih baik daripada perkuatan menggunakan sengkang eksternal, tetapi perkuatan inovatif sangat tidak memungkinkan untuk diaplikasikan dilapangan serta penggunaan sengkang eksternal dinilai lebih ekonomis daripada dua metode yang lain.

Teknik perkuatan menggunakan sengkang eksternal juga dilakukan pada penelitian Minh dan Mutsuyoshi (2008) yaitu membahas tentang perkuatan geser pada balok beton bertulang menggunakan pelat baja, lembaran CFRP dan sengkang eksternal. Dari hasil percobaan tersebut rata-rata peningkatan sebesar 72% pada perkuatan geser yang menggunakan pelat baja dan setidaknya 117% peningkatan geser diperoleh untuk balok dengan sengkang luar. Menurutnya metode ini dapat digunakan secara efektif untuk memperkuat geser pada balok-balok beton bertulang. Namun hanya 26% peningkatan kekuatan geser yang diperoleh untuk balok dengan lembaran CFRP yang mungkin disebabkan oleh ikatan lembaran CFRP pada permukaan beton menggunakan epoxy.

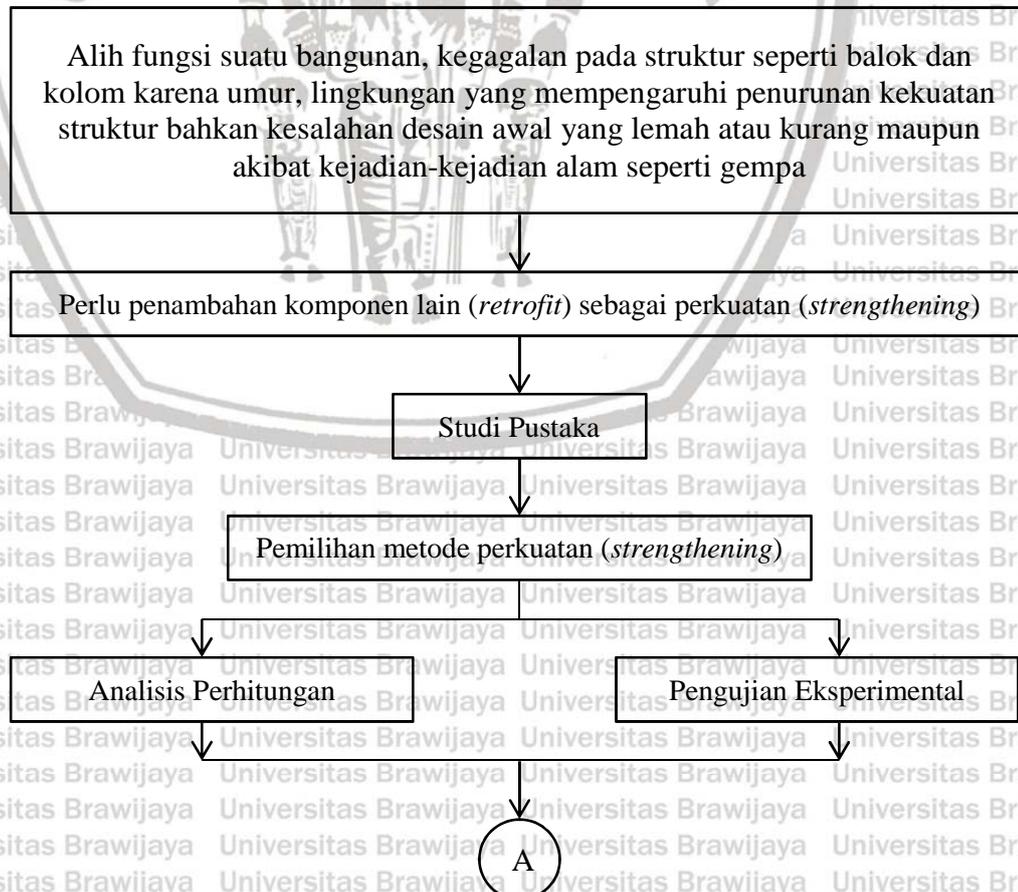


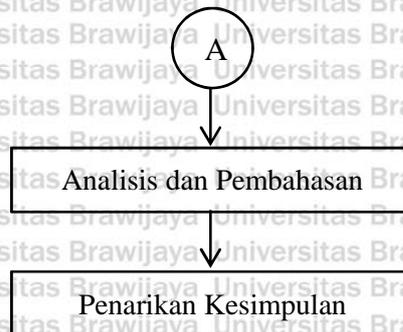
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Konsep Penelitian

Penelitian tentang perkuatan geser pada balok bertulang dengan menggunakan tulangan eksternal ini di dasarkan pada salah satu pilihan dalam metode perkuatan geser pada balok yaitu penambahan *external bonded steel* atau pelapisan tulangan eksternal karena perkuatan dengan memperbesar dimensi balok sulit dilakukan dalam praktek di lapangan. Selain itu banyak sekali penelitian-penelitian yang membahas tentang perkuatan beton menggunakan GFRP, CFRP dan lainnya, sehingga dalam penelitian ini akan dicoba penggunaan sengkang eksternal sebagai perkuatan geser pada balok beton bertulang. Dan dari latar belakang dan pembahasan pada bab sebelumnya maka konsep penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:





Gambar 3.1 Kerangka Konsep Penelitian

3.2 Hipotesis

Hipotesis merupakan jawaban sementara dari persoalan yang sedang diteliti.

Dalam penelitian ini peneliti mengemukakan beberapa hipotesis sebagai berikut:

- 1) Penggunaan sengkang luar/eksternal sebagai perkuatan geser akan mempengaruhi peningkatan geser nominal pada balok, sehingga balok akan maksimal dalam menerima beban dan mengalami gagal lentur.
- 2) Penggunaan sengkang luar/eksternal sebagai perkuatan geser akan merubah retak geser menjadi retak lentur atau kombinasi antara retak geser dan retak lentur.

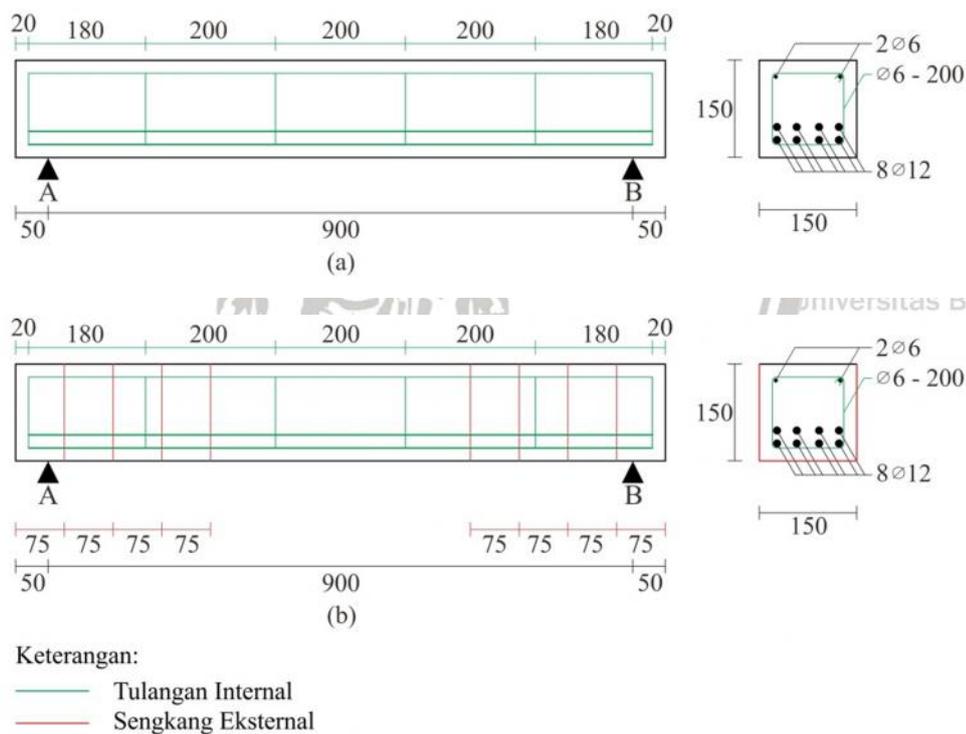
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tempat Penelitian

Seluruh rangkaian dalam penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.

4.2 Desain Penelitian

Adapun dimensi dan model sampel/benda uji yang peneliti gunakan adalah sebagai berikut:



(a) Benda Uji Tipe 1 (B1a-B4a) Tanpa Tulangan Eksternal sebagai Balok Kontrol; (b) Benda Uji Tipe 2 (B2a-B4a) dengan Perkuatan 4 Sengkang Luar;

Gambar 4.1 Desain Benda Uji

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimen yang dilaksanakan di laboratorium dengan kondisi dan perlengkapan yang disesuaikan dengan kebutuhan untuk penelitian tentang pengujian lentur pada balok beton bertulang yang diberi perkuatan geser menggunakan sengkang luar.

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini merupakan benda uji peneliti terdahulu yang sudah diperkuat menggunakan sengkang luar, sehingga dalam penelitian ini peneliti hanya melakukan pengujian langsung dan melakukan analisis hasil perhitungan secara teori dan hasil pengujian benda uji dilaboratorium. Benda uji yang digunakan juga menggunakan campuran material lain, namun dalam penelitian ini peneliti tidak membahas tentang campuran material bahan lain.

Untuk jumlah dan kode benda uji dalam penelitian ini dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 4.1 Benda Uji

No	Type	Kode	Jumlah
1	Balok Tanpa Perkuatan Sengkang Luar	B1a	1
		B2a	1
		B3a	1
2	Balok Dengan Perkuatan 4 Sengkang	B1b	1
		B2b	1
		B3b	1

4.3 Populasi dan Sampel

4.3.1 Populasi Penelitian

Sarwono (2006a:111) berpendapat, “Populasi didefinisikan sebagai seperangkat unit analisis yang lengkap yang sedang diteliti”. Dari pendapat tersebut maka dapat disimpulkan bahwa populasi adalah keseluruhan obyek yang memiliki kesamaan ciri-ciri tertentu. Populasi dalam penelitian ini adalah balok beton bertulang dengan dimensi $15 \times 15 \times 100$ cm sebanyak 6 buah.

4.3.2 Sampel Penelitian

Menurut Sarwono (2006b:111) mengatakan bahwa, “sampel merupakan sub dari seperangkat elemen yang dipilih untuk dipelajari. *Element* adalah unit dari mana data yang diperlukan dikumpulkan. Suatu *element* dapat dianalogikan dengan unit analisis. Suatu unit analisis dapat menunjukkan pada suatu organisasi, obyek, benda mati atau individu-individu”, dengan kata lain sampel adalah sebagian atau wakil dari populasi yang diteliti.

Dari pendapat diatas dapat disimpulkan bahwa sampel adalah sebagian dari populasi yang dianggap dapat mewakili dari populasi yang diteliti. Sampel dalam penelitian ini adalah 6 buah benda uji berupa balok beton bertulang. Penelitian ini menggunakan seluruh anggota populasi untuk dijadikan sampel.

4.4 Teknik Pengumpulan Data

4.4.1 Identifikasi Variabel

Menurut Brown (Dalam Sarwono, 2006c:53) mengatakan bahwa, “variabel didefinisikan sebagai *“something that may vary or differ”*. Definisi lain lebih detail mengatakan bahwa variabel *“is simply symbol or a concept that can assume any one of a set values”* (Davis, Dalam Sarwono 2006d:53). Dari 2 definisi tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa variabel adalah sesuatu yang berbeda dan bervariasi, yaitu berupa simbol atau konsep yang diasumsikan sebagai seperangkat nilai-nilai. Dalam penelitian ini akan dijelaskan tiga variabel yang digunakan yaitu *Independent* (variabel bebas), *Dependent* (variabel tergantung) dan *Control* (variabel kontrol):

1) Variabel Bebas

“Variabel bebas merupakan variabel stimulus atau variabel yang mempengaruhi variabel lain. Variabel bebas merupakan variabel yang variabelnya diukur, dimanipulasi, atau dipilih oleh peneliti untuk menentukan hubungannya dengan suatu gejala yang diobservasi”

(Sarwono, 2006e:54). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi spasi sengkang luar yang digunakan seperti pada Gambar 4.1 yang terdiri dari benda uji tipe 1 (B1a-B3a) sebagai balok kontrol, benda uji tipe 2 (B1B-B3b) dengan 4 buah sengkang luar dengan spasi @7,5 cm.

2) Variabel Tergantung/Terikat

Menurut Sarwono (2006f:54) mengatakan bahwa, “variabel tergantung adalah variabel yang memberikan reaksi/respon jika dihubungkan dengan variabel bebas. Variabel tergantung adalah variabel yang variabelnya diamati dan diukur untuk menentukan pengaruh yang disebabkan oleh

variabel bebas”. Variabel tergantung pada penelitian ini adalah hasil uji tekan lentur dan pola retak yang terjadi.

3) Variabel Kontrol

“Dalam penelitian, peneliti selalu berusaha menghilangkan atau menetralkan pengaruh yang dapat mengganggu hubungan antara variabel bebas dan variabel tergantung. Suatu variabel yang pengaruhnya dihilangkan disebut sebagai variabel kontrol” (Sarwono, 2006f:56).

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah produk balok beton bertulang yang dibuat sama, tempat penelitian dan alat yang digunakan.

4.4.2 Sumber Data

Data yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian ini dikelompokkan menjadi dua macam:

- 1) Data primer yang diperoleh dari hasil pengujian eksperimen dan pengamatan di laboratorium yaitu melalui pengujian benda uji.
- 2) Data Sekunder didapat dari literatur/referensi berupa buku-buku relevan yang dapat menunjang berlangsungnya penelitian ini.

4.4.3 Teknik Pengumpulan Data

Data primer diperoleh dengan pengujian yang dicatat dan digunakan sebagai bahan masukan untuk pembahasan, analisis data dan laporan penelitian. Analisis data adalah cara untuk mengolah data, menguji hipotesis dan untuk memperoleh kesimpulan. Pengambilan data primer dengan eksperimen pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kapasitas beban dan pola retak yang terjadi.

4.5 Prosedur Penelitian

4.5.1 Rancangan Penelitian

Dari perhitungan secara teori didapatkan data-data beban dan lendutan yang nantinya akan di bandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium. Untuk pengujian dilaboratoium maka diperlukan pencatatan data-data hasil pengujian.

Adapun form rancangan yang akan digunakan untuk melaporkan hasil pengujian dilaboratorium adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2 Form Pengujian

No	Beban Uji (kN)	Lendutan (mm)	Nomor Retak
1			
2			
3			
...			

4.5.2 Tahapan Penelitian

4.5.2.1 Analisis Teori Awal

Analisis teori awal yaitu dilakukannya pendekatan teori awal sesuai parameter-parameter penelitian yang telah ditetapkan untuk prediksi awal secara analitis. Data parameter penelitian bisa saja berubah karena menyesuaikan dengan pelaksanaan pengujian. Sehingga data hasil analisis bersifat sementara yang digunakan sebagai asumsi atau prediksi awal dari sifat mekanis benda uji.

4.5.2.2 Tahapan Persiapan Benda Uji

Setelah dilakukan analisis teori awal, maka tahapan selanjutnya adalah tahapan persiapan untuk pengujian eksperimental. Adapun tahapan persiapan adalah persiapan bahan dan alat yang akan digunakan dalam pengujian sesuai pada sub bab 4.5. Langkah-langkah persiapan bahan adalah sebagai berikut:

- 1) Persiapan benda uji dengan diberikan kode pada masing-masing benda uji.
- 2) Benda uji tipe B2 diberikan coakan sebagai penempatan tulangan sengkang luar. Coakan dibuat dengan lebar ± 6 mm dibuat bersilang yaitu pertama coakan vertikal pada sisi samping-samping dan coakan horisontal pada sisi bawah benda uji, dilanjut ke coakan kedua secara vertikal pada sisi samping-samping dan coakan horisontal pada sisi atas benda uji dan berulang seperti coakan pertama sampai sengkang luar terakhir dengan jarak antar coakan seperti pada Gambar 4.1.

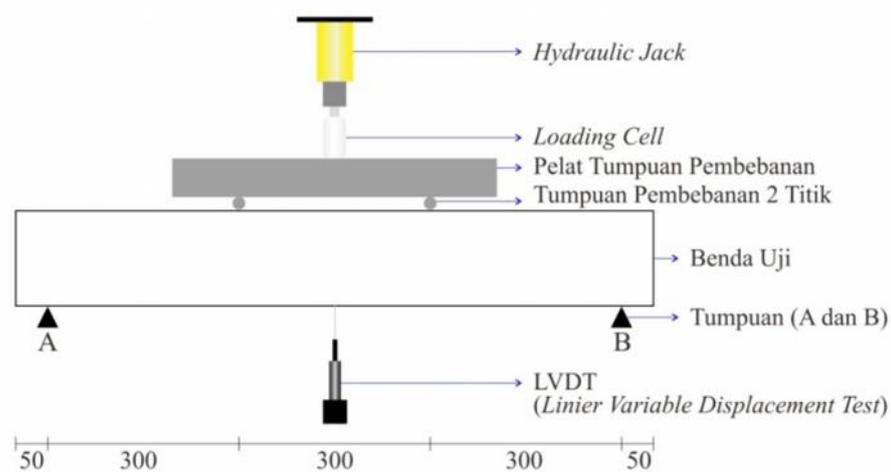
3) Persiapan tulangan sengkang yang digunakan untuk perkuatan atau sengkang luar yaitu tulangan baja polos dengan diameter 6 mm, dengan cara memotong dan membentuk tulangan U dan ditempatkan pada coakan yang dibuat pada permukaan benda uji.

4) Pemasangan tulangan sengkang luar pada coakan di permukaan benda uji dengan menambahkan Epoxy sebagai pengikat antar permukaan benda uji dengan sengkang luar.

4.5.2.3 Tahapan Pengujian

Adapun tahapan pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

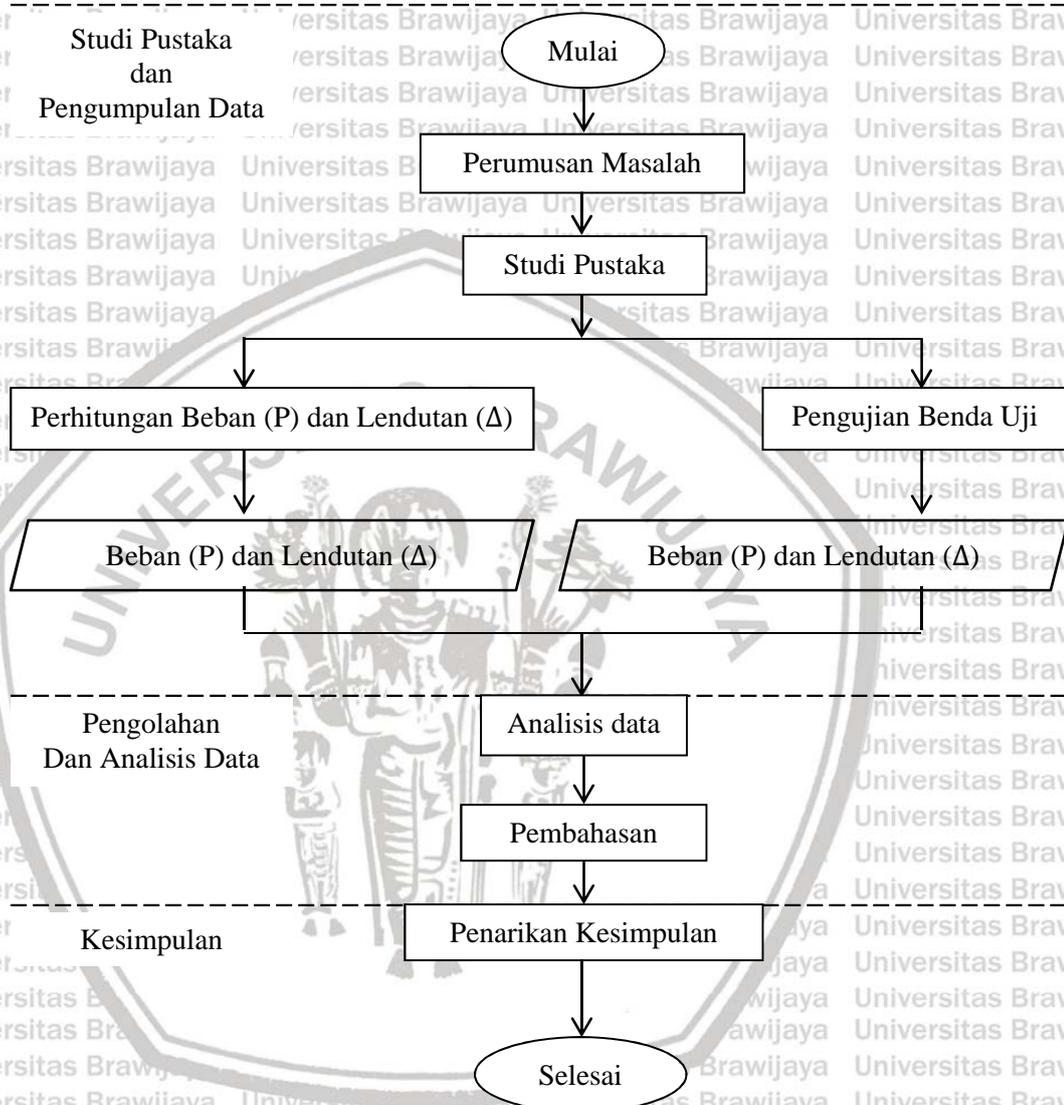
- 1) Mengambil dan meletakkan benda uji pada *frame* pengujian sesuai Gambar 4.2.
- 2) Memasang *loading cell* dan LVDT pada lokasi yang ditentukan kemudian diset pembacaannya.
- 3) Pengujian dimulai dengan pemberian beban dengan beban bertahap sesuai perencanaan.
- 4) Mencatat lendutan yang terjadi, menggambar pola retak yang terjadi pada permukaan sisi samping-samping balok dan diberi nomor terjadinya retak dan mencatat nomor pola retak yang terjadi setiap pembebanan.



Gambar 4.2 Detail Penempatan Benda Uji

4.5.5 Alur Penelitian

Alur penelitian pada penelitian ini mengikuti diagram alir penelitian pada Gambar 4.3 berikut ini:



Gambar 4.3 Diagram Alir Penelitian

4.5.5.1 Studi Pustaka dan Pengumpulan Data

Studi pustaka dilakukan untuk mendapatkan referensi acuan yang tepat dalam penyusunan penelitian ini. Referensi acuan tersebut diperoleh dari sumber-sumber tertulis baik tercetak maupun elektronik berupa buku, jurnal, skripsi, tesis, disertasi ataupun lainnya. Setelah itu dilakukan

pengumpulan data dengan melakukan eksperimen pengujian sampel yang digunakan yaitu berupa pengujian lentur pada balok beton bertulang tanpa dan menggunakan perkuatan geser berupa sengkang luar.

4.5.5.2 Pengolahan dan Analisis Data

Data yang dihasilkan dari pengujian akan diolah dan dianalisis sesuai rumusan masalah yang telah disampaikan pada Bab 1. Data yang diperoleh pada pengujian berupa kapasitas beban lentur dan pola retak yang terjadi. Data tersebut kemudian diolah dan dibandingkan kapasitas yang mampu ditahan oleh balok serta pola retak yang terjadi antara benda uji B1a – B4a, dan B1b – B4b. Data akan disajikan dalam bentuk grafik dan penjelasan untuk lebih memudahkan dalam menarasikan hasil penelitian.

4.5.5.3 Penarikan Kesimpulan

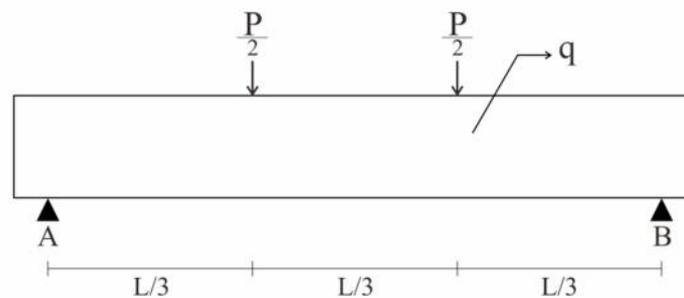
Setelah semua tahap dilakukan maka tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan. Pada tahap penarikan kesimpulan ini dapat diketahui seberapa besar indeks peningkatan kekuatan pada balok beton bertulang yang menggunakan sengkang luar serta perubahan pola retak yang terjadi.

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisa Penampang Balok

5.1.1 Statika Balok

Pengujian lentur pada balok beton bertulang memakai gelagar sederhana dengan pembebanan titik berdasarkan ASTM C78:2002 serta menyesuaikan dengan benda uji balok yang digunakan seperti yang terlihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Jarak tumpuan dan titik pembebanan pada pengujian balok

Dari gambar diatas bisa didapatkan besarnya reaksi yang terjadi pada tumpuan (R_A dan R_B), besarnya gaya geser maksimum yang terjadi (V_A dan V_B), besarnya momen maksimum (M_{maks}) pada tengah bentang serta besarnya beban maksimum (P) yang dapat diterima oleh balok beton bertulang sebagai berikut:

$$R_A = \frac{\left[\frac{P}{2}\left(L - \frac{L}{3}\right)\right] + \left[\frac{P}{2}\left(\frac{L}{3}\right)\right] + \left[\frac{1}{2}qL^2\right]}{L}$$

$$= \frac{\left[\frac{P}{2}\left(\frac{2L}{3}\right)\right] + \left[\frac{P}{2}\left(\frac{L}{3}\right)\right] + \left[\frac{1}{2}qL^2\right]}{L}$$

$$= \frac{\left[\frac{P}{3}\right] + \left[\frac{P}{6}\right] + \left[\frac{1}{2}qL^2\right]}{L}$$

$$= \frac{P}{2} + \frac{q}{2}$$

$$R_A = R_B = V_A = V_B = \frac{P}{2} + \frac{q}{2} \quad (5-1)$$

$$M_{maks} = \left[R_A \left(\frac{L}{2}\right)\right] - \left[\frac{P}{2}\left(\frac{L}{2} - \frac{L}{3}\right)\right] - \left[\frac{qL^2}{8}\right]$$

$$= \left[\left(\frac{P}{2} + \frac{q}{2}\right)\left(\frac{L}{2}\right)\right] - \left[\frac{PL}{6}\right] - \left[\frac{qL^2}{8}\right]$$

$$M_{\text{maks}} = \left[\frac{P}{4} + \frac{qL^2}{4} \right] - \left[\frac{P}{1} \right] - \left[\frac{qL^2}{8} \right]$$

$$= \frac{P}{4} + \frac{qL^2}{4} - \left[\frac{P}{1} \right] - \left[\frac{qL^2}{8} \right]$$

$$= \frac{P}{6} + \frac{qL^2}{8}$$

$$M_{\text{maks}} = \frac{P}{6} + \frac{qL^2}{8} \quad (5-2)$$

$$P = \frac{M_{\text{maks}} - \frac{qL^2}{8}}{\frac{L}{6}} \quad (5-3)$$

Dimana M_{maks} adalah momen maksimum pada tengah bentang balok, q adalah berat sendiri balok, P adalah total beban terpusat yang bekerja pada balok dan L adalah panjang efektif balok. M_{maks} dan P nantinya digunakan untuk menghitung beban geser dan momen yang terjadi.

5.1.2 Parameter Hasil Pengujian

Seperti yang sudah dijelaskan pada BAB 4 dimana benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah benda uji peneliti terdahulu. Benda uji tiap balok memiliki campuran material lain sesuai perencanaan peneliti terdahulu, namun dalam penelitian ini tidak membahas tentang campuran material tersebut.

Pada penelitian ini tetap menggunakan data-data hasil pengujian yang telah dilakukan yaitu pengujian pada silinder dan balok beton bertulang untuk mendapatkan parameter-parameter aktual yang nantinya akan digunakan untuk perhitungan analisis. Adapun parameter-parameter hasil pengujian dan hasil perhitungan disajikan pada Tabel 5.1 – Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5.1 Parameter hasil pengujian dan perhitungan pada silinder dan balok (B1a dan B1b)

Parameter	Hasil	Satuan	Parameter	Hasil	Satuan
b	= 150	mm	f_r	= 3,37	MPa
h	= 150	mm	E_c	= 22640	MPa
L	= 900	mm	f_y	= 240	MPa
d	= 106	mm	f_u	= 370	MPa
d'	= 29	mm	E_s	= 200000	MPa
A_s	= 904,78	mm ²	i	= 0,85	Universitas Brawijaya
A_s'	= 56,55	mm ²	n	= 8,83	Universitas Brawijaya
f_c'	= 23	MPa			

Tabel 5.2 Parameter hasil pengujian dan perhitungan pada silinder dan balok (B2a dan B2b)

Parameter	Hasil	Satuan	Parameter	Hasil	Satuan
b	= 150	mm	f_r	= 3,55	MPa
h	= 150	mm	E_c	= 23816	MPa
L	= 900	mm	f_y	= 240	MPa
d	= 106	mm	f_u	= 370	MPa
d'	= 29	mm	E_s	= 200000	MPa
A_s	= 904,78	mm ²	i	= 0,85	
A_s'	= 56,55	mm ²	n	= 8,40	
f_c'	= 26	MPa			

Tabel 5.3 Parameter hasil pengujian dan perhitungan pada silinder dan balok (B3a dan B3b)

Parameter	Hasil	Satuan	Parameter	Hasil	Satuan
b	= 150	mm	f_r	= 3,40	MPa
h	= 150	mm	E_c	= 22849	MPa
L	= 900	mm	f_y	= 240	MPa
d	= 106	mm	f_u	= 370	MPa
d'	= 29	mm	E_s	= 200000	MPa
A_s	= 904,78	mm ²	i	= 0,85	
A_s'	= 56,55	mm ²	n	= 8,75	
f_c'	= 24	MPa			

5.2 Rasio Tulangan

Perhitungan rasio tulangan dimaksudkan untuk mengetahui rasio tulangan yang terpasang. Adapun tulangan tarik yang terpasang adalah tulangan polos dengan diameter 12 mm, tulangan tekan yang terpasang berdiameter 6 mm sedangkan tulangan sengkang yang terpasang berdiameter 6 mm untuk lebih detail tentang gambar penampang benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.1. Adapun rasio tulangan yang terpasang adalah sebagai berikut:

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f} \dots\dots\dots (5-4)$$

$$\rho_{\min} = 0,0058$$

$$\rho_b = \frac{0,8 \cdot f_c' \cdot \beta_1}{f_y} \cdot \frac{6}{6 + f} \dots\dots\dots (5-5)$$

$$\rho_b = 0,0597$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \rho_b \dots\dots\dots (5-6)$$

$$\rho_{\max} = 0,0448$$

Sedangkan rasio tulangan yang terpasang adalah:

$$\rho = \frac{A}{b} \dots\dots\dots (5-7)$$

$$\rho = \frac{9,7}{1,1} = 0,057$$

Dari hasil perhitungan, rasio tulangan yang terpasang ternyata lebih besar dari rasio tulangan maksimum sehingga mengakibatkan balok termasuk berpenampang tulangan lebih (*over reinforced*), yaitu suatu penampang yang mengandung jumlah luas batang tulangan tarik lebih daripada penampang bertulangan ideal sehingga letak garis netral turun ke bawah lebih dekat ke serat tepi tarik dan beban maksimum mengakibatkan tercapainya tegangan ijin tekan beton terlebih dahulu daripada tegangan ijin tarik baja.

5.3 Kapasitas Geser dan Beban Geser

Perhitungan kapasitas geser dimaksudkan untuk mengetahui kapasitas geser yang mampu diterima oleh balok dan sengkang yang terpasang. Benda uji balok dalam penelitian ini menggunakan sengkang diameter 6 mm dengan spasi antar sengkang 200 mm seperti yang terlihat pada Gambar 4.1. Untuk mengetahui kapasitas geser tersedia (V_n), maka perlu menghitung kapasitas geser beton (V_c) dan kapasitas geser yang mampu diterima oleh sengkang yang terpasang (V_s).

Adapun contoh perhitungannya adalah sebagai berikut:

- 1) Kapasitas geser yang disumbang oleh beton (V_c)

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'} bd$$

$$= \frac{1}{6} \times \sqrt{23} \times 150 \times 106$$

$$= 12765 \text{ N}$$

$$= 1,28 \text{ Ton}$$

- 2) Kapasitas geser sengkang internal ($V_{s \text{ int}}$)

$$V_{s \text{ int}} = \frac{A \cdot f \cdot d}{s \cdot i}$$

Sengkang internal yang terpasang adalah $\emptyset 6-200$

$$V_{s \text{ int}} = \frac{(0,2 \times \pi \times 6 \times 6) \times 2 \times 1}{2}$$

$$= 7193 \text{ N} = 0,72 \text{ Ton}$$

3) Kapasitas geser nominal balok dengan sengkang internal ($V_{n int}$)

$$\begin{aligned} V_{n int} &= V_c + V_{s int} \\ &= 1,28 + 0,72 \\ &= 2,00 \text{ Ton} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas diperoleh kapasitas geser nominal balok tanpa perkuatan sengkang eksternal $V_{n int} = 2,00$ Ton. Kemudian dihitung beban geser yang terjadi dengan cara menggunakan Persamaan (5-1) yaitu sebagai berikut:

$$V = \frac{P}{2} + \frac{q}{2}$$

P dalam persamaan tersebut kemudian diasumsikan sebagai beban geser maksimal yang terjadi pada balok tanpa perkuatan sengkang eksternal yang kemudian disebut $P_{g int}$.

$$\begin{aligned} P_{g int} &= \left(V_{n int} - \frac{q}{2} \right) 2 \\ &= \left(2,00 - \frac{6,1 \cdot 9}{2} \right) 2 \\ &= 3937 \text{ Kg} \\ &= 3,94 \text{ Ton} \end{aligned}$$

Sedangkan kapasitas geser nominal yang terjadi dengan penambahan perkuatan berupa sengkang eksternal ($V_{s eks}$) dapat diperoleh dengan perhitungan berikut:

1) Kapasitas geser sengkang eksternal ($V_{s eks}$)

$$V_{s eks} = \frac{A \cdot f \cdot d}{s \cdot e}$$

Sengkang eksternal yang terpasang adalah $\emptyset 6-75$ dan d yang digunakan adalah setinggi h yaitu 150 mm.

$$\begin{aligned} V_{s eks} &= \frac{(0,2 \times \pi \times 6 \times 6) \times 2 \times 1}{7} \\ &= 27143 \text{ N} \\ &= 2,71 \text{ Ton} \end{aligned}$$

2) Kapasitas geser nominal balok dengan penambahan perkuatan sengkang eksternal ($V_{n eks}$)

$$\begin{aligned} V_{n eks} &= V_c + V_{s int} + V_{s eks} \\ &= 1,28 + 0,72 + 2,71 \end{aligned}$$

$$= 4,71 \text{ Ton}$$

Dari perhitungan diatas diperoleh kapasitas geser nominal balok dengan perkuatan sengkang eksternal $V_{n \text{ eks}} = 4,71 \text{ Ton}$. Kemudian dihitung beban geser yang terjadi dengan cara menggunakan Persamaan (5-1).

Beban geser maksimal yang terjadi pada balok dengan perkuatan sengkang eksternal disebut sebagai $P_{g \text{ eks}}$.

$$P_{g \text{ eks}} = \left(V_{n \text{ eks}} - \frac{q}{2} \right) L$$

$$= \left(4,71 - \frac{6,1 \cdot 9}{2} \right) 2$$

$$= 9365 \text{ Kg}$$

$$= 9,37 \text{ Ton}$$

Untuk hasil perhitungan geser nominal dan beban geser secara ringkas dapat dilihat dalam tabel berikut:

Tabel 5.4 Hasil perhitungan beban geser

Benda Uji	V_n Ton	P_g Ton
B1a	2,00	3,94
B1b	4,71	9,37
B2a	2,06	4,07
B2b	4,78	9,50
B3a	3,96	3,96
B3b	4,72	9,39

5.4 Kapasitas Lentur

Perhitungan analitis kapasitas lentur dalam penelitian ini untuk melihat seberapa besar kapasitas lentur yang tersedia yaitu dengan asumsi tulangan lentur mencapai batas lentur maksimal. Adapun perhitungan kapasitas lentur adalah sebagai berikut:

- 1) Menghitung letak garis netral (c)

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0,8 f_c' b}$$

$$= 68,81 \text{ mm}$$

$$c = a / \beta_1$$

$$= 80,95 \text{ mm}$$

2) Momen nominal penampang (M_n)

$$\begin{aligned} M_n &= C_c (d - a/2) + C_d (d - d') \\ &= 0,85 f_c' b a (d - a/2) + A_s' f_y (d - d') \\ &= 15619915 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

3) Beban lentur (P_{lentur})

$$\begin{aligned} P_{\text{lentur}} &= \frac{M_u \frac{ql^2}{8}}{\frac{l}{6}} \\ &= 10,37 \text{ Ton} \end{aligned}$$

Untuk hasil perhitungan kapasitas lentur dan geser secara ringkas dapat dilihat dalam tabel berikut:

Tabel 5.5 Perbandingan hasil perhitungan analitis kapasitas geser dan lentur

Benda Uji	V_n Ton	P_g Ton	P_{lentur} Ton
B1a	2,00	3,94	10,37
B1b	4,71	9,37	10,37
B2a	2,06	4,07	10,82
B2b	4,78	9,50	10,82
B3a	3,96	3,96	10,46
B3b	4,72	9,39	10,46

5.5 Lendutan

Perhitungan lendutan secara analisis menggunakan Persamaan (2-9) pada BAB 2. Dalam penelitian ini dihitung lendutan (Δ) secara analisis ketika balok masih elastis yaitu pada saat balok sebelum retak dan perhitungan lendutan nantinya menggunakan beban yang mengakibatkan balok retak (P_{crack}). Adapun contoh perhitungan lendutannya adalah sebagai berikut:

1) Luas penampang transformasi (A_{tr})

$$\begin{aligned} A_{tr} &= A_g + [(n-1)A_s] + [(n-1)A_s'] \\ &= (150 \times 150) + [(8,83-1)940,78] + [(8,83-1)56,55] \\ &= 30031 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

2) Menghitung garis netral penampang transformasi (\bar{y})

$$\bar{y} = \frac{A_g \times \frac{h}{2} + [(n-1)A_s d] + [(n-1)A_s' d']}{A_{tr}}$$

$$= \frac{[1 \times 1 \times \frac{1}{2}] + [(8,8 - 1)9,7 \times 1] + [(8,8 - 1)5,5 \times 2]}{3}$$

$$= 81,64 \text{ mm}$$

3) Menghitung momen inersia retak (I_{cr})

$$I_{cr} = I_g + \left[A_g \times \left(\bar{y} - \frac{h}{2} \right)^2 \right] + [(n-1) \times A_s \times (d - \bar{y})^2] + [(n-1) \times A_s' \times (\bar{y} - d)^2]$$

$$= \left(\frac{1}{12} \times 150 \times 150^3 \right) + \left[(150 \times 150) \times \left(81,64 - \frac{150}{2} \right)^2 \right]$$

$$+ [(8,83 - 1) \times 904,78 \times (106 - 81,64)^2] + [(8,83 - 1) \times 56,55 \times (81,64 - 29)^2]$$

$$= 48613105 \text{ mm}^4$$

4) Momen retak (M_{crack})

$$M_{crack} = \frac{I_c \times f_r}{h - \bar{y}}$$

$$= \frac{48613105 \times 2,9}{106 - 81,64}$$

$$= 2397821 \text{ Nmm}$$

5) Beban ketika retak (P_{crack})

$$P_{crack} = \frac{M_{crack}}{\frac{L}{6}}$$

$$= \frac{\left(\frac{2123784}{10000} \right) - \frac{6,1 \times 0,9^2}{8}}{\frac{0,9}{6}}$$

$$= 1298 \text{ Kg}$$

$$= 1,30 \text{ Ton}$$

6) Momen inersia efektif (I_e)

Menurut SNI 03-2847-2002 pada pasal 11.5.2.3 besarnya lendutan seketika akibat pembebanan harus dihitung dengan momen inersia sebagai berikut:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_c} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_c} \right)^3 \right] I_c$$

$$= \left(\frac{2397821}{2397821} \right)^3 \left(\frac{1}{12} \times 150 \times 150^3 \right) + \left[1 - \left(\frac{2397821}{2397821} \right)^3 \right] 48613105$$

$$= 42187500 \text{ mm}^4$$

7) Lendutan

Lendutan dihitung menggunakan Persamaan (2-9)

$$\Delta = \frac{P_u a^2}{2 E_c I_e} (3L^2 - 4a^2)$$

$$= \frac{1}{2} \times (2 \times 0,142187500 \times [(3 \times 900^2) - (4 \times 300^2)])$$

$$= 0,18 \text{ mm}$$

Untuk hasil perhitungan lendutan antara balok tanpa perkuatan sengkang eksternal maupun dengan perkuatan sengkang eksternal tidak ada bedanya karena dalam rumus yang digunakan untuk menghitung lendutan tidak terpengaruh oleh sengkang yang terpasang. Hasil perhitungan lendutan tiap balok dapat dilihat dalam tabel berikut:

Tabel 5.6 Hasil perhitungan lendutan balok di tengah bentang

Benda Uji	Δ mm
B1a	0,21
B1b	0,21
B2a	0,21
B2b	0,21
B3a	0,21
B3b	0,21

5.6 Hasil Eksperimen

Pengujian lentur balok beton bertulang dilakukan dengan pembebanan bertahap sebesar 500 kg dengan pembagian beban sebesar 30 cm pada tengah bentang. Perbandingan hasil analisis dan hasil pengujian balok disajikan dalam tabel berikut:

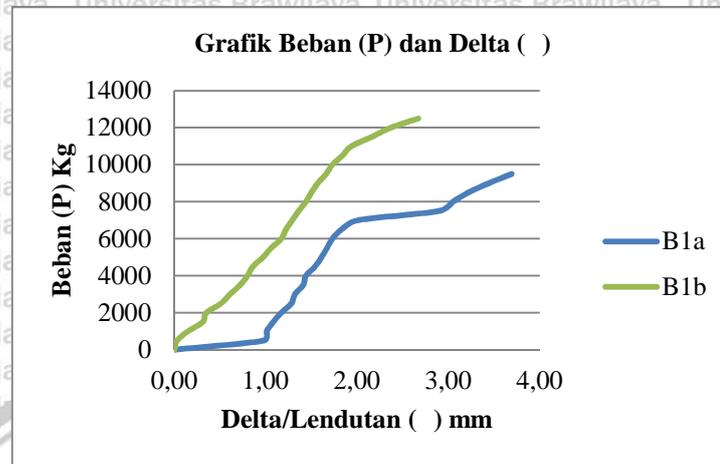
Tabel 5.7 Perbandingan beban maksimal hasil analisis dan eksperimen

Benda Uji	P g (Ton)		i	
	Analisis	Eksperimen	Analisis	Eksperimen
B1a	3,94	9,50	137,82%	31,58%
B1b	9,37	12,50		
B2a	4,07	10,50	133,42%	0%
B2b	9,50	10,50		
B3a	3,96	10,50	137,12%	4,76%
B3b	9,39	11,00		

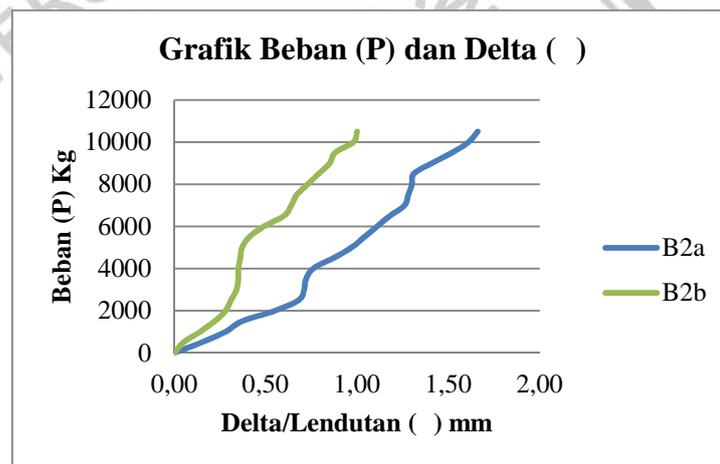
Keterangan: i adalah indeks peningkatan beban

$$i = \frac{P_{ge} - P_{gi}}{P_{gi}}$$

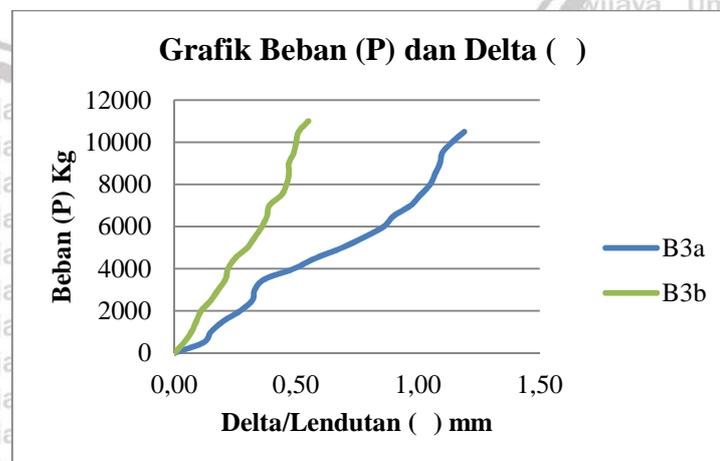
Hasil pengujian lentur balok bisa dilihat dalam grafik perbandingan beban – lendutan berikut:



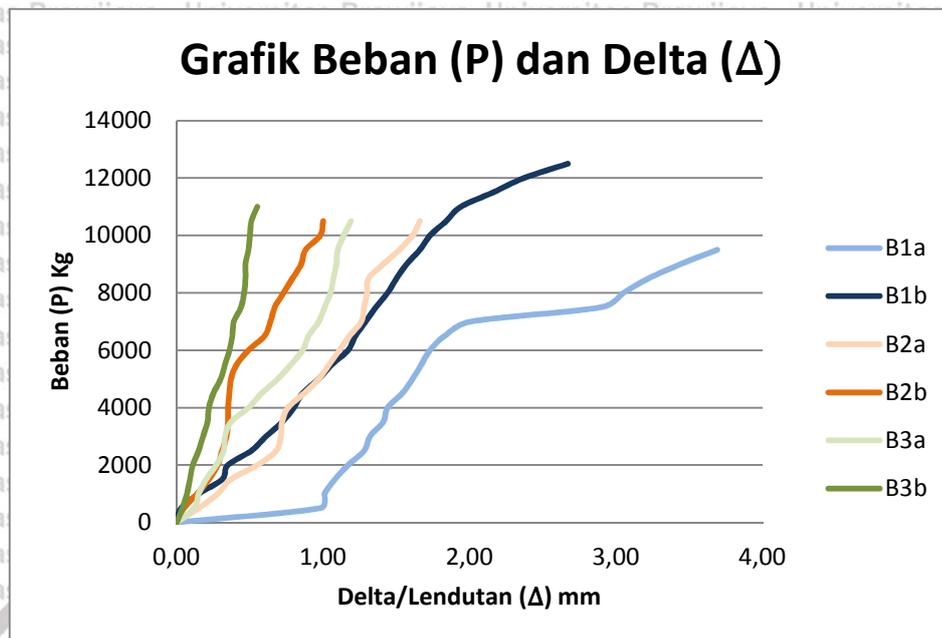
Gambar 5.2 Grafik perbandingan P dan Balok B1a dan B1b hasil eksperimen



Gambar 5.3 Grafik perbandingan P dan Balok B2a dan B2b hasil eksperimen



Gambar 5.4 Grafik perbandingan P dan Balok B3a dan B3b hasil eksperimen



Gambar 5.5 Grafik gabungan perbandingan P dan Balok hasil eksperimen

Hasil perhitungan analisis menunjukkan bahwa dengan perkuatan sengkang luar maka kapasitas geser balok mengalami kenaikan kapasitas yaitu pada balok B1a: 3,94 Ton menjadi B1b: 9,37 Ton; B2a: 4,07 Ton menjadi B2b: 9,50 Ton dan B3a: 3,96 Ton menjadi B3b: 9,39 Ton. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kapasitas balok setelah diuji mengalami kenaikan kapasitas hanya pada balok tipe B1 dan B3 yaitu pada balok B1a: 9,50 Ton menjadi B1b: 12,57 Ton; B2a: 10,50 Ton menjadi B2b: 10,50 Ton dan B3a: 10,50 Ton menjadi B3b: 11,00 Ton. Sehingga jika dihitung indeks peningkatan kekuatannya secara analitis yaitu 137,82%; 133,42%; 137,12% sedangkan hasil eksperimen hanya pada balok tipe B1 dan B3 saja yang mengalami peningkatan kekuatan mencapai kapasitas lentur pada balok dengan perkuatan sengkang luar yaitu secara berurutan 31,58% dan 4,76%.

Tabel 5.8 Perbandingan lendutan serta kekakuan hasil analisis dan eksperimen

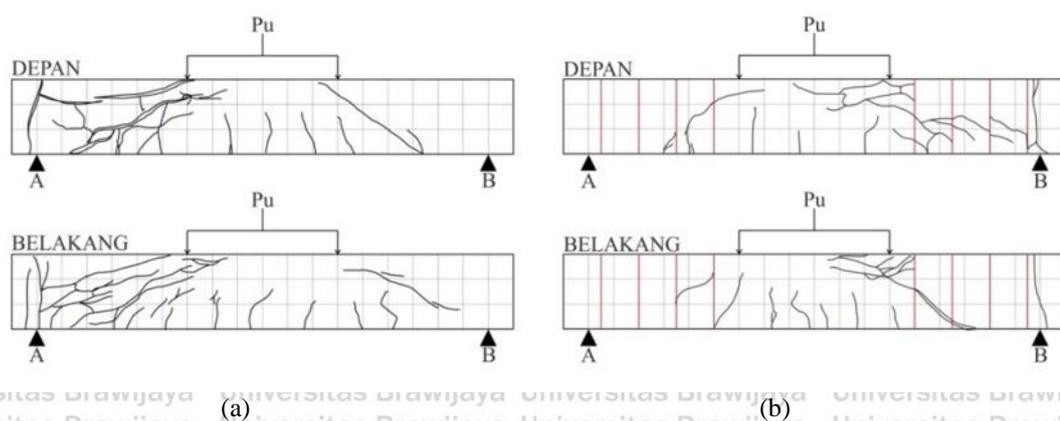
Benda Uji	P_{crack} (Ton)		Δ_{crack} (mm)		K (ton/mm)	
	Analisis	Eksperimen	Analisis	Eksperimen	Analisis	Eksperimen
B1a	1,56	2,50	0,21	1,28	7,38	1,95
B1b	1,56	3,00	0,21	0,61	7,38	4,92
B2a	1,62	2,00	0,21	0,55	7,77	3,64
B2b	1,62	2,50	0,21	0,31	7,77	8,06
B3a	1,57	2,50	0,21	0,32	7,45	7,81
B3b	1,57	3,00	0,21	0,18	7,45	16,67

Analisis lendutan yang dilakukan adalah analisis besarnya lendutan yang terjadi pada saat balok masih elastis dan dihitung ketika balok mengalami retak pertama dengan beban berupa P_{crack} , sedangkan nilai lendutan eksperimen yang digunakan merupakan nilai lendutan yang terjadi pada tengah bentang dengan pembacaan lendutan dari LVDT.

Kekakuan dapat didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit *displacement*. Dari Gambar 5.2 – 5.5 hubungan beban – lendutan hasil pengujian lentur balok dapat terlihat bahwa balok tanpa perkuatan tulangan sengkang eksternal memiliki grafik hubungan beban – lendutan lebih landai daripada balok dengan perkuatan yang artinya balok dengan perkuatan geser berupa tulangan sengkang eksternal lebih kaku.

5.7 Pola Retak

Pada saat pengujian dilakukan pencatatan serta penggambaran retak yang terjadi akibat bertambahnya beban yang diberikan pada balok. Pola retak yang digambar adalah pola retak pada sisi depan dan sisi belakang balok beton bertulang. Untuk lebih jelasnya, gambar pola retak yang terjadi dapat dilihat pada gambar berikut:

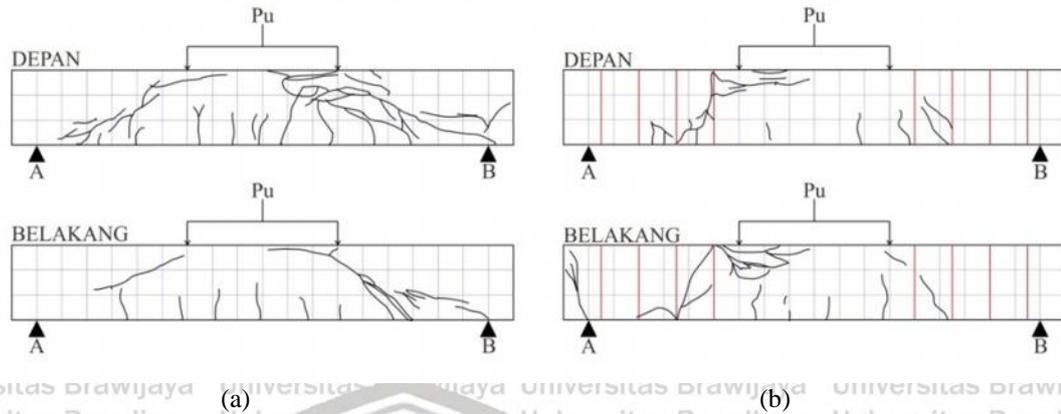


(a)

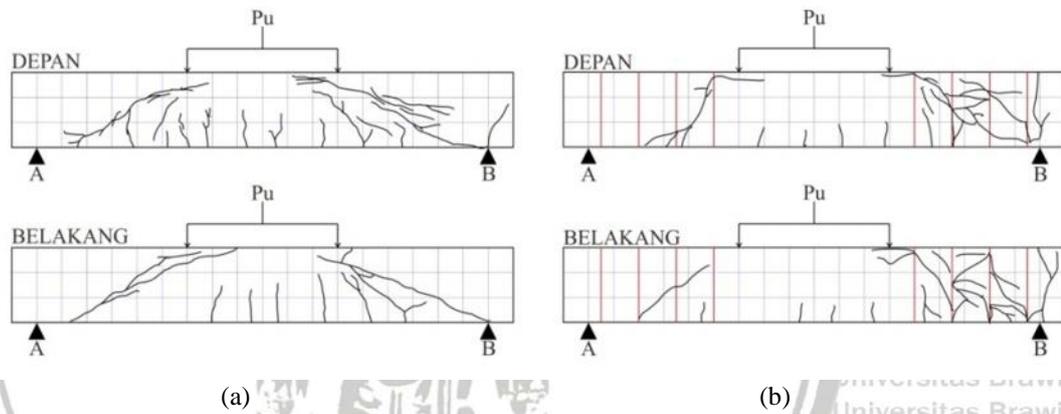
(b)

(a) Balok B1a; (b) Balok B1b;

Gambar 5.6 Pola retak B1a dan B1b



(a) Balok B2a; (b) Balok B2b;
Gambar 5.7 Pola retak B2a dan B2b



(a) Balok B3a; (b) Balok B3b;
Gambar 5.8 Pola retak B3a dan B3b

Dari Gambar 5.6 sampai 5.8 dapat dilihat bahwa pola retak yang terjadi pada balok tanpa perkuatan tulangan sengkang eksternal (B1a, B2a dan B3a) merupakan kombinasi retak lentur dan geser, namun retak geser yang terjadi sangatlah besar hal ini terjadi karena kapasitas geser sengkang yang terpasang tidak memenuhi geser maksimal yang terjadi sehingga retak di daerah geser akan terus bertambah lebar sampai tegangan tekan pada balok tercapai. Disisi lain rasio tulangan yang terpasang termasuk *over reinforced* sehingga sebelum beban lentur maksimal tercapai, balok didaerah tekan akan mencapai tegangan maksimal terlebih dahulu sehingga balok daerah tekan akan mengalami retak dan bertambah dengan retak akibat sengkang internal yang mencapai kapasitasnya. Sedangkan pada balok dengan penambahan tulangan sengkang eksternal (B1b, B2b dan B3b) dapat dilihat bahwa retak geser cenderung lebih sedikit dibandingkan retak geser

pada balok tanpa perkuatan. Tetapi sama halnya, rasio tulangan yang terpasang termasuk *over reinforced* sehingga balok daerah tekan akan mencapai tegangan maksimal lebih dulu sebelum tulangan tarik leleh.



BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan analisis menunjukkan bahwa dengan perkuatan sengkang luar maka kapasitas geser balok mengalami kenaikan kapasitas yaitu pada balok B1a: 3,94 Ton menjadi B1b: 9,37 Ton; B2a: 4,07 Ton menjadi B2b: 9,50 Ton dan B3a: 3,96 Ton menjadi B3b: 9,39 Ton. Sedangkan kapasitas lentur secara analitis didapat B1a dan B1b sebesar 10,37 Ton, B2a dan B2b sebesar 10,82 Ton, B3a dan B3b sebesar 10,46 Ton. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kapasitas balok setelah diuji mengalami kenaikan kapasitas hanya pada balok tipe B1 dan B3 yaitu pada balok B1a: 9,50 Ton menjadi B1b: 12,57 Ton; B2a: 10,50 Ton menjadi B2b: 10,50 Ton dan B3a: 10,50 Ton menjadi B3b: 11,00 Ton. Sehingga jika dihitung indeks peningkatan kekuatannya secara analitis yaitu 137,82%; 133,42%; 137,12% sedangkan hasil eksperimen hanya pada balok tipe B1 dan B3 saja yang mengalami peningkatan kekuatan mencapai kapasitas lentur pada balok dengan perkuatan sengkang luar yaitu secara berurutan 31,58% dan 4,76%. Untuk lendutan yang terjadi menurut perhitungan analisis untuk balok tanpa perkuatan sengkang luar maupun balok dengan perkuatan sengkang luar sebesar 0,21 mm, untuk nilai lendutan memiliki nilai yang sama karena untuk perhitungan lendutan menggunakan parameter-parameter penampang saja tanpa menggunakan parameter sengkang. Untuk lendutan dari pengujian balok di laboratorium, pada balok tanpa perkuatan sengkang luar sebesar 1,28 mm; 0,55 mm dan 0,32 mm sedangkan lendutan pada balok dengan perkuatan sengkang luar lebih kecil dari pada balok tanpa perkuatan sengkang luar yaitu sebesar 0,61 mm; 0,31 mm dan 0,18 mm. Dapat disimpulkan bahwa dengan perkuatan sengkang luar maka balok cenderung lebih kaku.

2. Pola retak yang terjadi pada balok tanpa perkuatan tulangan sengkang eksternal (B1a, B2a dan B3a) merupakan kombinasi retak lentur dan geser, namun retak geser yang terjadi sangatlah besar hal ini terjadi karena kapasitas geser sengkang yang terpasang tidak memenuhi geser maksimal yang terjadi sehingga retak di daerah geser akan terus bertambah lebar sampai balok daerah tarik mencapai kapasitasnya. Disisi lain rasio tulangan yang terpasang termasuk *over reinforced* sehingga sebelum beban lentur maksimal tercapai, balok didaerah tekan akan mencapai tegangan maksimal terlebih dahulu sehingga balok daerah tekan akan mengalami retak dan bertambah dengan retak akibat sengkang internal yang mencapai kapasitasnya. Sedangkan pada balok dengan penambahan tulangan sengkang eksternal (B1b, B2b dan B3b) dapat dilihat bahwa retak geser cenderung lebih sedikit dibandingkan retak geser pada balok tanpa perkuatan. Tetapi sama halnya, rasio tulangan yang terpasang termasuk *over reinforced* sehingga balok daerah tekan akan mencapai tegangan maksimal lebih dulu sebelum tulangan tarik leleh. Namun dengan penambahan sengkang apabila dilihat dari perhitungan analisis, dengan ditambahkan sengkang luar, geser nominal yang dihasilkan memenuhi kapasitas geser yang dibutuhkan.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk lebih menyempurnakan hasil penelitian ini atau untuk dikembangkan lebih lanjut. Adapun saran tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Memperhatikan detail pemasangan sengkang luar terkait kedalaman coakan disamakan atau dibuat lebih besar $\pm 3\text{mm}$ dari diameter sengkang luar yang digunakan agar sengkang luar yang terpasang nantinya benar-benar terbenam kedalam balok sehingga permukaan balok terlihat lebih rata setelah diberi perkuatan serta antara sengkang luar dengan balok menjadi satu kesatuan yang lebih solid. Selain itu juga lebih memperhatikan Standar Operasional Prosedur (SOP) pengaplikasian bahan yang digunakan untuk menempelkan

sengkang luar dengan balok agar ikatan antara sengkang dengan balok mendapatkan ikatan yang kuat.

2. Melakukan penelitian lanjutan tentang perkuatan geser pada balok beton bertulang dengan rasio tulangan *over reinforced* dengan tambahan pengujian laboratorium berupa pemasangan *strain gauge* pada tulangan tekan dan tarik untuk mengetahui kondisi aktual tulangan pada waktu pengujian.
3. Melakukan penelitian lanjutan tentang perkuatan geser pada balok beton bertulang dengan rasio tulangan *under reinforced*.





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

Alami, F., dan Widyawati, R. 2010. Studi Eksperimental Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Dengan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). *Jurnal Rekayasa*. 14(2).

American Concrete Institute. 2003. *Control of Deflection in Concrete Structures*. ACI 435R-95. ACI Committee 435.

Badan Standarisasi Nasional. 2002. Tata Cara Perhitungan Struktur BETON Untuk Bangunan Gedung. SNI 03-2847-2002. Jakarta: BSN.

Deskarta, P. 2009. Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Menggunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP). *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*. 13(2):199-208.

Gere, J.M., dan Timoshenko, S. P. 20. Penggunaan Pelat Baja dan Baut Sebagai Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang. *Senastek 2016*.

Ghai, R., dkk. 2017. *Strengthening or RDD Beams in Shear by Using SBR Polymer-Modified Ferrocement Jacketing Technique*. *Hindawi Advances in Civil Engineering*. Volume 2018.

MacGregor, J. G., dan Wight, J. K. 2012. *Reinforced Concrete Mechanics & Design*. Cetakan Keenam. New Jersery: Pearson Education, Inc.

Minh, H., dan Mutsuyoshi, H. 2008. *Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy Bonded Steel Plates, CFRP Sheets and Externally Anchored Stirrups*. *Vietnam Jurnal of Mechanics*. 30(4):299-306.

Munaf, D. R., dkk. 2003. *Concrete Repair & Maintenance*. Cetakan Pertama. Jakarta: Yayasan JOHN HI-TECH IDETAMA.

Nawy, E. G. 2010. Beton Bertulang. Cetakan Keempat. Bandung: PT. Refika Aditama.

Nurlina, S. 2008. Struktur Beton. Cetakan Pertama. Malang: BARGIE Media.

Park, P., dan Paulay, T. 1973. *Reinforced Concrete Structures*. Canada: John Wiley & Sons Inc.

Sarwono, J. 2006. *Metode Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif*. Cetakan Pertama. Yogyakarta: Graha Ilmu

Sesetty, Y. 2018. *Shear Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams*. https://www.researchgate.net/publication/322700956_Shear_rehabilitation_of_reinforced_concrete_beams. [Diakses pada 23 November 2018].

Sudarsana, IK., Suputra, IG.N., dan Sajana, IP. C. 2016. Penggunaan Pelat Baja dan Baut Sebagai Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang. *Senastek 2016*.

