

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH RASIO TULANGAN LENTUR TERHADAP MEKANISME KERUNTUHAN BALOK BETON BERTULANG

Muhammad Ishomuddin Wahid¹, Elvis Saputra^{1*}, dan Muhammad Amirul Yachya¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Jl. Kaliurang Km. 14,5, Krawitan, Umbulmartani, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta
*elvis.saputra@uii.ac.id

Masuk: 14-03-2025, revisi: 09-04-2025, diterima untuk diterbitkan: 11-05-2025

ABSTRACT

Reinforced concrete is a composite material that utilizes concrete and steel to resist tensile and flexural forces. However, the reinforcement ratio used in reinforced concrete beams significantly affects the strength, deformation, and failure patterns of the structure. This study aims to analyze the influence of reinforcement ratio on the failure behavior of reinforced concrete beams under under-reinforced, balanced-reinforced, and over-reinforced conditions. The research was conducted through laboratory experiments involving flexural testing on beams with varying reinforcement ratios. Each beam was tested using a two-point loading method to evaluate the load-deflection relationship and observe crack patterns during the testing process. Data analysis was carried out by comparing the failure behavior among the three reinforcement conditions to determine how the reinforcement ratio affects structural failure. The results showed that over-reinforced beams tended to experience more rapid and significant shear failure, exhibiting brittle behavior. Balanced-reinforced beams showed a more balanced occurrence of shear and flexural cracks, but the dominant failure mechanism remained shear. Meanwhile, under-reinforced beams experienced earlier failure, but with a more ductile behavior and a flexural failure mode. These findings emphasize that the selection of flexural reinforcement ratio should consider the balance between flexural and shear capacity, ductility, and the expected failure mechanism to ensure good structural performance under extreme loading.

Keywords: Reinforcement ratio, under-reinforced, balanced-reinforced, over-reinforced, beam failure

ABSTRAK

Beton bertulang merupakan material komposit yang memanfaatkan beton dan baja tulangan untuk menahan gaya tarik dan lentur. Namun, rasio tulangan yang digunakan pada balok beton bertulang sangat memengaruhi kekuatan, deformasi, dan pola keruntuhan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh rasio tulangan terhadap perilaku keruntuhan pada balok beton bertulang dalam kondisi *under reinforced*, *balanced reinforced*, dan *over reinforced*. Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium dengan pengujian lentur pada balok beton bertulang dengan rasio tulangan yang bervariasi. Setiap balok diuji menggunakan metode pembebanan 2 titik untuk mengevaluasi hubungan antara beban dan lendutan, serta mengamati pola retak yang muncul selama proses pengujian. Analisis data dilakukan dengan membandingkan perilaku keruntuhan pada ketiga kondisi penulangan, guna menentukan bagaimana rasio tulangan memengaruhi kegagalan struktural. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok *over reinforced* cenderung mengalami keruntuhan geser yang lebih cepat dan signifikan, sehingga perilaku yang terjadi yaitu getas. Balok *balance reinforced* mengalami retak geser dan lentur yang lebih seimbang, namun mekanisme keruntuhannya tetap didominasi oleh geser. Sementara itu, balok *under reinforced* mengalami kerusakan yang lebih dini tetapi sifat keruntuhan yang lebih daktil dan keruntuhannya berupa lentur. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan rasio tulangan lentur harus mempertimbangkan keseimbangan antara kapasitas lentur dan kapasitas geser, daktilitas, serta mekanisme keruntuhan yang diharapkan agar struktur memiliki kinerja yang baik saat menerima beban ekstrem.

Kata kunci: Rasio tulangan, under reinforced, balanced reinforced, over reinforced, keruntuhan balok

1. PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan material komposit yang tersusun atas beton dan baja tulangan yang tertanam di dalamnya. Beton memiliki beberapa keunggulan, antara lain kekuatan tekan yang tinggi serta ketahanan terhadap korosi dan pelapukan akibat kondisi lingkungan (Xu, 2014). Namun demikian, beton memiliki kelemahan dalam menahan gaya tarik. Oleh karena itu, baja tulangan digunakan untuk mengatasi kelemahan tersebut, terutama dalam menahan beban lentur (Asmara, 2024). Salah satu elemen struktur beton bertulang yang berfungsi menahan beban lentur adalah balok beton bertulang.

Balok beton bertulang merupakan elemen struktural yang menerima gaya-gaya yang bekerja dalam arah transversal terhadap sumbu yang mengakibatkan terjadinya momen lentur dan gaya geser sepanjang bentangnya (Wicaksono et al., 2019). Peran utama balok adalah menahan beban lentur dan geser yang terjadi akibat pengaruh beban yang bekerja pada struktur. Namun, perilaku balok beton bertulang sangat dipengaruhi oleh rasio penulangan yang digunakan, yang secara langsung berhubungan dengan kekuatan, deformasi, dan pola keruntuhan balok (Słowik, 2019). Pemilihan rasio tulangan yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa balok memiliki kapasitas yang memadai untuk menahan beban dan tegangan yang diterima.

Gaya lentur dan geser pada balok dihasilkan oleh regangan yang timbul akibat beban gravitasi (beban hidup dan mati), serta beban lateral seperti angin dan gempa. Jika beban bertambah, maka balok akan mengalami deformasi dan regangan tambahan yang memicu muncul dan bertambahnya retakan sepanjang bentangnya (Tripamungkas, 2023). Konfigurasi penulangan pada balok dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu *under-reinforced*, *over-reinforced*, dan *balanced-reinforced* (Badan Standardisasi Nasional, 2019), tergantung pada rasio tulangan yang digunakan.

Rasio tulangan yang dirancang untuk menahan gaya lentur harus diperhatikan secara cermat agar balok mampu menahan momen lentur secara optimal. Rasio tulangan yang terlalu besar (*over-reinforced*), meskipun dapat meningkatkan kapasitas lentur, cenderung membuat balok menjadi terlalu kaku dan kurang efisien (Song et al., 2022). Selain itu, penambahan rasio tulangan secara berlebihan juga dapat menyebabkan jarak tulangan geser menjadi terlalu rapat berdasarkan hasil analisis, yang sering kali hanya disesuaikan pada nilai minimum. Hal ini berisiko menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata serta meningkatkan potensi keruntuhan geser. Keruntuhan pada balok ditandai oleh kemunculan pola-pola retak, antara lain retak lentur (*flexural crack*), retak lentur-geser (*flexural shear crack*), dan retak geser pada badan balok (*web shear crack*) (Ubaidillah & Walujodjati, 2022).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penting untuk memahami pengaruh rasio tulangan terhadap perilaku keruntuhan balok beton bertulang. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji secara eksperimental bagaimana variasi rasio tulangan memengaruhi karakteristik deformasi, pola retak, serta mekanisme keruntuhan pada balok beton bertulang. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan dalam perencanaan struktur balok yang lebih efisien, aman, dan sesuai dengan prinsip-prinsip desain struktur beton bertulang.

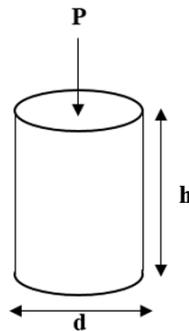
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan tahap persiapan peralatan dan bahan. Setelah seluruh peralatan dan bahan tersedia, dilakukan pengujian sifat dasar material, yaitu agregat halus dan agregat kasar. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa material yang digunakan memenuhi standar yang dipersyaratkan. Material yang telah lolos pengujian kemudian digunakan dalam pembuatan mix design berdasarkan acuan SNI 2834:2000 (Badan Standardisasi Nasional, 2000), dengan mutu beton rencana sebesar 25 MPa. Setelah mix design dan mutu beton rencana ditentukan, dilakukan pengujian kuat tekan beton untuk memastikan bahwa hasil campuran memenuhi target mutu yang telah direncanakan.

Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan beton dilakukan mengacu pada SNI 1974:2011 (Badan Standardisasi Nasional, 2011b). Proses pengujian diawali dengan mengangkat benda uji dari bak perendaman, kemudian dibiarkan pada suhu ruang selama kurang lebih 24 jam. Selanjutnya, dilakukan pengukuran dimensi dan penimbangan berat benda uji. Setelah itu, dilakukan proses capping untuk meratakan permukaan benda uji agar distribusi beban pada saat pengujian merata.

Benda uji yang telah siap kemudian ditempatkan pada mesin uji tekan. Mesin dijalankan, dan pembebanan dilakukan secara bertahap hingga benda uji mengalami keruntuhan. Beban maksimum yang diterima benda uji saat keruntuhan dicatat. Nilai kuat tekan beton kemudian dihitung dengan membagi beban maksimum tersebut terhadap luas penampang benda uji (persamaan 1), dan dinyatakan dalam satuan MegaPascal (MPa). Skema pengujian kuat tekan benda uji dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sketsa pengujian kuat tekan beton

Persamaan kuat tekan beton,

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dengan $f'c$ = kuat tekan (MPa), P = beban tekan maksimum (N), A = luas penampang benda uji (mm^2)

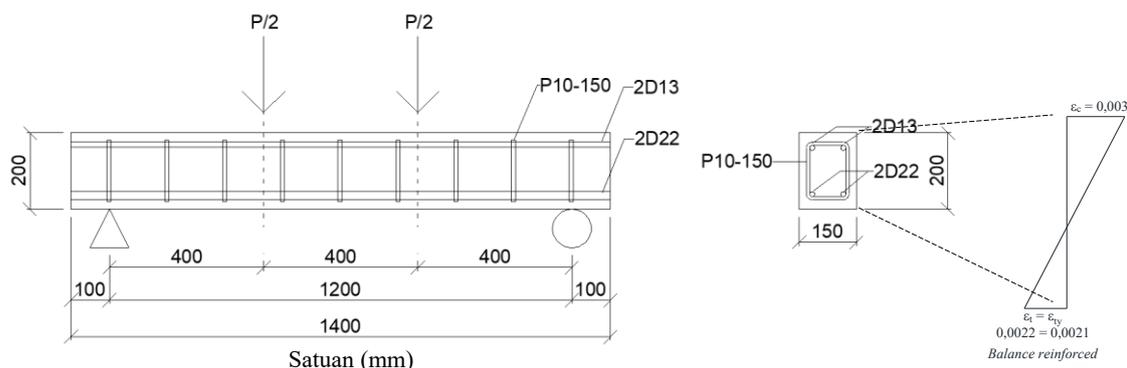
Pembuatan benda uji balok

Proses pembuatan benda uji dimulai dengan merencanakan tulangan sesuai dengan berbagai rasio penulangan, yaitu *balance reinforced*, *under reinforced*, dan *over reinforced* pada balok dengan dimensi 150 x 200 mm dan menggunakan selimut beton 25 mm. Perencanaan ini bertujuan untuk memastikan variasi karakteristik struktur pada masing-masing kondisi, sehingga dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perilaku tulangan di setiap kategori tersebut. Balok menggunakan

Balance reinforced

Rasio tulangan dengan kondisi *balance reinforced* didapat regangan tulangan tarik (ϵ_t) sebesar 0,0022. Secara teoritis, syarat regangan kondisi *balance reinforced* adalah ketika regangan tulangan (ϵ_t) sama dengan regangan leleh tulangan (ϵ_y), yaitu sebesar 0,0021 (420 Mpa). Perbedaan kecil ini terjadi akibat keterbatasan dimensi dan ketersediaan tulangan baja di pasaran yang menyulitkan pencapaian nilai regangan teoritis secara presisi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, nilai $\epsilon_t = 0,0022$ dianggap mendekati kondisi *balance reinforced* dan tetap digunakan sebagai representasi kondisi seimbang.

Penulangan balok beton bertulang dengan kondisi *balance reinforced* digunakan tulangan tekan sebanyak 2 buah dengan diameter 13 mm (2D13) dan tulangan tarik sebanyak 2 buah dengan diameter 22 mm (2D22). Tulangan sengkang di pakai diameter 10 mm dengan jarak 150 mm (P10-150). Berikut merupakan ilustrasi regangan dan sketsa penulangan balok dengan kondisi *balance reinforced* yang dapat dilihat pada Gambar 2.

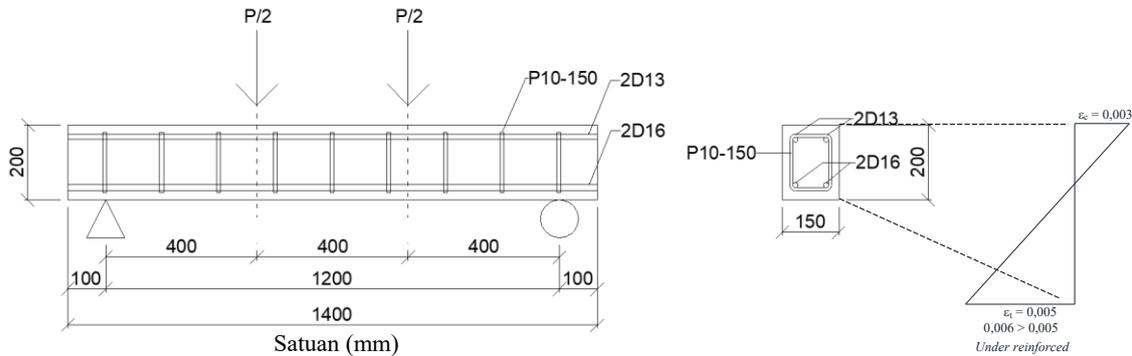


Gambar 2. Sketsa penulangan balok dan diagram kondisi *balance reinforced*

Under reinforced

Pada kondisi *under reinforced*, rasio tulangan menghasilkan regangan tulangan (ϵ_t) sebesar 0,006, memenuhi persyaratan SNI 2847-2019 yang mensyaratkan ϵ_t lebih besar dari 0,005. Pada penulangan balok beton bertulang ini, digunakan dua buah tulangan tekan berdiameter 13 mm (2D13) dan dua buah tulangan tarik berdiameter 16 mm

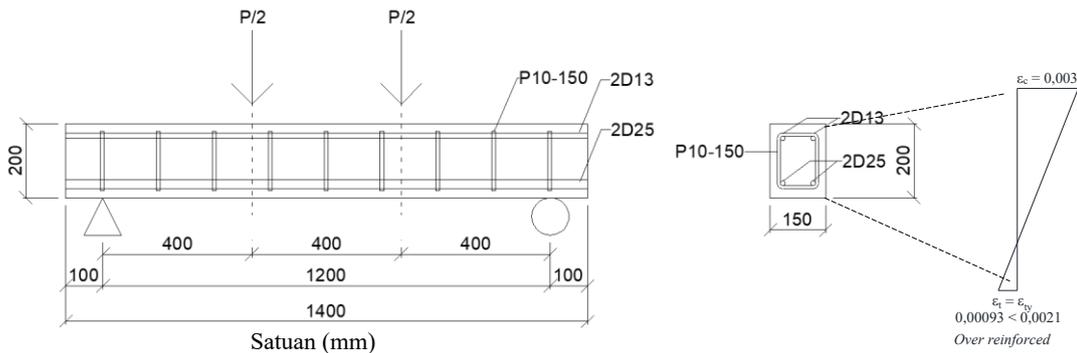
(2D16). Selain itu, tulangan sengkang dengan diameter 10 mm ditempatkan secara berkala dengan jarak 150 mm (P10-150). Ilustrasi mengenai distribusi regangan dan sketsa penulangan balok untuk kondisi *under reinforced* disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa penulangan balok dan diagram kondisi *under reinforced*

Over reinforced

Rasio tulangan dengan kondisi *over reinforced* didapat regangan tulangan (ϵ_s) sebesar 0,00093. Syarat regangan kondisi *over reinforced*, di mana regangan tulangan (ϵ_s) lebih kecil dari regangan leleh tulangan (ϵ_{sy}) yaitu sebesar 0,0021. Penulangan balok beton bertulang dengan kondisi *over reinforced* digunakan tulangan tekan sebanyak 2 buah dengan diameter 13 mm (2D13) dan tulangan tarik sebanyak 2 buah dengan diameter 25 mm (2D25). Tulangan sengkang di pakai diameter 10 mm dengan jarak 150 mm (P10-150). Berikut merupakan ilustrasi regangan dan sketsa penulangan balok dengan kondisi *over reinforced* yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Sketsa penulangan balok dan diagram kondisi *over reinforced*

Berikut ini merupakan rekapitulasi benda uji yang telah dikelompokkan berdasarkan kondisi rasio tulangan yang berbeda, seperti yang disajikan rinci pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi data benda uji balok

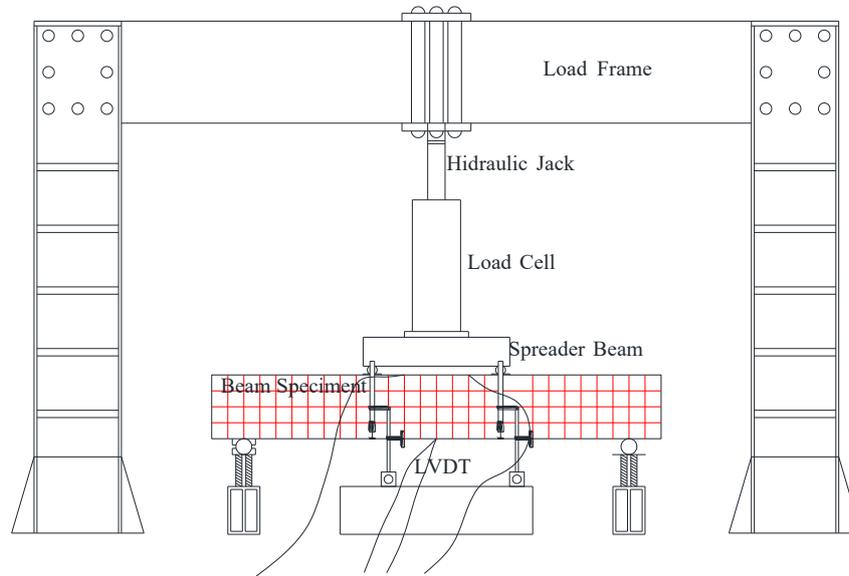
Dimensi (mm) b x h x L	Rasio penulangan	Tulangan tekan	Tulangan tarik	Tulangan sengkang	Kode
150 × 200 × 1400	<i>Balance reinforced</i>	2D13	2D22	P10-150	BRS
150 × 200 × 1400	<i>Over reinforced</i>	2D13	2D25	P10-150	BRL
150 × 200 × 1400	<i>Under reinforced</i>	2D13	2D16	P10-150	BRK

Perawatan benda uji

Perawatan sampel dilakukan sesuai dengan SNI 2493-2011 (Badan Standar Nasional Indonesia, 2011) tentang tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium. Benda uji silinder, setelah dicetak dan didiamkan selama 24 jam, bekistingnya dilepas, diberi kode, dan kemudian dirawat dengan cara direndam dalam kolam selama 7 hari. Sementara itu, untuk benda uji balok bertulang, bekisting dilepas setelah 7 hari pencetakan, kemudian perawatannya dilakukan dengan menutupi balok menggunakan karung goni yang dibasahi setiap hari selama 28 hari.

Pengujian kuat lentur

Langkah-langkah pengujian kuat lentur pada balok beton bertulang sesuai SNI 4431-2011 (Badan Standardisasi Nasional, 2011a) meliputi persiapan peralatan dan benda uji, penentuan letak tumpuan benda uji pada jarak 100 mm dari kedua tepi balok, penempatan benda uji pada tumpuan alat pengujian, pemasangan strain gauge pada beton dan baja tulangan, serta pelaksanaan pengujian dengan menambahkan beban secara bertahap hingga benda uji mengalami kerusakan. Selama pengujian, pola retak dan mekanisme keruntuhan diamati, serta beban maksimum yang dapat ditahan dicatat. Sketsa pengujian kuat lentur balok dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Sketsa pengujian lentur balok beton bertulang

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok

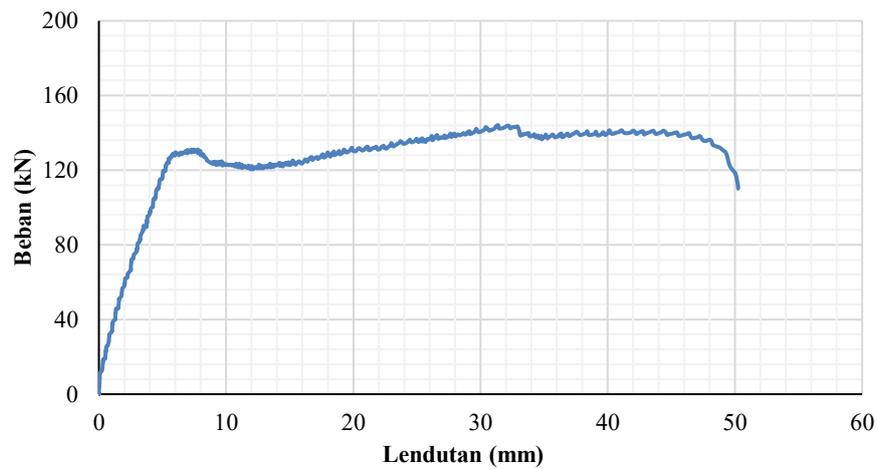
Under reinforced

Hasil pengujian pada balok *under reinforced* (BRK) menunjukkan bahwa mekanisme keruntuhan didominasi oleh kegagalan lentur tarik. Pada awal pengujian, retakan halus pertama kali muncul di zona tarik tengah balok saat beban mencapai 30,996 kN. Seiring peningkatan beban, retakan tersebut mulai membesar dan berkembang, terlihat jelas pada beban 131,040 kN. Perkembangan retakan ini berlangsung secara bertahap hingga akhirnya meluas ke seluruh bagian balok, yang berujung pada keruntuhan total saat beban mencapai 144,144 kN dengan lendutan sebesar 31,377 mm. Gambar kondisi benda uji dan grafik hubungan beban serta lendutan pada balok BRK dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Grafik beban-lendutan pada Gambar 7 menunjukkan bahwa balok BRK mengalami kegagalan lentur dengan cara di mana terjadi regangan plastis secara menyeluruh sebelum keruntuhan. Peningkatan lendutan yang signifikan seiring bertambahnya beban menandakan bahwa balok mengalami deformasi secara bertahap sebelum mencapai titik keruntuhan. Hal ini menggambarkan perilaku daktail yang baik, artinya balok mampu memberikan peringatan dini melalui deformasi yang cukup besar sebelum terjadi kegagalan total. Perilaku tersebut sangat penting dalam perancangan struktur, karena memberikan kesempatan untuk mendeteksi kerusakan dan melakukan tindakan preventif sebelum situasi menjadi kritis.



Gambar 6. Kondisi balok BRK setelah pengujian



Gambar 7. Grafik beban (kN) – lendutan (mm) BRK

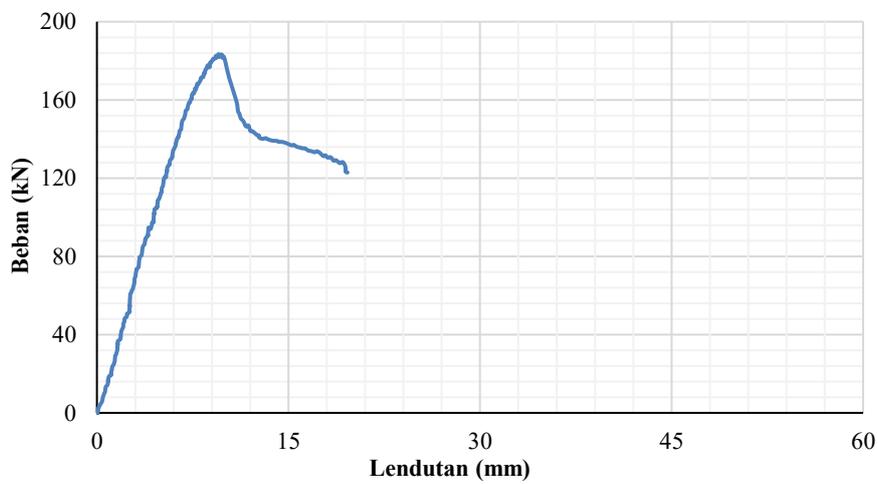
Balance reinforced

Pada balok *balance reinforced* (BRS), hasil pengujian menunjukkan kombinasi antara kegagalan lentur dan geser. Retakan lentur awal mulai muncul pada tengah bentang saat beban mencapai 22,932 kN, disusul dengan munculnya retakan miring pada 83,160 kN. Retakan diagonal berkembang dari tumpuan ke arah tengah balok, yang kemudian menyebabkan keruntuhan geser pada beban maksimum 183,456 kN dengan lendutan sebesar 9,543 mm.

Kondisi *balance reinforced* terjadi ketika tulangan tarik mencapai regangan leleh bersamaan dengan beton tekan mencapai regangan maksimum (Sabouni, 2023). Pada kondisi ini, balok tidak menunjukkan perilaku daktail yang dominan seperti balok *under reinforced*, tetapi juga tidak langsung getas seperti balok *over reinforced*. Grafik beban-lendutan pada Gambar 8 dan 9 mendukung hal ini, menunjukkan penurunan beban yang bertahap setelah titik puncak serta deformasi yang masih cukup terkontrol. Namun, dominasi retakan diagonal yang menyebabkan keruntuhan mengindikasikan bahwa kapasitas geser balok mungkin menjadi titik lemah (Zhang, 1997). Oleh karena itu, meskipun penulangan lentur dirancang untuk kondisi seimbang, performa aktual balok menunjukkan bahwa keruntuhan geser lebih mendominasi, yang menandakan perlunya evaluasi ulang terhadap kapasitas tulangan geser yang digunakan.



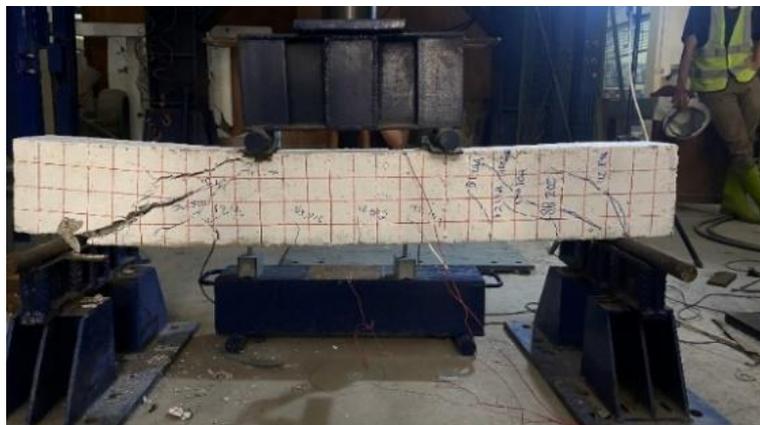
Gambar 8. Kondisi balok BRS setelah pengujian



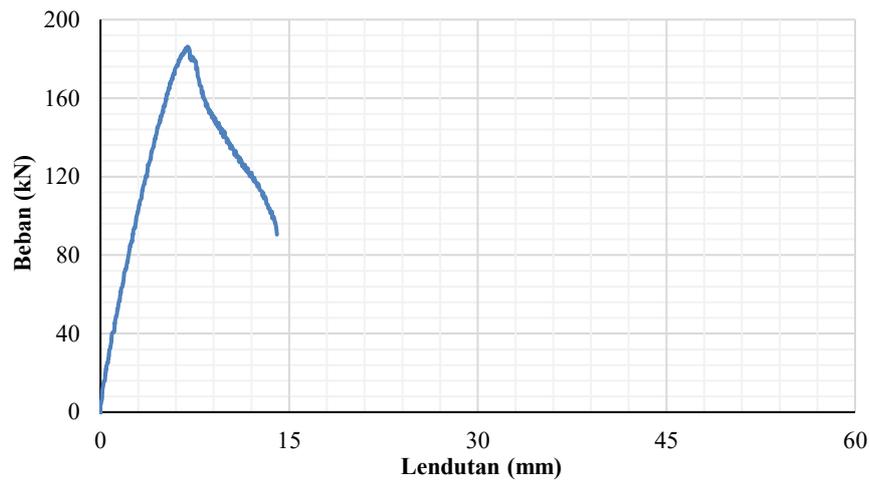
Gambar 9. Grafik beban (kN) – lendutan (mm) BRS

Over reinforced

Hasil pengujian pada balok *over reinforced* (BRL) menunjukkan bahwa kegagalan yang terjadi didominasi oleh keruntuhan geser. Retakan diagonal halus pertama kali muncul pada beban 87,192 kN dan berkembang dengan cepat menuju kegagalan total pada beban maksimum 186,228 kN, disertai lendutan sebesar 7,389 mm. Dokumentasi hasil pengujian berupa foto benda uji dan grafik beban–lendutan dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Kondisi balok BRL setelah pengujian



Gambar 11. Grafik beban (kN) – lendutan (mm) BRL

Grafik pada Gambar 11 menunjukkan bahwa setelah mencapai beban puncak, kapasitas balok BRL menurun secara tajam tanpa adanya deformasi plastis yang signifikan. Hal ini menandakan bahwa balok mengalami keruntuhan secara mendadak, tanpa memberikan cukup peringatan melalui deformasi seperti pada balok *under reinforced*. Meskipun balok BRL mampu menahan beban maksimum lebih besar dibandingkan tipe lainnya, hal ini tidak serta-merta menjadikannya lebih unggul dari sisi performa struktural.

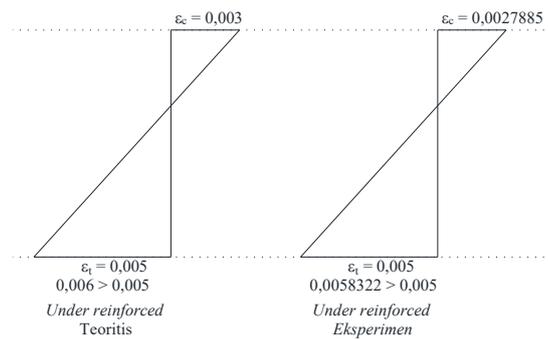
Balok dengan tulangan tarik berlebih (*over reinforced*) menyebabkan beton pada zona tekan mencapai regangan ultimit sebelum tulangan tarik mengalami leleh. Akibatnya, balok kehilangan sifat daktail dan berperilaku getas (Duhaim & Mashrei, 2022). Selain itu, kegagalan yang ditunjukkan pada pengujian lebih mengarah pada kegagalan geser, yang mengindikasikan bahwa kapasitas tulangan geser (senggang) tidak cukup untuk menahan gaya dalam akibat kombinasi rasio tulangan lentur yang besar. Dengan demikian, meskipun secara kapasitas nominal balok BRL menunjukkan angka tertinggi, perilaku keruntuhannya yang tidak terkontrol dan cepat menjadikannya kurang ideal dalam perancangan struktur yang menekankan keselamatan, seperti pada bangunan tahan gempa, yang mengutamakan deformasi plastis dan kemampuan memberi peringatan sebelum kegagalan.

Perbandingan Regangan Teoretis dan Eksperimental

Regangan teoritis memberikan panduan mengenai nilai-nilai yang diharapkan dalam desain struktur, sedangkan regangan hasil eksperimen didapatkan dari bacaan *strain gauge* yang dipasang pada beton dan baja tulangan. Perbandingan antara regangan teoritis dan hasil eksperimen ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian antara desain teoritis dan perilaku sebenarnya, serta untuk memahami seberapa baik struktur bekerja dalam kondisi nyata.

Under reinforced

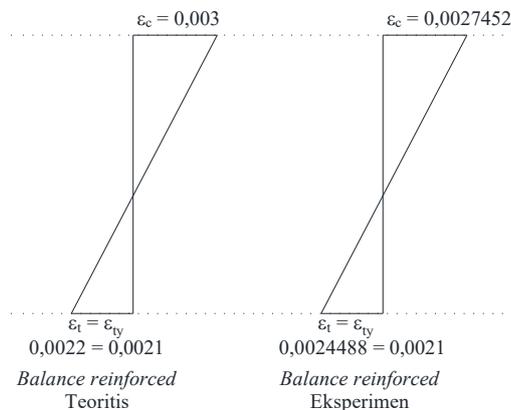
Pada balok *under reinforced*, hasil analisis teoritis menunjukkan bahwa regangan tarik tulangan (ϵ_t) sebesar 0,006, sedangkan regangan tekan beton (ϵ_c) sebesar 0,003. Nilai ini sesuai dengan karakteristik balok *under reinforced*, yaitu tulangan tarik mengalami leleh terlebih dahulu sebelum beton mencapai regangan tekan maksimum (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Hasil pengujian menunjukkan bahwa regangan tarik aktual mencapai 0,0058329, sementara regangan tekan hanya sebesar 0,0027885. Dengan demikian, regangan tarik melebihi batas 0,005 yang ditetapkan dalam SNI 2847:2019 untuk kategori *under reinforced*, dan beton belum mencapai regangan maksimum. Hal ini mengonfirmasi bahwa keruntuhan terjadi akibat baja tarik yang leleh terlebih dahulu, bukan karena hancurnya beton tekan. Perilaku ini menunjukkan bahwa balok memiliki karakteristik daktail, yaitu mampu mengalami deformasi yang cukup besar sebelum keruntuhan total, serta memberikan indikasi awal terjadinya kegagalan struktur. Hasil perbandingan antara regangan teoritis dan regangan hasil pengujian ini ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Perbandingan regangan balok *under reinforced* berdasarkan hasil eksperimen dan teoritis

Balance reinforced

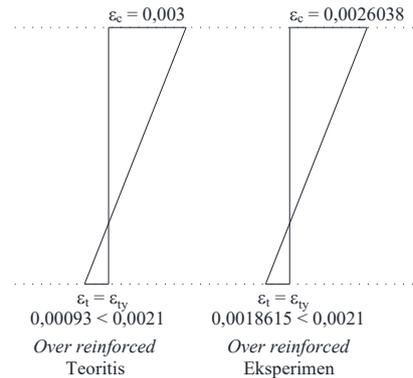
Pada balok dengan kondisi *balance reinforced*, analisis teoritis menunjukkan bahwa regangan tarik tulangan (ϵ_t) dirancang tepat pada batas leleh sebesar 0,0021, sementara regangan tekan beton (ϵ_c) berada pada nilai maksimum sebesar 0,003 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Hasil pengujian menunjukkan bahwa regangan tarik aktual mencapai 0,0024488 dan regangan tekan sebesar 0,0027452. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa tulangan tarik telah mengalami leleh dan beton mendekati regangan maksimum, yang secara umum mencerminkan kondisi seimbang antara kekuatan tarik dan tekan. Meskipun regangan tekan sedikit lebih dominan dibandingkan tarik, perbedaan tersebut masih berada dalam batas toleransi yang wajar dalam pengujian laboratorium, dan tidak mengubah karakteristik keruntuhan yang terjadi. Secara keseluruhan, balok tetap menunjukkan perilaku *balance reinforced*, yaitu keduanya—baja dan beton—bekerja secara optimal dan mengalami kerusakan hampir bersamaan. Perbandingan antara regangan teoritis dan hasil eksperimen untuk balok ini ditampilkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Perbandingan regangan balok *balance reinforced* berdasarkan hasil eksperimen dan teoritis

Over reinforced

Balok dengan kondisi *over reinforced*, secara teoritis regangan tarik tulangan (ϵ_t) berada di bawah batas leleh sebesar 0,0021, yaitu hanya sebesar 0,00093 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Hal ini menunjukkan bahwa pada saat keruntuhan terjadi, baja tulangan belum mencapai regangan leleh, sedangkan beton telah mencapai regangan maksimum sebesar 0,003. Kondisi ini mencerminkan karakteristik balok *over reinforced*, di mana beton mengalami kegagalan tekan terlebih dahulu sebelum baja mengalami leleh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa regangan tarik aktual adalah sebesar 0,0018615, yang masih di bawah batas leleh baja, dan regangan tekan beton mencapai 0,0026038. Data ini menguatkan bahwa keruntuhan terjadi akibat hancurnya beton tekan sebelum baja mampu berdeformasi secara plastis, sesuai dengan karakteristik keruntuhan getas yang khas pada *over reinforced*. Kondisi ini cenderung tidak diinginkan dalam desain struktur karena bersifat mendadak dan minim peringatan sebelum kegagalan. Oleh karena itu, meskipun balok memiliki kapasitas beban yang tinggi, deformasi plastis yang terbatas menjadikan balok ini kurang daktil dan lebih rentan terhadap kegagalan tiba-tiba. Perbandingan antara regangan teoritis dan hasil pengujian balok *over reinforced* ini ditampilkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Perbandingan regangan balok *over reinforced* berdasarkan hasil eksperimen dan teoritis

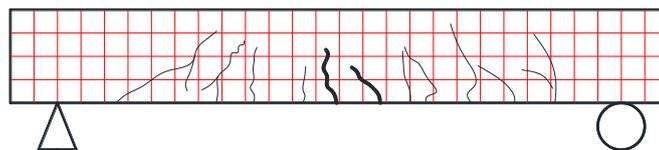
Karakteristik Pola Kerusakan dan Mekanisme Keruntuhan

Under reinforced

Gambar 15 menunjukkan pola keretakan aktual pada balok *under reinforced* (BRK), yang memperlihatkan dominasi retak lentur vertikal di sekitar tengah bentang. Retakan awal tampak terbentuk di zona tarik bagian tengah, dan secara bertahap berkembang ke arah atas seiring penambahan beban. Ini sejalan dengan karakteristik utama balok *under reinforced*, di mana keruntuhan diawali oleh tarik lentur karena baja tulangan mencapai regangan leleh lebih dahulu dibandingkan beton tekan.

Selain retakan lentur utama, juga tampak beberapa retak diagonal di dekat daerah tumpuan, yang mengarah ke pusat bentang. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kegagalan utamanya bersifat lentur, terdapat kontribusi gaya geser yang mulai berkembang pada tahap akhir pembebanan, namun tidak mendominasi mekanisme keruntuhan. Pola seperti ini umum terjadi pada balok *under reinforced* dengan rasio tulangan yang rendah, di mana keruntuhan tetap daktail tetapi bisa mulai memperlihatkan campuran lentur-geser bila beban semakin tinggi (Wu, 2022).

Lebar dan panjang retakan yang bervariasi menunjukkan adanya redistribusi tegangan, terutama pada bagian tengah balok. Keretakan yang lebih tebal di tengah bentang menandai lokasi momen maksimum, sedangkan retakan yang lebih kecil dan menyudut dekat tumpuan menandai geser tambahan yang mulai bekerja. Bentuk retakan yang tidak langsung menjalar hingga ke serat atas beton juga menunjukkan bahwa beton tekan belum mengalami keruntuhan, yang memperkuat bukti bahwa keruntuhan dikendalikan oleh leleh tulangan tarik.

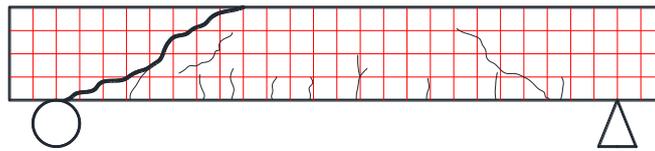


Gambar 15. Sketsa pola retak balok *under reinforced*

Balance reinforced

Pola retakan pada balok *Balance Reinforced* (BRS) yang ditampilkan pada Gambar 16 menunjukkan kombinasi antara retakan lentur dan geser, yang merupakan karakteristik dari balok dengan kondisi penulangan seimbang. Retakan awal terlihat terbentuk secara vertikal di bagian tengah bentang—kemudian berkembang menjadi retakan miring yang tajam dan menyilang dari tumpuan ke arah pusat beban.

Retakan diagonal yang terbentuk secara jelas dan menjalar hingga ke bagian atas balok menunjukkan mekanisme kegagalan geser yang kuat, dengan distribusi keretakan yang cukup merata di kedua sisi tumpuan. Ini sejalan dengan penjelasan dari (Carpinteri et al., 2007), yang menyatakan bahwa balok dengan rasio penulangan seimbang cenderung mengalami kegagalan campuran lentur-geser, di mana kedua mekanisme aktif secara bersamaan. Dengan demikian, keruntuhan pada balok BRS dapat diklasifikasikan sebagai kegagalan geser dominan yang dipicu oleh mekanisme lentur awal, yang berkembang seiring pembebanan hingga mencapai retakan maksimum.



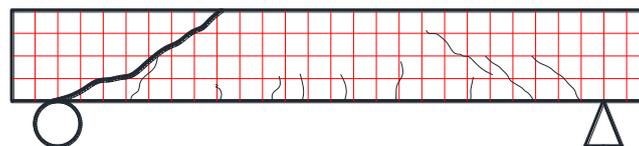
Gambar 16. Sketsa pola retak balok *balance reinforced*

Over reinforced

Gambar 17 memperlihatkan pola keretakan pada balok *Over Reinforced* (BRL), yang menunjukkan dominasi keruntuhan geser yang cepat dan tiba-tiba. Retakan awal terlihat muncul sebagai retakan lentur vertikal halus pada bagian tengah bentang, namun tidak berkembang signifikan. Seiring peningkatan beban, retakan diagonal mulai terbentuk dari arah tumpuan, menjalar dengan sudut curam ke arah tengah, dan menjadi retak dominan saat keruntuhan terjadi.

Retakan diagonal yang tebal dan menyebar ke atas menunjukkan bahwa balok ini mengalami gagal geser tanpa mencapai deformasi plastis yang signifikan, yang merupakan karakteristik dari balok dengan penulangan berlebih. Hal ini sesuai dengan teori yang dijelaskan oleh (Al Nasra, 2015), bahwa balok *over reinforced* cenderung gagal dalam kondisi geser atau tekan beton sebelum tulangan tarik mencapai regangan leleh, yang membuatnya bersifat getas dan tidak daktil.

Bentuk dan arah retakan menunjukkan bahwa gaya geser tidak hanya menjadi faktor pendukung, tetapi mekanisme dominan dalam keruntuhan, yang terjadi secara cepat dan tanpa banyak peringatan visual. Pola ini menegaskan bahwa balok BRL memiliki kapasitas beban tinggi, tetapi deformasi yang sangat terbatas, sehingga rentan terhadap kegagalan mendadak.



Gambar 17. Sketsa pola retak balok *under reinforced*

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa rasio tulangan lentur secara signifikan memengaruhi mekanisme keruntuhan dan karakteristik deformasi pada balok beton bertulang. Balok dengan rasio tulangan rendah (*under reinforced*) menunjukkan keruntuhan lentur yang daktil, ditandai dengan deformasi yang besar, pola retak lentur yang berkembang bertahap, dan adanya redistribusi tegangan sebelum kegagalan total terjadi. Balok dengan rasio penulangan seimbang (*balance reinforced*) mengalami keruntuhan campuran lentur dan geser, dengan retakan awal lentur yang berkembang menjadi retakan diagonal dominan, mengindikasikan bahwa kapasitas geser menjadi titik lemah struktur. Sementara itu, balok dengan rasio tulangan tinggi (*over reinforced*) menunjukkan perilaku getas dengan keruntuhan geser yang mendadak, deformasi terbatas, serta minimnya tanda-tanda peringatan sebelum kegagalan. Meskipun balok *over reinforced* memiliki kapasitas beban maksimum tertinggi, kurangnya daktilitas dan dominasi keruntuhan geser menjadikannya kurang ideal dalam konteks perancangan struktur yang mengutamakan keselamatan dan perilaku pasca-elastis, seperti pada bangunan tahan gempa.

Hasil pengujian ini juga menunjukkan bahwa keruntuhan geser pada balok *balance reinforced* dan *over reinforced* terjadi ketika beban mendekati atau melebihi kapasitas geser nominal berdasarkan perhitungan teoritis, yang menegaskan bahwa dominasi gaya geser berperan penting dalam menentukan mekanisme kegagalan. Oleh karena itu, pemilihan rasio tulangan lentur harus mempertimbangkan keseimbangan antara kapasitas lentur dan kapasitas geser, daktilitas, serta mekanisme keruntuhan yang diharapkan agar struktur dapat berperilaku aman dan memiliki kinerja yang baik saat menerima beban ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Nasra, M. (2015). *Investigating alternatives in shear reinforcements in the reinforced concrete beams*. 10, 27–31. <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-070-5-45>
- Asmara, Y. P. (2023). *Concrete reinforcement degradation and rehabilitation: damages, corrosion and prevention*. Springer Nature.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium* (SNI 2493:2011). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2011a). *Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan* (SNI 4431:2011). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2011b). *Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder* (SNI 1974:2011). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan* (SNI 2847:2019). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal* (SNI 2834:2000). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Carpinteri, A., Carmona, J. R., & Ventura, G. (2007). Propagation of flexural and shear cracks through reinforced concrete beams by the bridged crack model. *Magazine of Concrete Research*, 59(10), 743–756. <https://doi.org/10.1680/mac.2007.59.10.743>
- Duhaim, H. M., & Mashrei, M. A. (2022). Stress–strain relationship of ductile materials and flexural behavior of ductile over-reinforced concrete beams. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 31(4), 225–237. <https://doi.org/10.22630/srees.4253>
- Sabouni, A. R. (2023). *Advances in reinforced concrete integrity and failure* (A. Bahrami & K. I.-I. I. Eshiet (ed.)). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002247>
- Słowik, M. (2019). The analysis of failure in concrete and reinforced concrete beams with different reinforcement ratio. *Archive of Applied Mechanics*, 89(5), 885–895. <https://doi.org/10.1007/s00419-018-1476-5>
- Song, Y., Yao, S., & Liu, L. (2022). Flexural reinforcement of over-reinforced beam by ultrahigh performance concrete layer. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2022/9171300>
- Tripamungkas, A. D. (2023). Analisis tegangan regangan pada balok beton bertulang menggunakan metode elemen hingga. *IJCEE*, 9(2), 34–37.
- Ubaidillah, M. W., & Walujodjati, E. (2022). Eksperimen uji lentur balok beton dengan bundel tulangan. *Jurnal Konstruksi*, 20(1), 202–213. <https://jurnal.itg.ac.id/>
- Wu, Y. (2022). 10 - Shear failure of RC members. In Y. B. T.-A. A. for R. C. Wu (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (hal. 437–482). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821164-9.00010-3>
- Xu, L. (2014). Durability design of concrete structures in severe environments. *Key Engineering Materials*, 629–630, 218–222. <https://doi.org/https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.218>
- Wicaksono, D. A., Suryanita, R., & Djauhari Zulfikar. (2019). Studi eksperimental balok beton bertulang dengan dan tanpa sengkang. *Jurnal Sainstek STT Pekanbaru*, 7(1), 33–39.
- Zhang, J.-P. (1997). Diagonal cracking and shear strength of reinforced concrete beams. *Magazine of Concrete Research*, 49(178), 55–65. <https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.178.55>