

STUDI EKSPERIMENTAL KUAT LENTUR BALOK DENGAN PELEBARAN DIMENSI PADA DAERAH TUMPUAN BALOK BETON BERTULANG DAN PEMODELAN MENGGUNAKAN LUSAS

Claudia Valentine¹, Johan Ardianto² dan Ade Lisantono^{3,*}

¹Alumni Program Sarjana, Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44 Yogyakarta

E-mail: claudyavalentinenubu@gmail.com

^{2,3}Departemen Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44 Yogyakarta

E-mail: johan.ardianto@uajy.ac.id

*Penulis Korespondensi: ade.lisantono@uajy.ac.id

ABSTRAK

Kegagalan pada balok beton bertulang dapat terjadi pada tumpuan atau sambungan kolom dan balok. Perkuatan pada daerah yang memiliki kapasitas kurang dari yang diperlukan menjadi solusi dalam mencegah kegagalan tumpuan balok. Bentuk perkuatan dapat dalam bentuk penambahan material ataupun penambahan dimensi. Dalam studi eksperimental ini digunakan perkuatan berupa variasi dimensi tumpuan balok yaitu pelebaran dimensi tumpuan balok. Eksperimental dilakukan terhadap dua buah jenis balok kantilever dengan total bentang 1000 mm, balok tanpa pelebaran sebagai balok kontrol dan balok dengan pelebaran dimensi tumpuan sebagai fokus penelitian. Pembebanan yang dilakukan adalah pembebanan terpusat pada bentak 700 mm dari tumpuan balok. Dilakukan pula pemodelan dan analisis menggunakan *software* LUSAS dengan input data sesuai dengan keadaan benda uji eksperimental. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa balok dengan pelebaran dimensi pada daerah tumpuan memiliki ketahanan dalam menahan beban sebesar 145% lebih besar dan kekakuan yang dapat dilihat dari nilai defleksi. Didapat pula transfer retak pada daerah transisi perubahan kedua dimensi tumpuan dan lapangan sebelum kegagalan fatal terjadi di tumpuan atau sambungan balok. Kegagalan pada tumpuan atau sambungan balok diakibatkan karena momen yang diterima sudah melampaui momen maksimal dari balok tersebut. Ada pula analisis menggunakan *software* LUSAS yang menghasilkan perbandingan ketahanan kedua jenis balok terhadap *overloading*. Didapat kapasitas beban balok dengan pelebaran dimensi pada tumpuan menggunakan *software* LUSAS yaitu sebesar 154% lebih besar dari balok kontrol. Selain kapasitas beban maksimum didapat pula nilai defleksi, sehingga dapat dilihat pula daktilitas balok uji.

Kata kunci : kuat lentur, balok dengan pelebaran tumpuan, *software* LUSAS, kapasitas beban, daktilitas.

PENDAHULUAN

Balok merupakan salah satu elemen penting dalam struktur bangunan. Secara umum balok menggunakan bahan beton dan tulangan baja. Beton bertulang dengan kombinasi beton dan tulangan baja adalah kombinasi yang baik, namun kegagalan suatu balok bukanlah hal yang tidak mungkin. Kemajuan zaman memaksa teknologi untuk terus berkembang, sehingga ada inovasi untuk menyempurnakan atau memperbaiki suatu kegagalan. Kegagalan pada daerah tertentu dapat dijadikan evaluasi untuk perencanaan lanjutan. Salah satu kerusakan pada balok sendiri adalah pada tumpuan, atau sambungan antara kolom dan balok.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan dimensi pelebaran pada tumpuan balok terhadap kuat lentur yang didapat setelah pembebanan, secara numerik menggunakan LUSAS, dan secara eksperimental. Diharapkan dapat diamati perbedaan perilaku balok bertulang dengan perbedaan dimensi dengan balok dimensi tanpa pelebaran pada saat runtuh akibat *overloading*. Dari perilaku tersebut maka dapat dilihat perbedaan kuat lentur kedua balok tersebut.

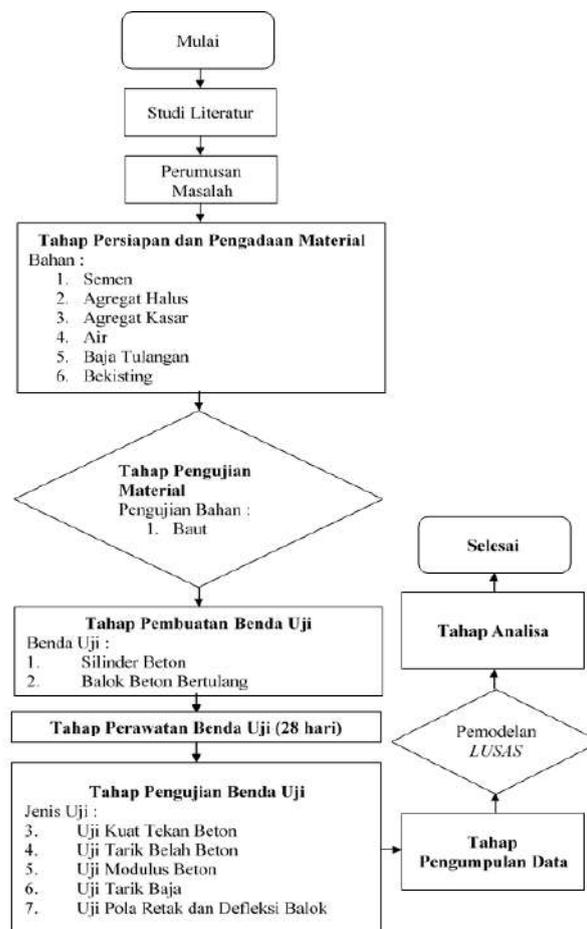
TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian serupa yang berkaitan dengan penambahan dimensi pada tumpuan balok pernah dilakukan oleh beberapa peneliti yang memiliki tujuan yaitu perkuatan pada sambungan balok-kolom. Salah satu penelitian yang memanfaatkan penebalan yaitu penelitian oleh Hernowo dan Lisantono [2016] dengan judul *Retrofitting Sambungan Kolom-Balok Beton Bertulang Ekspansi Planar Segitiga dengan Variasi Ukuran*. Metode yang digunakan yaitu eksperimental laboratorium dengan benda uji balok berukuran 150x250x1500 mm yang disambungkan dengan kolom berukuran 250x250x1750 mm dan diberi perkuatan berupa ekspansi planar segitiga berukuran 125x187,5x250 mm di bawah antara balok dan kolom. Penelitian tersebut membahas tentang pola retak, kapasitas beban maksimal, kurva histeris (hubungan beban dan defleksi lateral), disipasi energi, kekakuan siklus, dan daktilitas. Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa perkuatan ekspansi planar dapat meningkatkan kekuatan sambungan yang memenuhi kriteria yang disyaratkan dalam SNI 7438-2012

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis pemodelan benda uji pada *software* LUSAS dan studi eksperimental (Lihat Gambar 1). Analisis dengan pemodelan *software* dilakukan dengan tujuan agar dapat digunakan sebagai acuan penelitian eksperimental.

Studi eksperimental yang dilakukan yaitu penelitian dengan pengujian secara langsung untuk mengungkapkan sebab akibat dari rumusan masalah yang ada dengan membandingkan benda uji satu dengan yang lain. Dalam membandingkan hasil uji akan digunakan hasil analisis dari pemodelan benda uji pada *software* LUSAS dan studi pustaka yang didapatkan selama pencarian referensi, sehingga pengambilan kesimpulan didasari dengan teori-teori yang ada.

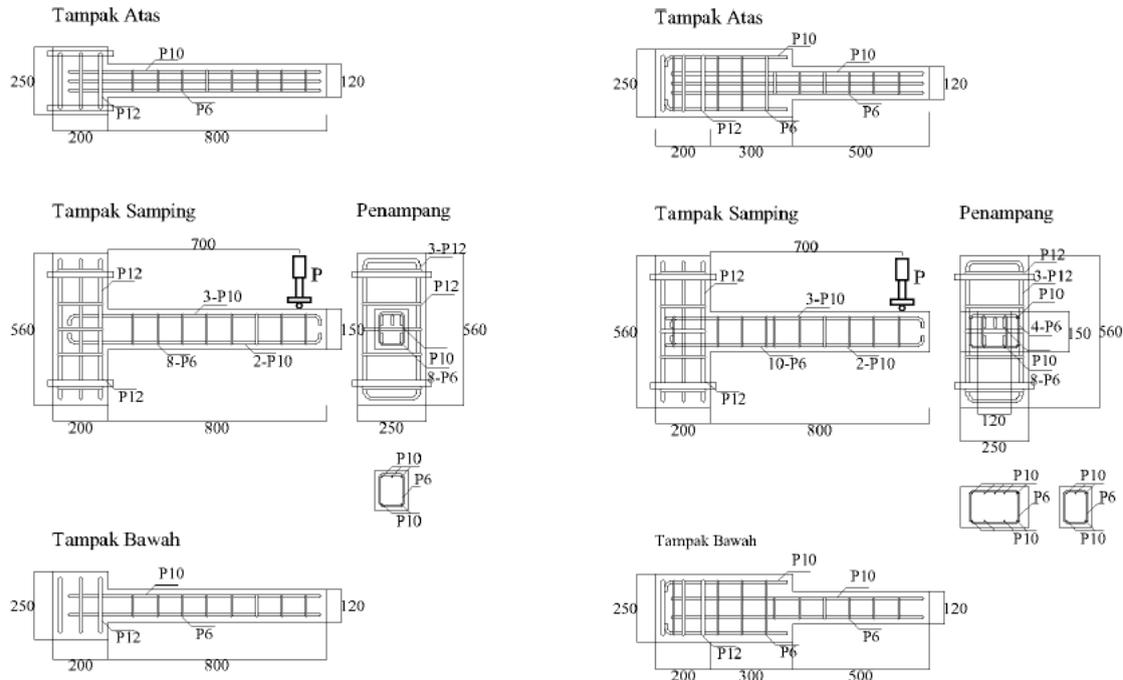


Gambar 1 Metode Penelitian

Fokus penelitian ini adalah pengaruh yang didapat dari pelebaran dimensi pada daerah tumpuan balok. Penelitian ini dilaksanakan di 2 Laboratorium Program Studi Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta yaitu Laboratorium Komputer Teknik Sipil untuk analisis menggunakan *software* LUSAS dan Laboratorium Struktur dan Bahan Bangunan. Benda uji yang digunakan berupa silinder beton dan balok beton bertulang. Silinder beton yang dibuat memiliki dimensi dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm sebagai benda uji untuk pengujian kuat tekan beton. Balok beton bertulang yang digunakan adalah balok dengan beton normal dan memiliki total bentang 1000 mm.

Dalam penelitian ini dilakukan dua metode yaitu eksperimental dan pemodelan *software*. Eksperimental dilakukan dengan membuat dua jenis benda uji yaitu balok beton bertulang sebagai benda uji utama, dan silinder beton sebagai benda uji pendukung. Setelah dilakukan pengujian terhadap benda uji dilakukan pengolahan data dan pemodelan menggunakan *software* LUSAS yang disesuaikan menyerupai keadaan selama metode eksperimental dilakukan. Analisis menggunakan *software* LUSAS dilakukan dengan memodelkan benda uji dalam bentuk 2D dengan dimensi dan ketentuan material yang sama persis seperti yang akan digunakan dalam membuat benda uji untuk studi eksperimental. Pemodelan awal dilakukan sebagai acuan pembuatan desain balok eksperimental yang kemudian dapat berubah menyesuaikan hasil yang didapat saat eksperimen dilakukan. Hasil analisis yang didapat dari *software* LUSAS akan digunakan sebagai pembanding dalam menganalisis benda uji saat studi eksperimental, sehingga diharapkan kedua hasil analisis tidak memiliki perbedaan yang signifikan.

Pembuatan benda uji balok normal yang akan dilakukan adalah 2 jenis balok normal. Pengerjaan benda uji balok terdiri dari pembuatan bekisting, perangkaian tulangan, dan terakhir pengecoran. Penamaan kedua balok yaitu BL1 untuk balok kontrol tanpa pelebaran dan BL2 untuk balok dengan pelebaran (Lihat Gambar 2).



Gambar 2 Detail Penulangan (a) BL1, (b) BL2



Pengujian kuat tekan silinder beton eksperimental

Pengujian bertujuan untuk mendapatkan besar kuat desak beton (f_c') dari silinder beton yang dianggap mewakili kekuatan desain beton yang dibuat bersamaan. Pengujian dilakukan saat berumur 28 hari. Sebelum dilakukan pengujian, silinder beton dikaping terlebih dahulu menggunakan belerang. Hal ini bertujuan untuk meratakan permukaan silinder beton sehingga tekanan yang diberikan merata. Benda uji ditimbang dan diukur diameter serta tinggi dan dihitung luas permukaan (A). kemudian beton ditekan dengan alat uji sehingga didapat beban maksimum (P) sehingga kuat tekan dapat dihitung.

Pengujian modulus elastisitas

Pengujian modulus elastisitas beton dilakukan pada umur beton 28 hari dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine (UTM)* merk Shimadzu UMH-30. Silinder beton diukur dimensi diameter dan tinggi dengan menggunakan caliper di tiga titik berbeda, lalu dihitung rata-rata serta benda uji juga ditimbang berat. Setelah itu, benda uji dipasang compressometer dan diukur nilai P_o , lalu diletakkan pada mesin UTM dan pengujian modulus elastisitas beton dapat dilakukan. Pengujian dihentikan apabila terjadi retakan pada silinder beton

Pengujian kuat tarik belah beton eksperimental

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada beton berumur 28 hari dengan menggunakan mesin desak merk ELE. Sebelum pengujian dilakukan, benda uji diukur dimensi kemudian diuji. Benda uji dipasangkan ke dalam mesin desak dengan posisi horizontal sehingga saat diberi pembebanan silinder mengalami belah.

Pengujian kuat tarik baja

Pengujian tarik baja dilakukan untuk mengetahui berapa besar tegangan luluh (f_y) dan tegangan *ultimate* (f_u) dari baja yang digunakan. Dalam penelitian ini digunakan baja tulangan polos, yang sesuai SNI 2052:2014, nilai tegangan luluh minimal adalah 235 MPa untuk BJTP 24. Langkah-langkah mempersiapkan benda uji dimulai dengan memotong tulangan sesuai dengan panjang yang dibutuhkan oleh alat pengujian, kemudian mengukur benda uji, yakni besar diameter dan panjang awal. Lalu hitung besar penampang yang diuji (A_s). Apabila benda uji sudah disiapkan, maka pengujian dapat dilaksanakan dengan cara 1) Meletakkan benda uji pada mesin uji tarik, kemudian melaksanakan pengujian, 2) Mencatat beban luluh (P_y), yakni titik saat beban bertahan cukup lama, sedangkan benda uji tetap mengalami pertambahan panjang, dan 3) Tarik benda uji hingga putus, kemudian catat beban maksimal (P_u).

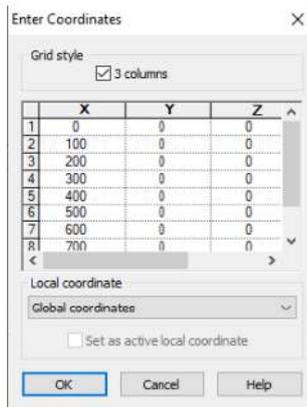
Pengujian kuat lentur balok bertulang

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan data kuat tekan dan defleksi yang terjadi pada benda uji balok beton bertulang. Sebelum pengujian dilakukan, balok beton diberi kapur gamping agar berwarna putih dan tampak saat terjadi keretakan. Gambar grid berukuran 5x5 cm untuk analisis keruntuhan. Setelah benda uji siap, maka benda uji sudah bisa dipasangkan pada loading frame dan dikencangkan menggunakan baut agar dapat terpasang sebagai balok kantilever. LVDT dipasang di tiga titik yaitu LVDT 1 dipasang sejajar dengan loader, LVDT 2 dipasang di tengah bentang balok, dan LVDT 3 dipasang dengan posisi horizontal antara loading frame dan tumpuan balok. Siapkan hydraulic pump, dan sambungkan dengan data logger agar didapat hasil kuat tekan. Setelah itu pengujian dapat dilakukan dengan memberi tekanan dari hydraulic pump hingga balok mengalami kegagalan berupa retakan. Retakan tersebut diperjelas, kemudian di sketsa untuk analisis keruntuhan. Lalu data dari pengujian dapat diambil dari data logger.

Pemodelan software LUSAS dan analisis

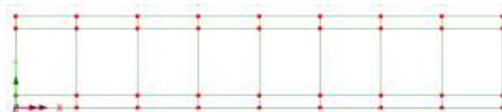
Pemodelan menggunakan LUSAS dilakukan berdasarkan elemen benda uji yang digunakan untuk eksperimen. Analisis dilanjutkan dengan membandingkan perilaku benda uji eksperimental dan output yang didapat dari pemodelan *software* LUSAS. Tahap pemodelan pada *software* LUSAS dapat dilihat sebagai berikut.

Pemodelan balok diawali dengan membuat grid guna membantu proses penggambaran (Lihat Gambar 3). *Grid* pada kolom X diisi dengan kelipatan 100 mm mulai dari 0 sampai dengan panjang balok yang diinginkan yaitu 800mm. Kemudian memasukkan tinggi balok menggunakan “*sweep*” sebesar 150 untuk menggandakan *grid* setinggi tebal balok



Gambar 3 Grid line dimensi balok 2D

Langkah kedua yaitu memodelkan tulangan menggunakan *grid line* (Lihat Gambar 4). Dengan detail posisi penulangan pada *grid* horizontal baris ke dua untuk tulangan tarik 3P10, baris ketiga untuk tulangan tekan 2P10 dan grid vertikal untuk tulangan geser P6-100.



Gambar 4 Pemodelan tulangan menggunakan *grid line* balok BL

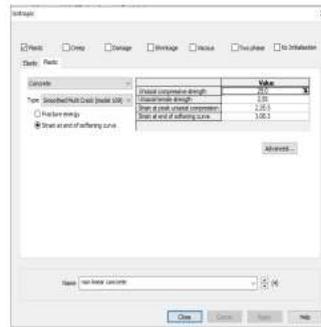
Mendefinisikan elemen *bar* dan *interpolation order quadratic* untuk *grid line* tulangan utama dan tulangan geser (Lihat Gambar 5). Kemudian elemen dimasukkan dengan cara *drag* ke tulangan.



Gambar 5 Mendefinisikan elemen bar

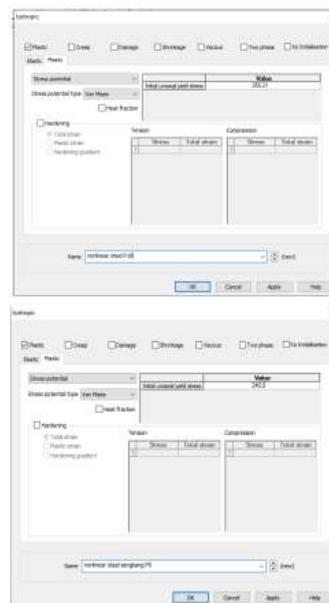
Mendefinisikan karakteristik beton yaitu modulus elastisitas beton, kuat tekan beton dan kuat tarik belah beton untuk kedua balok (Lihat Gambar 6).





Gambar 6 Mendefinisikan karakteristik beton

Mendefinisikan karakteristik tulangan yaitu kuat tarik tulangan utama dan tulangan geser untuk balok BL1 dan balok BL2 (Lihat Gambar 7).



Gambar 7 Mendefinisikan kuat tarik tulangan

Mendefinisikan *cross sectional* area tulangan tarik balok BL1 tulangan tarik balok BL2 untuk area lapangan yaitu 3P10 (Lihat Gambar 8).



Gambar 8 *Cross sectional* area tulangan tarik BL1

Mendefinisikan *cross sectional* area tulangan tekan BL1 dan tulangan tekan BL2 area lapangan yaitu 2P10 (Lihat Gambar 9).

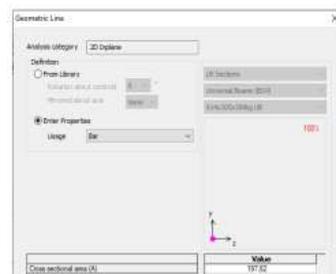
KoNTekS17

Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-17



Gambar 9 *Cross sectional* area tulangan tekan BL1

Mendefinisikan *cross sectional* area tulangan geser P6 balok BL1 dan BL2 (Lihat Gambar 10).



Gambar 10 *Cross sectional* area tulangan geser

Mendefinisikan *cross sectional* area tulangan tarik tumpuan balok BL2 (Lihat Gambar 11)



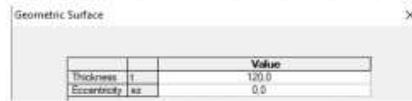
Gambar 11 *Cross sectional* area tulangan tarik tumpuan balok BL2

Mendefinisikan *cross sectional* area tulangan tekan tumpuan balok BL2 (Lihat Gambar 12).

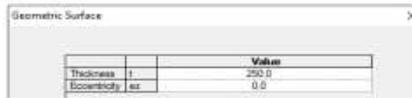


Gambar 12 *Cross sectional* area tulangan tekan tumpuan balok BL2

Mendefinisikan *beam thickness* atau lebar balok BL1 dan balok BL2 (Lihat Gambar 13).



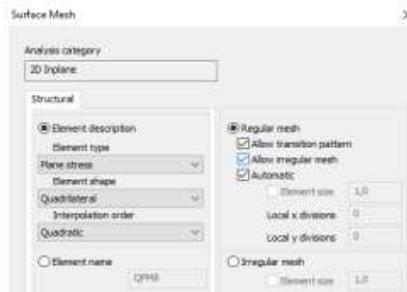
(a)



(b)

Gambar 13 *Beam thickness* (a) Lebar balok BL1 dan lebar lapangan balok BL2 120 mm, (b) Lebar tumpuan balok BL2 120 mm.

Mendefinisikan *meshing plane stress* untuk untuk *element surface* balok BL1 dan BL2 (Lihat Gambar 14).



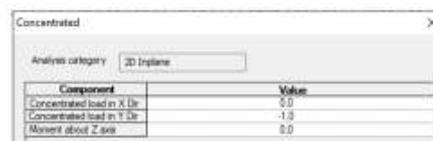
Gambar 14 *Meshing plane stress*

Mendefinisikan *supports* balok yaitu dengan tumpuan jepit (Lihat Gambar 15).



Gambar 15 *Supports* balok

Mendefinisikan pembebanan satu titik dengan point load 1 kN dengan kenaikan beban secara otomatis sampai balok runtuh (Lihat Gambar 16).



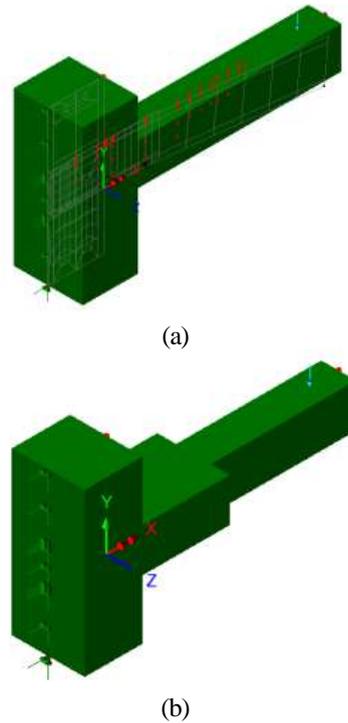
Gambar 16 *Point load* balok

Pemodelan *geometric line*, *support*, dan *point load* balok BL1 dan BL2 dengan 2 dimensi (Lihat Gambar 17).



Gambar 17 Pemodelan balok 2D dengan *software* LUSAS BL1 dan BL2

Hasil pemodelan 3 dimensi balok BL1 dan balok BL2 (Lihat Gambar 18).



Gambar 18 Pemodelan 3D dengan *software* LUSAS (a) Pemodelan 3D balok BL1 (b) Pemodelan 3D balok

HASIL PENELITIAN

Pengujian kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan untuk mengetahui kuat tekan maksimum yang dapat ditahan oleh beton berumur 28 hari dengan kuat rencana sebesar 25 MPa. Hasil uji yang dilakukan menggunakan mesin CTM merk ELLE dapat dilihat pada Tabel 1. Dari hasil pengujian terhadap beton berumur 28 hari didapatkan kuat tekan beton rata-rata sebesar 29,39 MPa yang berarti lebih besar dari pada kuat rencana beton 25 MPa.

Tabel 1 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Diameter (mm)	Luas Permukaan (mm^2)	Beban (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rerata (MPa)
149,42	17.526,17	530	30,24	29,39
149,38	17.516,79	500	28,54	
149,42	17.526,17	290	16,54*	

* Tidak diperhitungkan karena tidak masuk ke dalam kuat tekan yang direncanakan.

Pengujian modulus elastisitas beton

Pengujian ini dilakukan terhadap 3 beton silinder untuk mengetahui modulus elastisitas beton menggunakan alat uji mesin UTM merk Shimadzu dengan hasil uji yang dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan SNI 03-2847-2002 modulus elastisitas untuk beton normal adalah $4.700 \sqrt{f'c}$ maka didapat untuk mutu beton 29 MPa adalah 25.310,275 MPa. Hasil pengujian memberikan nilai modulus elastisitas pada beton lebih kecil dibandingkan dengan hasil hitung dari ketentuan oleh SNI 03-2847-2002.

Tabel 2 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas

Diameter (mm)	Beban (kN)	Tegangan (MPa)	Regangan ($\times 10^{-5}$)	E_c (N/mm^2)	Modulus Elastisitas Rata-rata
150	127,53	7,2204	34,9893	20.899,9712	19.122,24
150	93,195	5,28	30,44	17.345,6	



150	127,53	7,2204	6,20	116.375,232*	
-----	--------	--------	------	--------------	--

* Tidak diperhitungkan karena terjadi kesalahan teknis saat pengujian.

Pengujian kuat tarik belah

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tarik belah beton menggunakan alat uji mesin CTM merk ELE dengan hasil uji yang dapat dilihat pada Tabel 3. Dari hasil pengujian diperoleh kuat tarik belah pada beton umur 28 hari sebesar 2,568 MPa. Nilai kuat tarik beton hanya 9% sampai 15% dari kuat tekan sebesar yaitu 29 MPa. Maka dari itu, untuk mengimbangi beton menahan gaya tarik, dibutuhkan baja tulangan untuk menutupi kekurangan beton dalam menahan kuat tarik

Tabel 3 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah

Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Beban (KN)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Tarik Belah Rerata (MPa)
151,63	302,70	180	2,538	2,568
149,57	302,76	195	2,743	
151,57	303,53	175	2,423	

Pengujian kuat tarik baja

Pengujian kuat tarik baja dilakukan untuk mengetahui kemampuan tulangan baja dalam menahan beban tarik yang diberikan. Hasil pengujian kuat tarik baja dapat dilihat pada Tabel 4. Dari pengujian diambil nilai f_y dan f_u terendah yaitu f_y 355,205 MPa dan f_u 503,475 MPa

Tabel 4 Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja

Diameter (mm)	Luas Penampang (mm^2)	Beban Leleh (kgf)	Beban Putus (kgf)	F_y (MPa)	F_u (MPa)
8,84	61,3443	2.240	3.210	358,2142	513,3338
8,68	59,1438	2.100	2.960	348,3206	490,9662
8,77	60,3766	2.210	3.115	359,081	506,1255

Pengujian kapasitas beban balok beton bertulang

Pengujian kapasitas beban balok dilakukan dengan cara mengamati pola retak yang terjadi pada saat diberi pembebanan. Pengamatan dilakukan dengan membuat plot pola retak pada grid berukuran 5x5cm yang sudah digambar terlebih dahulu sebelum pengujian. Beban dari retak pertama dapat dilihat pada Tabel 4.5. Kode balok yang digunakan sebagai penamaan balok yaitu BL1 untuk balok kontrol tanpa pelebaran, dan BL2 untuk balok dengan pelebaran dimensi tumpuan. Perbandingan pembebanan yang dapat ditahan kedua balok sangat jauh berbeda, dari Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa balok dengan pelebaran mampu menahan 145% beban lebih besar dari pada balok tanpa pelebaran. Pada Tabel 5 dilampirkan beban retak pertama dan beban maksimum yang didapat lebih besar terjadi pada balok dengan pelebaran.

Tabel 5 Beban Retak Pertama pada Balok

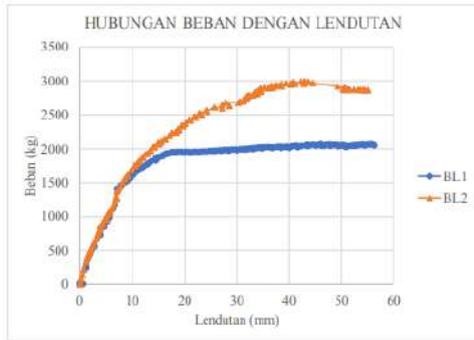
Kode Balok	Retak Pertama (kg)	Retak Pertama (kN)	Beban Maksimum (kg)
BL 1	424	4,15802	2.067,9276
BL 2	595	5,83496	3.000,4978

Pengujian defleksi balok eksperimental dan analisis software LUSAS

Pengujian defleksi balok eksperimental dilakukan dengan memasang LVDT di tiga titik yaitu LVDT 1 pada bentang 70 cm, LVDT pada bentang 25 cm, dan LVDT 3 pada ujung atas tumpuan. Defleksi akhir kedua balok dapat dilihat pada Tabel 6 Hasil Uji Defleksi Akhir Balok. Pada Gambar 19 dapat dilihat perbedaan grafik kedua balok bahwa balok BL2 memiliki ketahanan terhadap beban lebih besar dibanding BL1. Hasil yang didapatkan berdasarkan analisis dari LUSAS bahwa balok dengan pelebaran memiliki kekuatan menahan beban lebih besar sekitar 154% lebih besar dari balok tanpa pelebaran (Lihat Tabel 7 dan Gambar 20).

Tabel 6 Hasil Uji Defleksi Akhir Balok Eksperimental

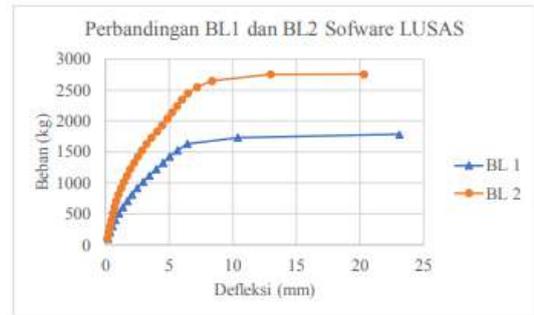
Kode Balok	Besarnya Defleksi (mm)		
	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3
BL 1	56,32682	17,51048	-0,40354
BL 2	54,97321	14,27692	-0,40235



Gambar 19 Grafik Hubungan Beban dengan Defleksi Eksperimental

Tabel 7 Hasil Uji Defleksi Akhir Balok Analisis LUSAS

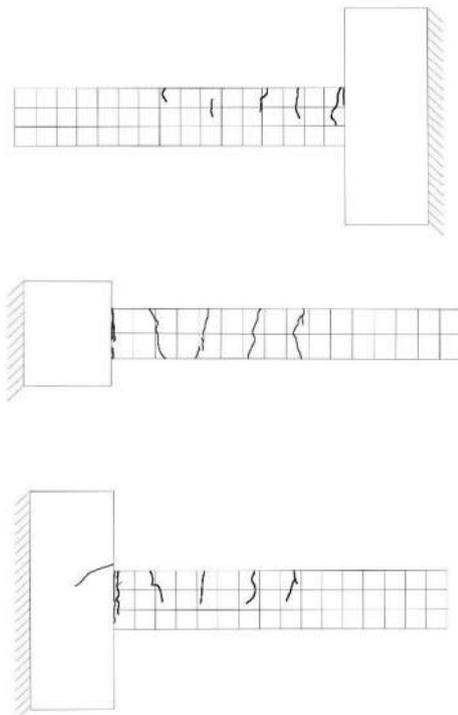
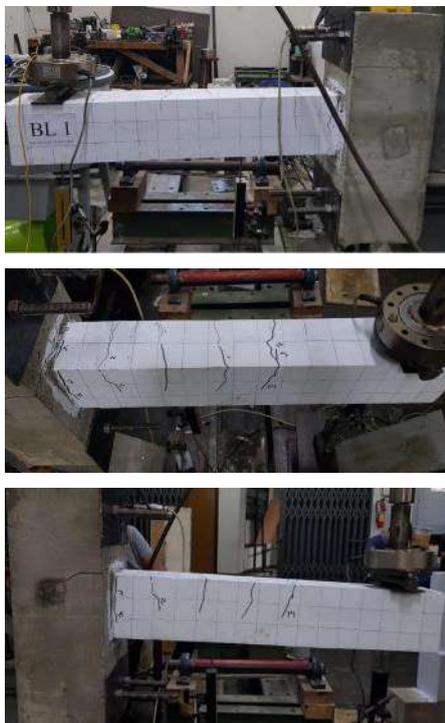
Kode Balok	Beban (kg)	Defleksi (mm)
BL 1	1.783,894	23,1015
BL 2	2.755,474	20,3002



Gambar 20 Grafik Hubungan Beban dengan Defleksi Analisis LUSAS

Pola retak balok eksperimental

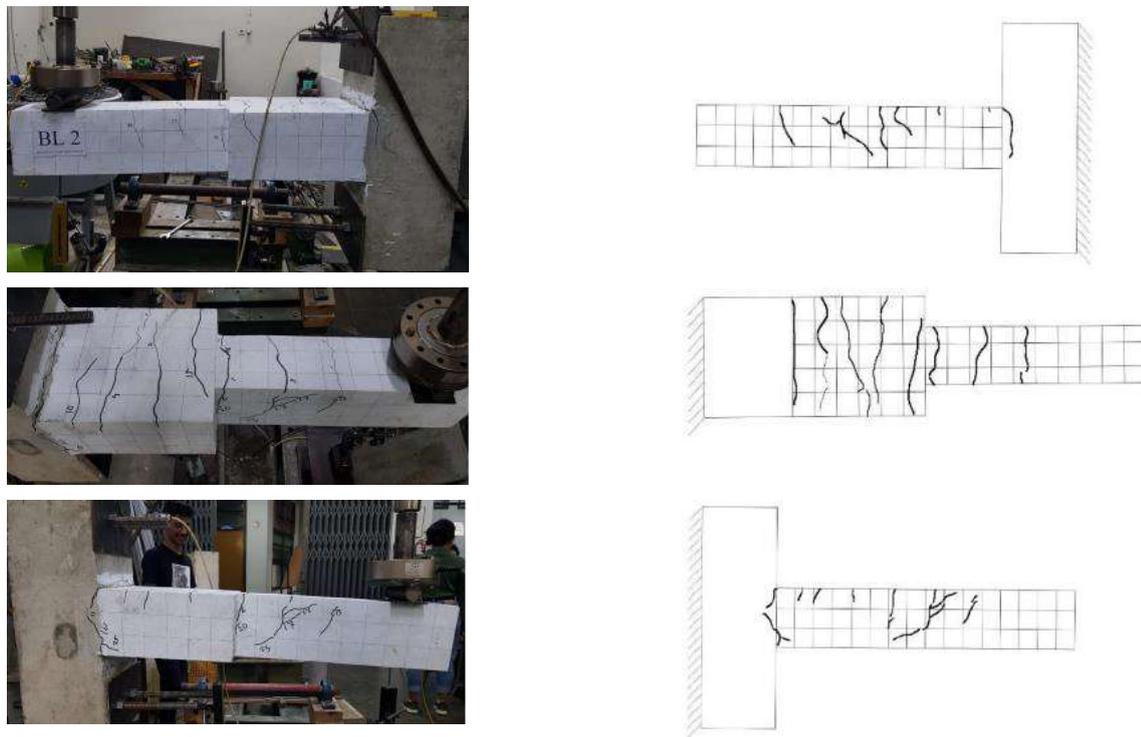
Setelah diberi pembebanan terpusat di ujung balok, balok uji mengalami kegagalan berupa retakan. Pola retak balok BL1 dapat dilihat pada Gambar 21, dan pola retak balok BL2 dapat dilihat pada Gambar 22.



Gambar 21 Pola retak hasil pembebanan BL1 (a) tampak depan, (c) tampak atas, (e) tampak belakang dan sketsa pola retak balok (b) tampak depan, (d) tampak atas, (f) tampak belakang

Retak pertama pada balok BL1 berupa retak halus pada jarak 33 cm dari tumpuan saat pembebanan sebesar 424 kg. Tumpuan tersebut menyebabkan retakan yang menyebar pada daerah tumpuan balok dan sambungan balok. Kegagalan terbesar balok yaitu pada sambungan balok yang dapat dilihat dari pola retak

yang semakin banyak dan melebar. Sedangkan pola retak di bagian lain adalah retak halus dimana pola retakan memanjang.

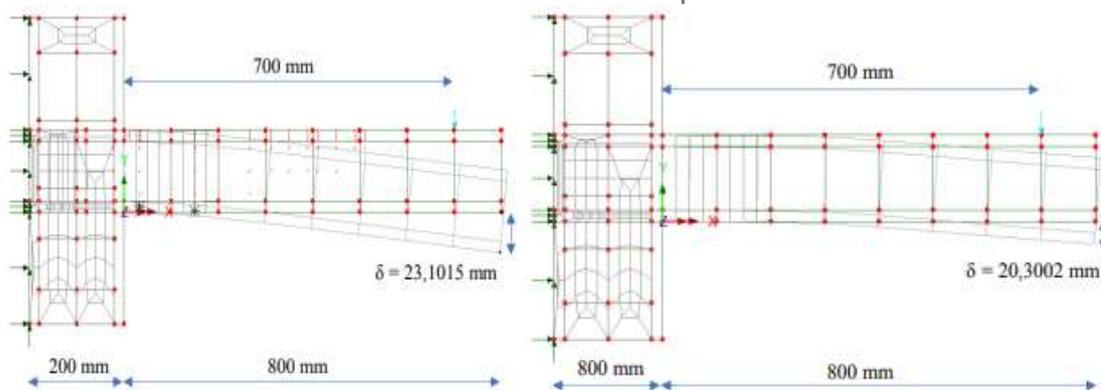


Gambar 22 Pola retak hasil pembebanan BL2 (a) tampak depan, (c) tampak atas, (e) tampak belakang dan sketsa pola retak balok (b) tampak depan, (d) tampak atas, (f) tampak belakang

Retak pertama pada balok BL2 terjadi pada jarak 32 cm dari tumpuan yaitu daerah transisi perubahan lebar dimensi balok berupa retak halus. Kegagalan terjadi bergantian pada kedua area yaitu tumpuan dan lapangan, sampai terjadi kegagalan berupa retak halus di bagian tumpuan pada saat retakan ke-11. Pada saat retakan ke-14 terlihat retakan yang melebar di pola retak ke-11. Setelah terjadi kegagalan yang sangat terlihat di bagian sambungan, keretakan akibat pemberian beban lanjutan kemudian terjadi pada area transisi perubahan lebar dimensi balok. Retakan melebar pada retakan pertama, kemudian retakan mulai terlihat pada bagian samping balok yaitu balok tampak belakang. Pembebanan dihentikan saat terlihat pola retak pada sambungan balok yang mencapai bagian samping bawah balok.

Perilaku balok setelah pembebanan analisis LUSAS

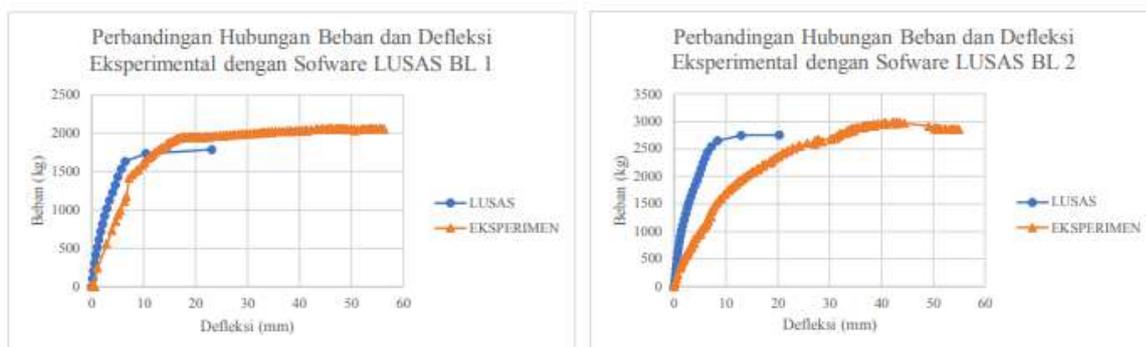
Pola retak yang dihasilkan dalam pemodelan pada *software* LUSAS memiliki kecenderungan serupa dengan hasil eksperimental yaitu pola retak yang terlihat jelas pada sisi bagian atas balok (Lihat Gambar 23). Sebagian besar kegagalan berupa retakan yang terjadi diakibatkan karena tulangan tarik sudah mengalami luluh, sedangkan tulangan tekan belum mencapai titik luluh seperti yang sudah direncanakan bahwa balok beton bertulang akan mengalami jenis keruntuhan *under reinforcement*.



Gambar 23 Pola retak balok dan defleksi (a) BL 1, (b) BL 2

Perbandingan eksperimental dengan analisis *software* LUSAS

Berdasarkan hasil eksperimen dan pemodelan yang telah dilakukan didapatkan perbandingan grafik seperti Gambar 24. Perbedaan hasil kedua metoda penelitian yaitu kemampuan balok dalam menahan beban lebih besar dan kekakuan balok. Beban yang didapatkan dari hasil eksperimental lebih besar dari pada analisis menggunakan *software* LUSAS. Pembebanan yang didapat dari analisis *software* LUSAS tidak diketahui mengapa pembebanan tidak dapat diteruskan sehingga tidak diketahui beban runtuh balok. Kekakuan balok dapat dilihat dari kenaikan beban yang diikuti dengan kenaikan defleksi yang terjadi. *Software* LUSAS menunjukkan kenaikan pembebanan diikuti kenaikan angka defleksi yang cenderung lebih kecil dari defleksi eksperimental pada saat nilai pembebanan yang sama.



Gambar 24 Grafik hubungan beban dengan defleksi balok LUSAS dan eksperimental BL 1 dan BL 2

KESIMPULAN

Berdasarkan eksperimen dan pemodelan menggunakan *software* LUSAS didapatkan hasil penelitian mengenai perilaku terhadap pembebanan dan kemampuan balok dalam menahan beban yang dapat disimpulkan seperti di bawah ini.

- Balok dengan pelebaran dimensi pada tumpuan memiliki kekuatan dalam menahan beban lebih besar dibanding balok tanpa pelebaran.
- Perilaku kegagalan terparah kedua balok tetap pada ujung kantilever, namun pada balok BL2 sebelum kegagalan pada sambungan, retakan ditransfer pada transisi kedua dimensi yaitu pertemuan spesimen pelebaran dengan *specimen* tanpa pelebaran.
- Kekakuan yang dimiliki balok dengan pelebaran juga lebih kaku dibanding balok tanpa pelebaran.



Dari perbandingan eksperimental dan pemodelan *software* LUSAS, didapat ketahanan balok terhadap beban pada eksperimental cenderung lebih besar, namun untuk daktilitas *software* LUSAS memiliki daktilitas yang lebih kaku

DAFTAR PUSTAKA

- Dady, Y.T., Sumajouw, M.D.J., Windah, R.S., 2015, Pengaruh Kuat Tekan Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulang, Jurnal Sipil Statik vol 3, No.5, 341-350
- Hassoun, N.M., Al-Manaseer, A., 2015, Structural Concrete Theory and Design Sixth Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Hernowo, S., Lisantono, A., 2016, Retrofitting Sambungan Kolom-Balok Beton Bertulang, Forum Teknik vol.37, No.1.
- MacGregor, J.G., 2015, Design of Reinforced Concrete 10th Edition, PrenticeHall International, Inc.
- MacGregor, J.G., 1997, Reinforced Concrete : Mechanics and Design 3rd Ed, Prentice-Hall International, Inc.
- SNI 03-2847-2002, 2002, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung Beta Version, Bandung.
- SNI 2847:2013, 2013, Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-2843-2000, 2000, Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal, Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-4431-2011, 2011, Cara Uji Kuat Lentur Beton non-serat dengan Dua Titik Pembebanan, Badan Standardisasi Nasional.
- Soembando, B., Triwiyono, A., Muslikh, 2011, Perbaikan Balok Beton Bertulang dengan Metode Jacketing dengan Bahan Ferosemen Akibat
- Beban Siklik pada Beban Ultimit, Jurnal Ilmiah Semesta Teknik vol. 14, No. 2, 166-176.
- Tjokrodinultjo, 2007, Teknologi Beton, KMTS FT UGM, Yogyakarta