

KAJIAN HUBUNGAN ANTARA DIMENSI PENAMPANG, MUTU BAJA DAN MUTU BETON TERHADAP NILAI DAKTILITAS BETON BERTULANG

Totok Apriyanto ¹✉, Hartopo ²

^{1,2}Universitas Darul Ulum Islamic Centre Sudirman GUPPI

DOI: 10.26623/teknika.v17i2.5423

Info Artikel

Sejarah Artikel:

Disubmit 10 Agustus 2022
Direvisi 1 Oktober 2022
Disetujui 28 Oktober 2022

Keywords: Brittle; Cross; Dimension; Ductility; Strain

Abstrak

Kegagalan struktur beton bertulang dalam keadaan duktail akan didahului oleh adanya retak-retak pada serat tertarik. pengurangan dimensi penampang ataupun pengurangan mutu beton sebuah elemen struktur, tidak hanya akan mengurangi kapasitas penampang dalam merespons beban, tetapi juga akan berpengaruh terhadap mekanisme kehancuran beton yang bersifat getas karena tidak didahului oleh adanya tanda-tanda retak. Pengurangan dimensi penampang akan menjadikan tulangan tarik menjadi lebih kuat dari beton tekannya, sehingga pada saat terjadi pembebanan berlebih, regangan beton tekan akan tercapai lebih dulu mendahului regangan baja tariknya. Serat tertarik belum ditandai oleh adanya retak-retak rambut, dan kondisi ini akan sangat berbahaya pada saat regangan leleh baja terlampaui karena kehancuran beton bertulang akan bersifat mendadak. Untuk alasan-alasan tertentu pengurangan dimensi penampang dapat dipertimbangkan untuk dilakukan, dengan nilai f_y antara 300-350 dan f_c' antara 30-35. Sedangkan batas toleransi pengurangan dimensi penampang beton untuk lebar (b) direkomendasikan sebesar 4 % dan untuk tinggi efektifnya (d) sebesar 2,5 %.

Abstract

The failure of reinforced concrete structures in a ductile state will be preceded by the presence of cracks in the tension fiber. Reducing the cross-sectional dimensions or reducing the quality of the concrete of a structural element, will not only reduce the cross-sectional capacity in responding to loads, but will also affect the mechanism of destruction of brittle concrete because it is not preceded by signs of cracking. Reducing the cross-sectional dimensions will make the tensile reinforcement stronger than the compression concrete, so that in the event of excessive loading, the compressive concrete strain will be reached before the tensile steel strain. Tensile fibers have not been characterized by the presence of hairline cracks, and this condition will be very dangerous when the yield stress of the steel is exceeded because the destruction of reinforced concrete will be sudden. For certain reasons a reduction in cross-sectional dimensions can be considered, with f_y values between 300-350 and f_c' between 30-35. While the tolerance limit for reducing the dimensions of the concrete cross-section for the width (b) is recommended at 4% and for the effective height (d) at 2.5%.

✉ Alamat Korespondensi:
E-mail: apri.totok@gmail.com

PENDAHULUAN

Dalam hal perencanaan struktur, ada kecenderungan perencanaan suatu struktur (khususnya beton bertulang) hanya berdasarkan kekuatan penampangnya saja dan sangat jarang ditinjau tentang nilai daktilitas struktur tersebut, meskipun peraturan tentang beton bertulang sudah mengkondisikan struktur beton bertulang yang kita rencanakan bahwa beton dalam keadaan *under reinforced* (Badan Standarisasi Nasional 2019). Pemahaman nilai daktilitas struktur dalam sebuah perencanaan akan lebih melengkapi menjamin keamanan struktur (Nur 2009). Hal ini bisa diartikan bahwa amannya suatu struktur tidak hanya pada saat merespons beban – beban yang telah diperhitungkan sebelumnya, akan tetapi juga pada saat terjadi pembebanan yang meningkat melebihi beban yang sudah diperhitungkan sebelumnya. Hal ini berhubungan dengan nilai daktilitas, bahwa kegagalan suatu struktur sudah diperhitungkan akan terjadi dalam keadaan daktil dan tidak dalam keadaan *brittke* (getas) (Sudarsana 2010). Daktilitas menunjukkan kemampuan struktur dalam menahan pengaruh deformasi akibat kondisi pembebanan yang berlebihan (Araby et al. 2021). Ini berarti bahwa kegagalan struktur, sedemikian sehingga pengguna struktur masih mempunyai kesempatan untuk menyelamatkan diri dari kemungkinan – kemungkinan yang dapat mengancam jiwanya.

Dalam hal mekanisme lelang untuk mendapatkan pekerjaan, yang sering terjadi di lapangan adalah kontraktor melakukan penawaran dengan harga yang sangat rendah, bahkan di bawah pagu anggaran. Dan apabila kriteria pemenang adalah kontraktor yang melakukan penawaran terendah, maka yang akan terjadi adalah kontraktor akan melakukan berbagai upaya sedemikian rupa sehingga harga yang diajukan dalam penawaran mencukupi dan mendapatkan keuntungan, diantaranya adalah dengan mengurangi volume dan mutu bahan. Dengan demikian produk bangunan yang dihasilkan adalah sebuah bangunan yang tidak sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah dipersyaratkan.

Bahwa ada faktor pembesaran beban dan faktor reduksi bahan untuk menjauhkan dari resiko kegagalan struktur (Limbongan, Dapas, and Wallah 2016). Akan tetapi kedua faktor tersebut lebih berorientasi pada kapasitas penampang dalam merespons beban. Hal-hal seperti inilah yang seringkali dilupakan oleh para pelaksana konstruksi di lapangan, bahwa pengurangan dimensi penampang sebuah elemen struktur, tidak hanya akan mengurangi kapasitas penampang dalam merespons beban, tetapi juga akan berpengaruh terhadap mekanisme kehancuran beton (Mointi 2014).

Dalam satu sistem struktur, barangkali ada pemahaman bahwa pengurangan dimensi penampang elemen struktur tidak akan menyebabkan terjadinya kegagalan struktur segera setelah struktur merespons beban. Akan tetapi harus diingat, bahwa perencanaan beton bertulang harus menjamin bahwa beton bertulang dalam keadaan *under reinforced*, yang berarti bahwa baja akan mengalami leleh lebih dulu sebelum beton mengalami hancur (Aryanti and Mirani 2008). Sedemikian sehingga pengurangan dimensi penampang sangat dimungkinkan akan mempengaruhi nilai regangan beton relatif terhadap nilai regangan bajanya (Maulana, Sunaryati, and Thamrin 2016). Hal ini dimungkinkan akan dapat merubah mekanisme terjadinya kehancuran beton bertulang.

Daktilitas didefinisikan sebagai perbandingan antara deformasi total dengan deformasi leleh (Araby et al. 2021). Beberapa parameter daktilitas yang penting untuk diketahui adalah sebagai berikut :

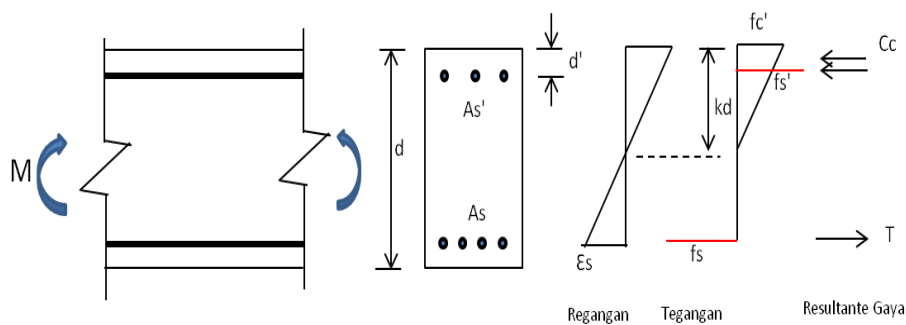
1. Daktilitas regangan (strain ductility), yaitu perbandingan antara regangan maksimum dan regangan leleh pada balok yang dibebani aksial tarik/tekan.
2. Daktilitas Kelengkungan (curvature ductility), yaitu perbandingan antara sudut kelengkungan (angle of curvature) maksimum pada saat ultimate dengan sudut kelengkungan pada saat terjadi leleh pertama pada tulangan tarik dari suatu elemen struktur akibat beban momen lentur.
3. Daktilitas rotasional (rotational ductility) yaitu perbandingan antara putaran sudut maksimum pada sendi plastis terhadap putaran sudut leleh.

4. Daktilitas perpindahan (displacement ductility) yaitu perbandingan antara perpindahan struktur (umumnya dalam arah lateral) maksimum dalam kondisi post-elastic terhadap deformasi struktur pada saat leleh.

Dalam penelitian ini, besaran yang dipakai untuk menentukan daktilitas adalah daktilitas kelengkungan (*curvature ductility*).

Dalam analisis beton bertulang rangkap, diasumsikan bahwa tulangan tarik telah mengalami leleh dulu sebelum beton tekan mengalami hancur (Triyuliani, Dewi, and Susanti 2019). Untuk mekanisme terjadinya leleh pada tulangan tekan, ada 2 (dua) kemungkinan yang terjadi yaitu (Dady, Sumajouw, and Windah 2015):

1. Baja tekan telah mengalami leleh lebih dulu atau minimal bersamaan dengan hancurnya beton tekan
2. Baja tekan belum mengalami leleh pada saat beton tekan mengalami hancur.



Gambar 1. Diagram Tegangan Regangan Penampang Beton Bertulang Rangkap pada Beban Kerja Setelah retak

Secara umum daktilitas kelengkungan penampang beton bertulang rangkap ditunjukkan oleh perbandingan ϕ_u / ϕ_y (Park and Paulay 1975):

$$\frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{\epsilon_c}{f_y/E_s} \frac{d(1-k)}{\alpha/\beta_1} \dots \dots \dots (1)$$

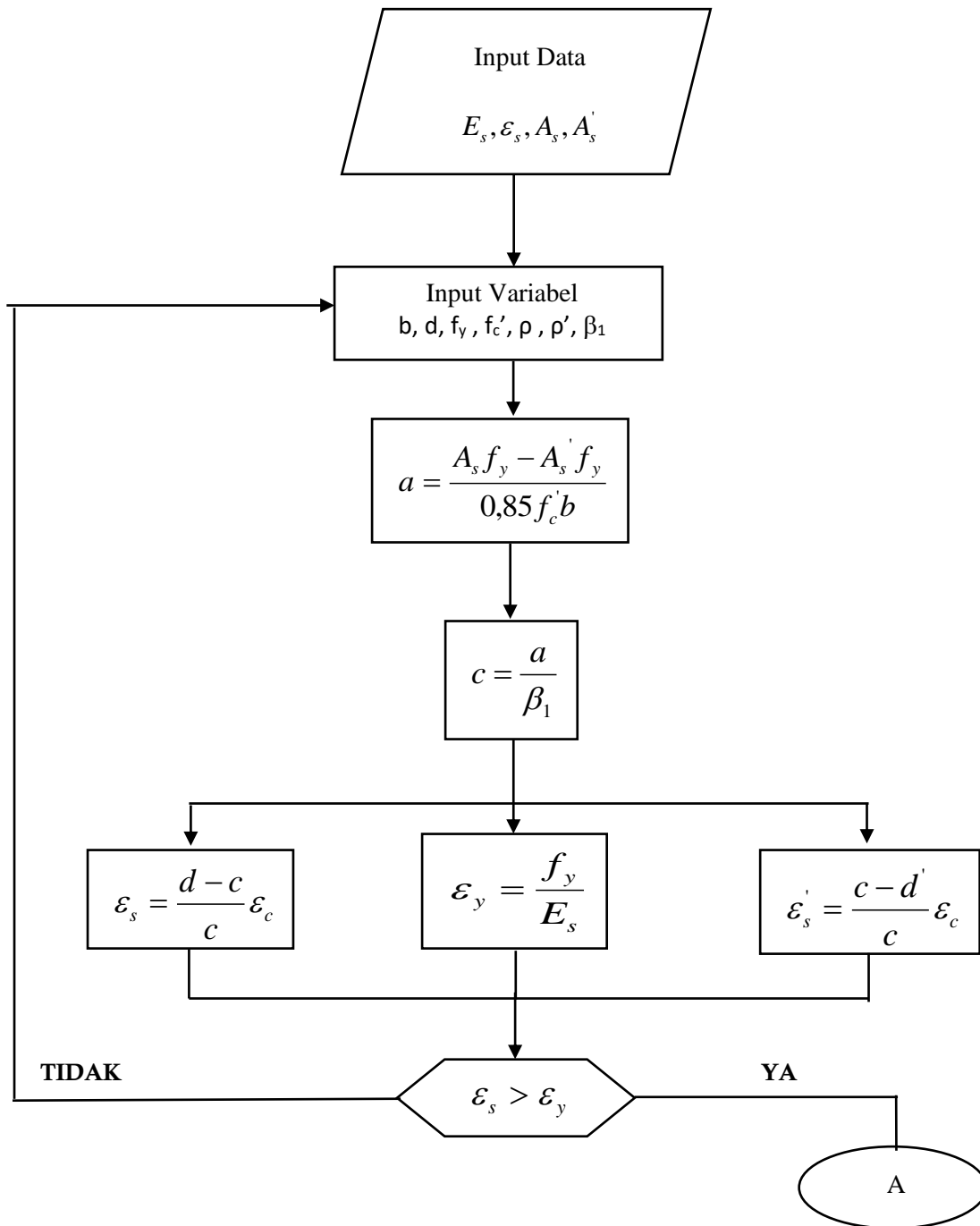
Jika baja tekan mengalami leleh dulu sebelum beton tekan hancur, dan maka nilai daktilitas kelengkungan adalah :

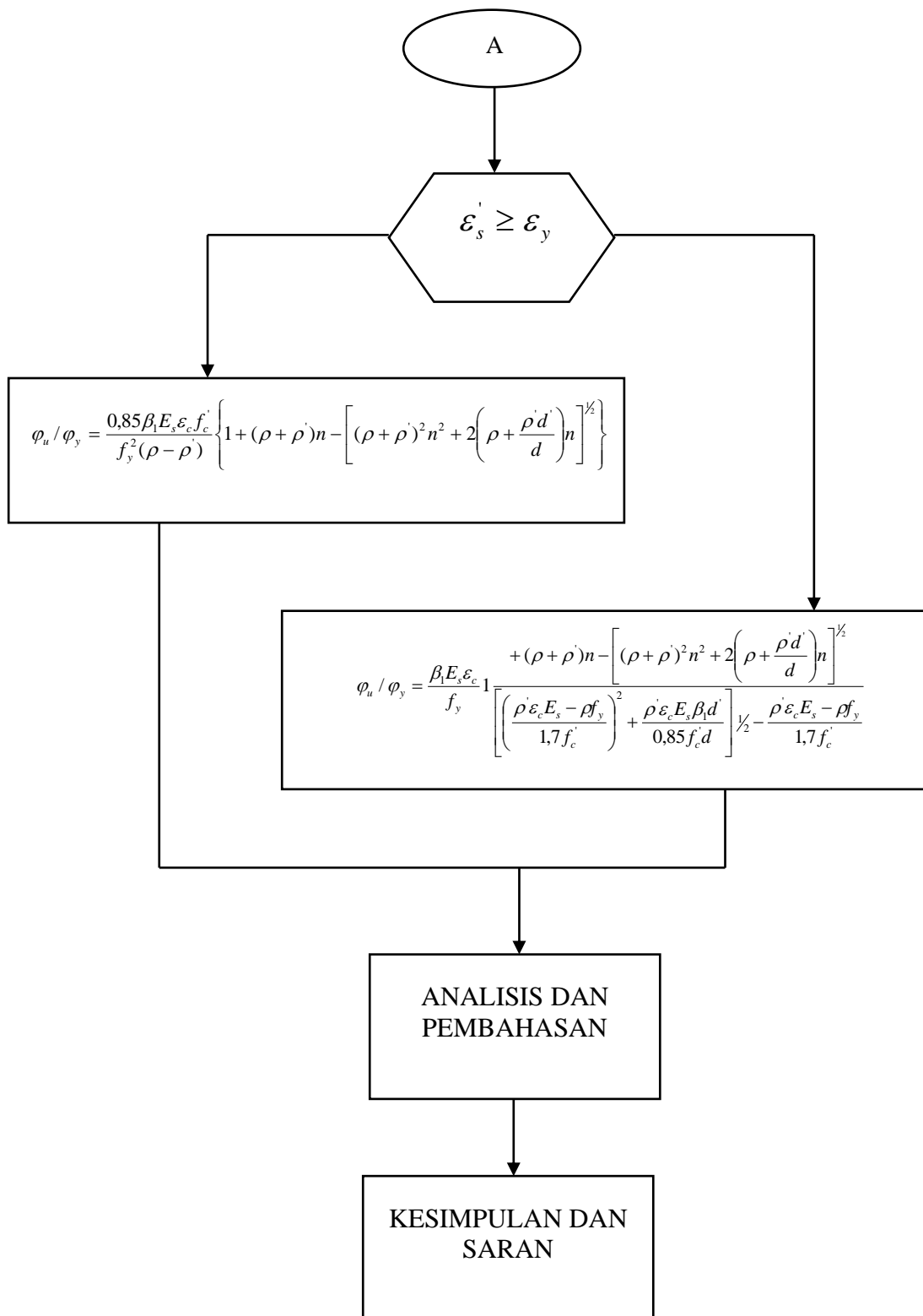
$$\frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{0,85\beta_1 E_s \epsilon_c f'_c}{f_y^2 (\rho - \rho')} \left\{ 1 + (\rho + \rho')n - \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{1/2} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

Jika baja tekan belum mengalami leleh pada saat beton tekan telah hancur. Maka nilai daktilitas kelengkungan adalah :

$$\frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{\beta_1 E_s \epsilon_c}{f_y} \frac{1 + (\rho + \rho')n - \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{1/2}}{\left[\left(\frac{\rho' \epsilon_c E_s - \rho f_y}{1,7 f'_c} \right)^2 + \frac{\rho' \epsilon_c E_s \beta_1 d'}{0,85 f'_c d} \right]^{1/2} - \frac{\rho' \epsilon_c E_s - \rho f_y}{1,7 f'_c}} \dots \dots \dots (3)$$

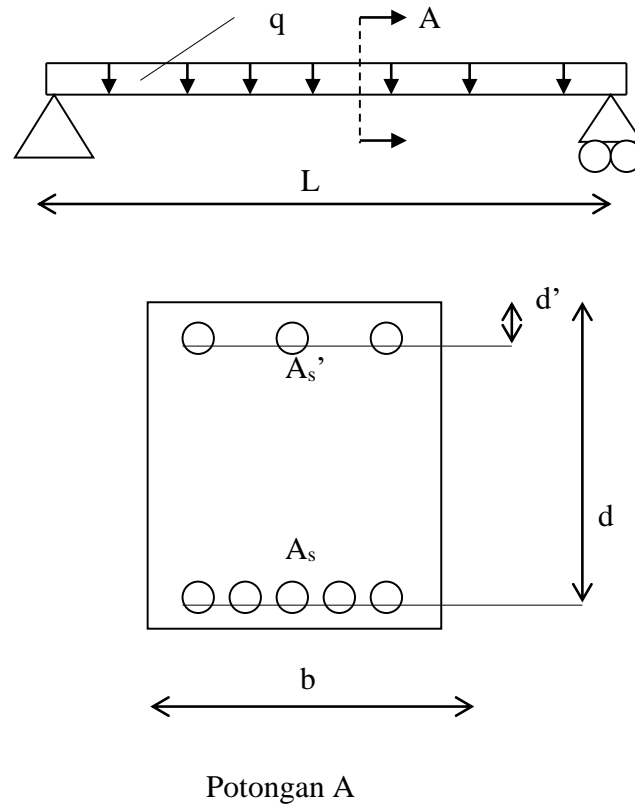
METODE
Bagan Alir





Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Pemodelan Elemen Struktur



Gambar 3. Penampang Balok Beton Bertulangan Rangkap

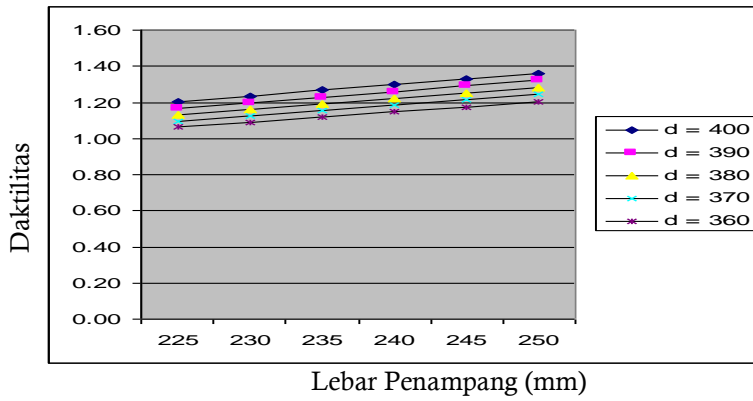
Sebuah balok dengan lebar (b) 250 mm dan tinggi efektif (d) 400 mm dan selimut beton $d' = 0,1 d$. Nilai Modulus Elastisitas Beton (E_c) = 200.000 MPa dan regangan maksimum beton (ϵ_c) = 0,003. Tulangan tarik (A_s) diambil 5 D22 dan tulangan tekan (A_s') diambil $0,6 \times A_s$. Adapun parameter yang lain diambil bervariasi sebagai berikut :

1. Nilai b mengalami pengurangan menjadi 245 mm, 240 mm, 235 mm, 230 mm dan 225 mm
2. Nilai d mengalami pengurangan menjadi 390 mm, 380 mm, 370 mm dan 360 mm
3. Nilai f_c' diambil 35 MPa, 30 MPa dan 25 MPa
4. Nilai f_y diambil 300 MPa, 350 MPa dan 400 MPa

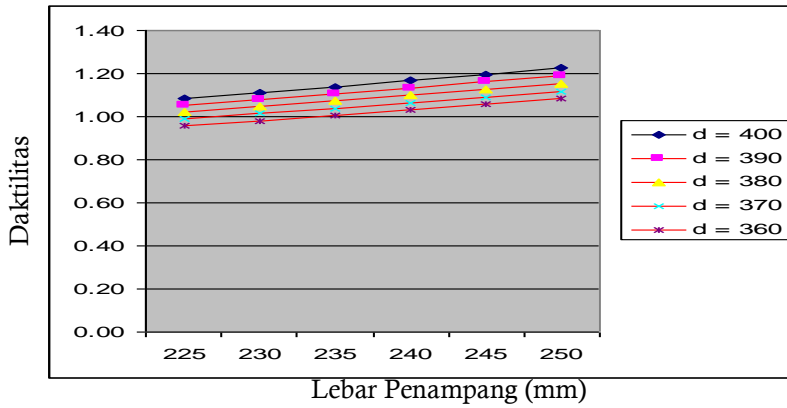
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan memasukkan variabel-variabel yang ada dalam formula besaran nilai daktilitas kelengkungan untuk balok beton bertulangan rangkap, seperti dimensi penampang, tegangan tekan beton, tegangan leleh baja, melalui bantuan pemrograman EXCEL. Keluaran yang diperoleh berupa besarnya nilai-nilai daktilitas untuk beberapa variasi variable.

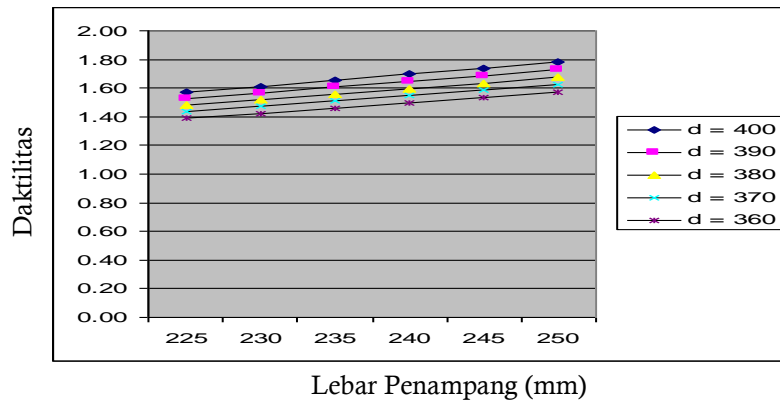
Hubungan antara dimensi penampang dan tegangan tekan beton terhadap nilai daktilitasnya



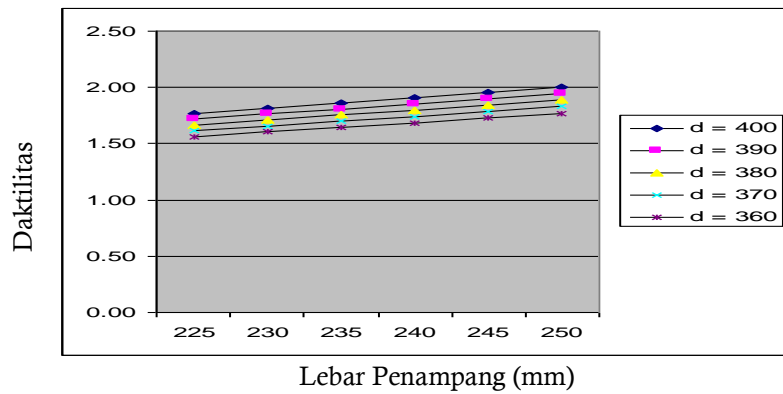
Gambar 4. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 35$ MPa dan $f_y = 400$ MPa



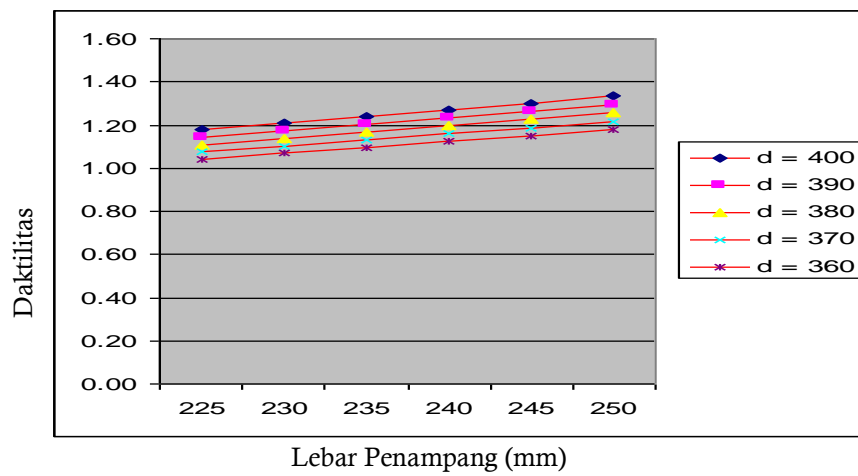
Gambar 5. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 30$ MPa dan $f_y = 400$ MPa



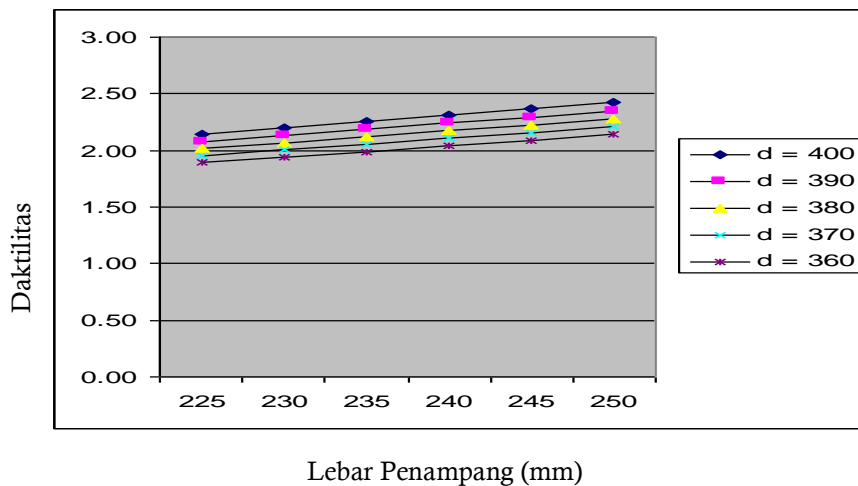
Gambar 6. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 35$ MPa dan $f_y = 350$ MPa



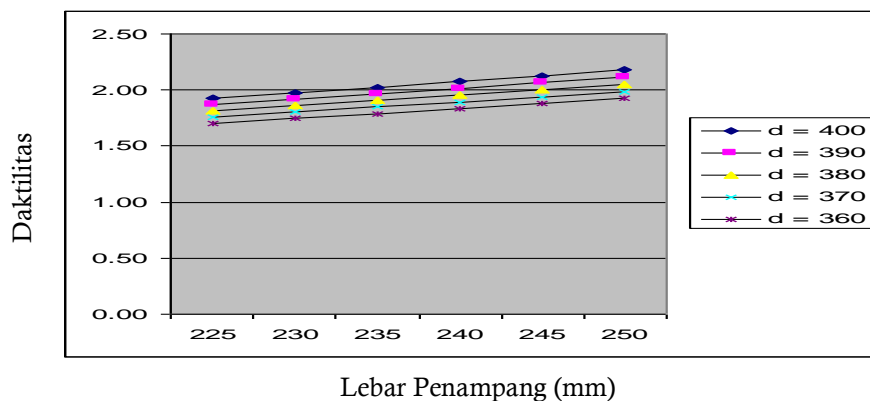
Gambar 7. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 30 \text{ MPa}$ dan $f_y = 350 \text{ MPa}$



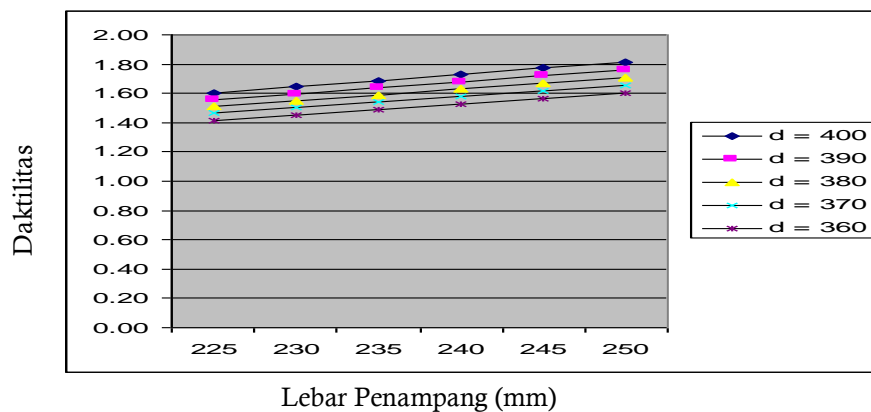
Gambar 8. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 25 \text{ MPa}$ dan $f_y = 350 \text{ MPa}$



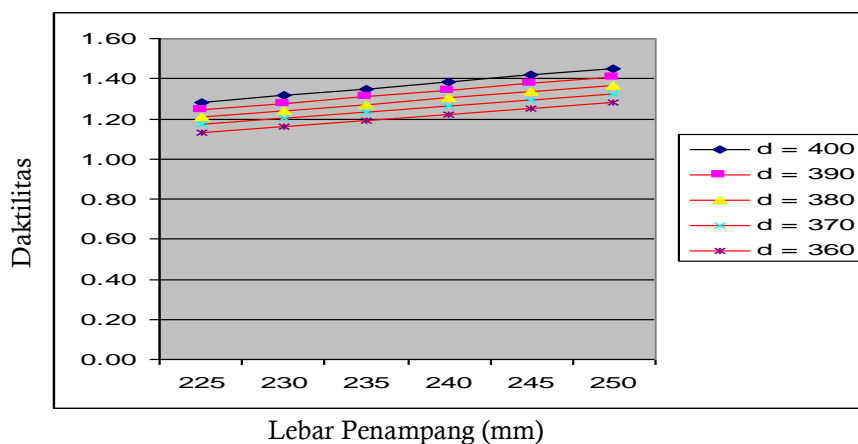
Gambar 9. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 35 \text{ MPa}$ dan $f_y = 300 \text{ MPa}$



Gambar 10. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 30$ MPa dan $f_y = 300$ MPa



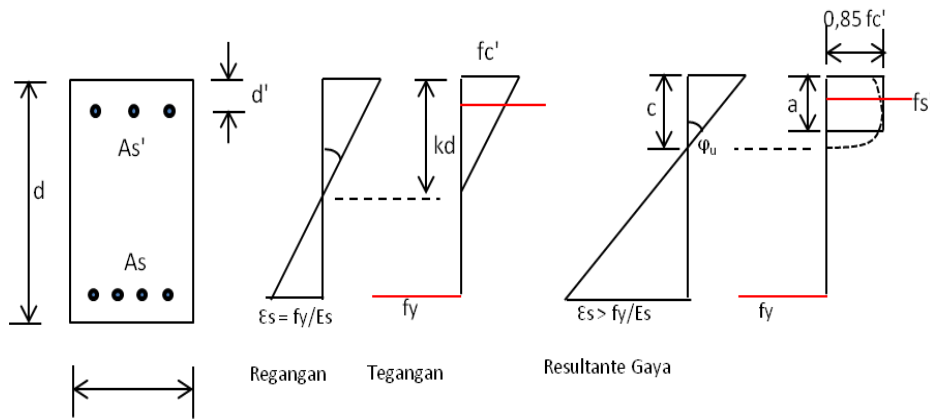
Gambar 11. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 25$ MPa dan $f_y = 300$ MPa



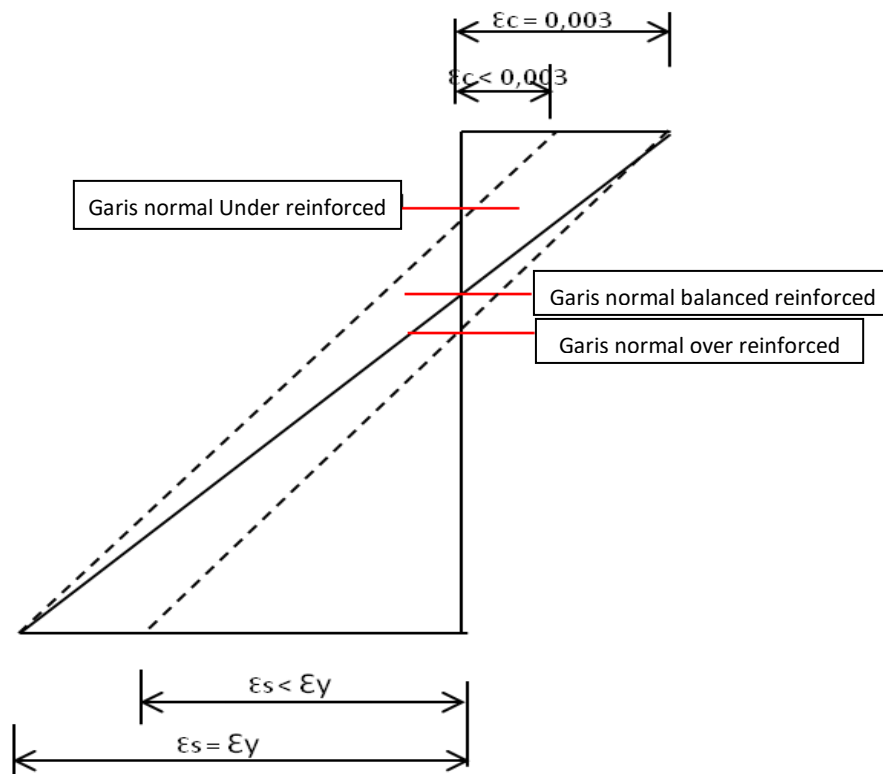
Gambar 12. Grafik Hubungan Lebar penampang vs Daktilitas untuk $f'_c = 20$ MPa dan $f_y = 300$ MPa

Dari grafik hubungan antara dimensi penampang dan daktilitas beton bertulang untuk variasi nilai f'_c dan f_y didapat hubungan sebagai berikut :

1. Reduksi (pengurangan) terhadap dimensi penampang beton bertulang (tinggi efektif beton (d) dan lebar beton (b)) menjadikan nilai daktilitas beton menjadi semakin berkurang.
2. Reduksi (pengurangan) terhadap mutu beton, yang ditunjukkan dengan pengurangan nilai tegangan tekan betonnya (f_c') menjadikan nilai daktilitas beton semakin berkurang.



Gambar 13. Diagram Tegangan Regangan Balok Beton Bertulang rangkap



Gambar 14. Diagram regangan penampang *balanced reinforced*, *under reinforced* dan *over reinforced*

Terhadap kedua hal tersebut di atas, maka dapat dinyatakan bahwa pengurangan dimensi penampang dan pengurangan mutu beton bertulang akan semakin menjadikan keruntuhan beton bersifat getas (*brittle*). Dari gambar (13) dan persamaan (2) serta persamaan (3), hal ini dapat dijelaskan

bahwa dengan pengurangan dimensi penampang dan pengurangan mutu beton bertulang, maka nilai tinggi balok beton ekuivalen (a) akan semakin besar, yang berarti garis normal berada di bawah garis normal untuk kondisi penampang seimbang seperti ditunjukkan gambar (14). Pengurangan dimensi penampang dan mutu beton akan menjadikan tulangan reaktif lebih 'kuat' terhadap penampang betonnya.

Dengan asumsi sebelum mengalami pengurangan dimensi penampang dan mutu beton, penampang beton bertulang dalam keadaan seimbang, maka pada saat terjadi pengurangan dimensi penampang dan pengurangan mutu beton akan terjadi hal-hal sebagai berikut :

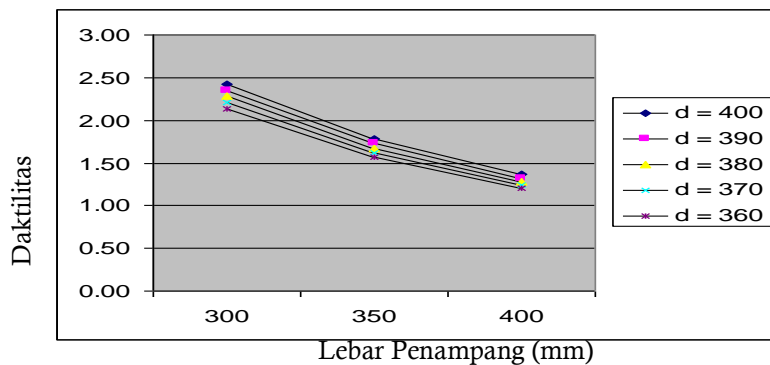
1. Pada saat balok beton bertulang tersebut menerima pembebanan yang berlebih, maka regangan tekan maximum beton (atau biasa disebut regangan hancur beton) akan tercapai lebih dulu sementara regangan leleh baja belum terlampaui.
2. Karena regangan leleh baja belum terjadi, maka di serat tertarik dari penampang balok beton bertulang tersebut belum ada tanda-tanda retak rambut, sementara beton sudah mencapai regangan hancurnya. Artinya pada saat pembebanan semakin bertambah, maka kondisi ini akan berpotensi menjadi keruntuhan yang getas, yaitu keruntuhan yang mendadak yang tidak didahului oleh adanya tanda-tanda retak lebih dulu. Kondisi ini sangat berbahaya karena keruntuhan yang tiba-tiba tidak memberi kesempatan kepada penghuni bangunan itu untuk menyelamatkan diri.

$$a = \frac{A_s f_y - A_s' f_y}{0,85 f_c' b} \dots\dots\dots (4)$$

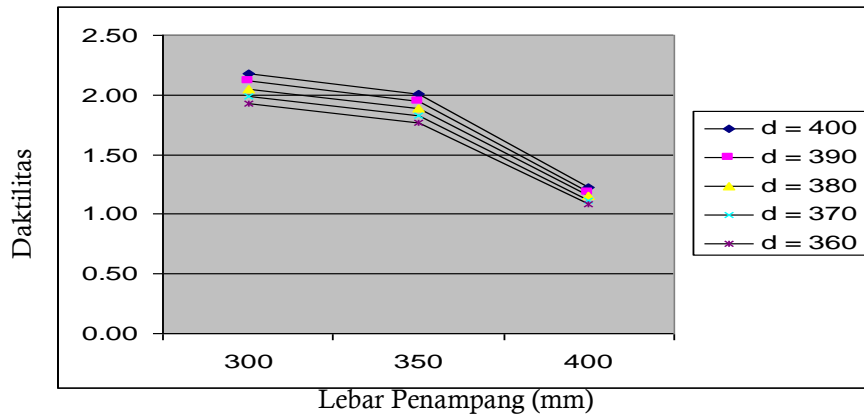
$$M = 0,85 f_c' a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + f_s' A_s' (d - d') \dots\dots\dots (5)$$

$$M = (A_s - A_s') f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \dots\dots\dots (6)$$

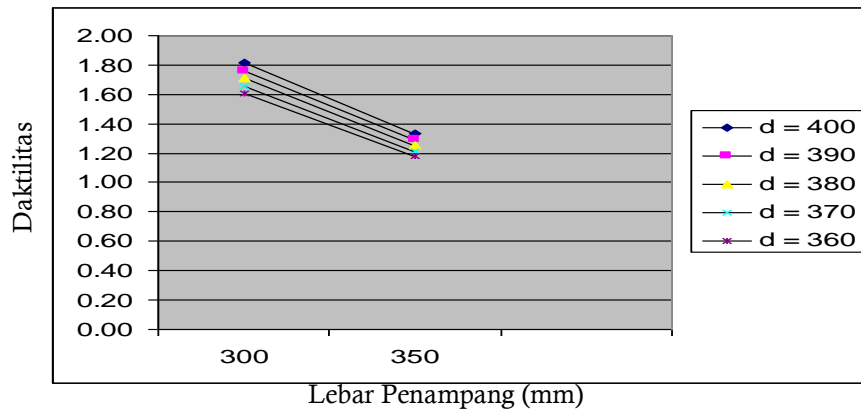
Selain berpotensi terhadap keruntuhan yang getas, pengurangan dimensi penampang dan pengurangan mutu beton juga akan berpengaruh terhadap pengurangan kapasitas penampang beton bertulang. Sesuai dengan persamaan (4) hubungan antara lebar balok (b) berbanding terbalik dengan tinggi balok beton ekuivalen (a), sehingga semakin kecil lebar balok (b) maka tinggi balok beton ekuivalen (a) akan semakin besar (Dipohusodo 1994). Dengan tinggi balok beton ekuivalen (a) yang semakin besar, maka lengan momen antara garis berat balok beton ekuivalen dengan garis berat tulangan tarik $(d - \frac{1}{2} a)$ semakin kecil. Demikian pula dengan pengurangan mutu beton yang berarti nilai f_c' nya menjadi lebih kecil, maka nilai tinggi balok beton ekuivalennya semakin besar. Kedua hal tersebut akan menjadikan kapasitas momen penampang akan menjadi kecil seperti ditunjukkan persamaan (5). Hubungan antara tegangan leleh baja tulangan terhadap nilai daktilitas beton seperti pada gambar di bawah.



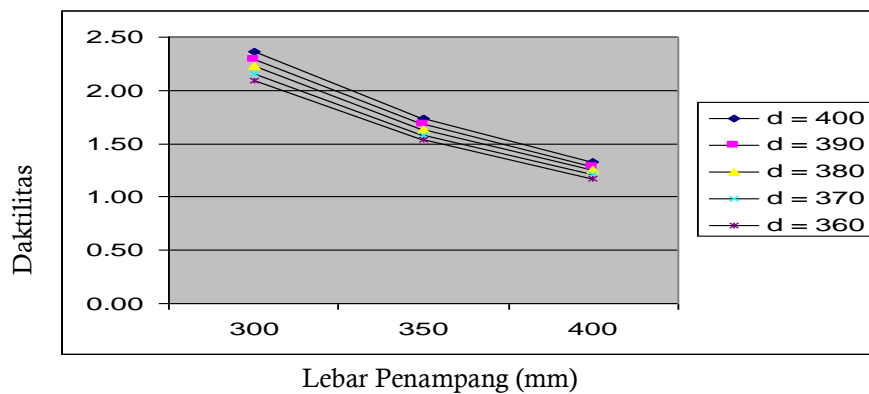
Gambar 15. Grafik hubungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 250$ mm dan $f_c' = 35$ MPa



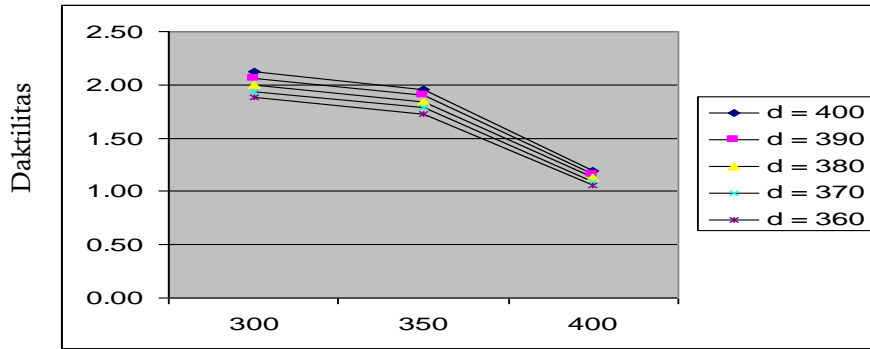
Gambar 16. Grafik Hubungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 250$ mm dan $f'_c = 30$ MPa Lebar Penampang (mm)



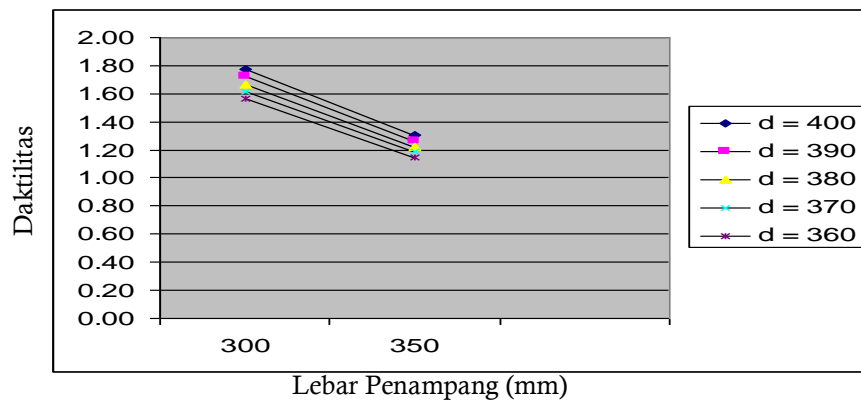
Gambar 17. Grafik Hubungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 250$ mm dan $f'_c = 25$ MPa



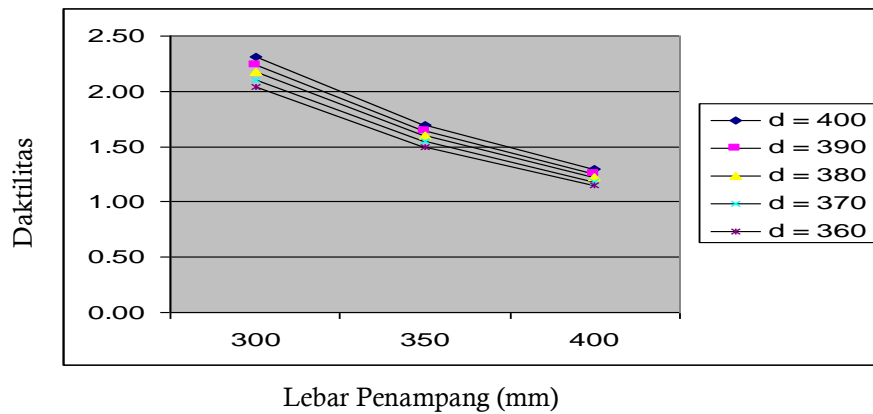
Gambar 18. Grafik Hubungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 245$ mm dan $f'_c = 35$ MPa



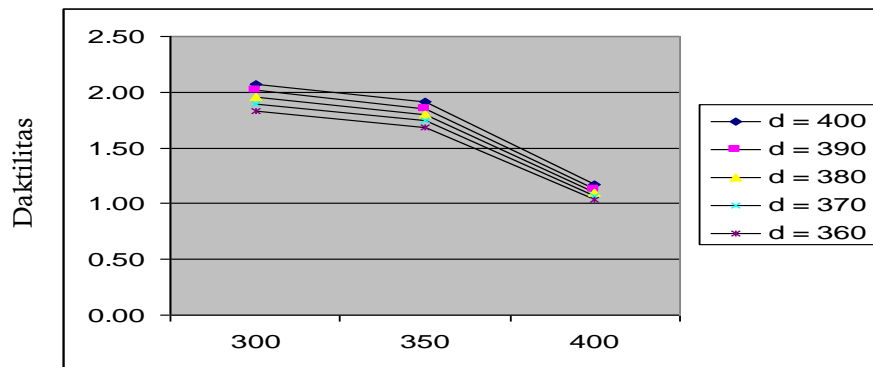
Gambar 19. Grafik Hubungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 245$ mm dan $f'_c = 30$ MPa



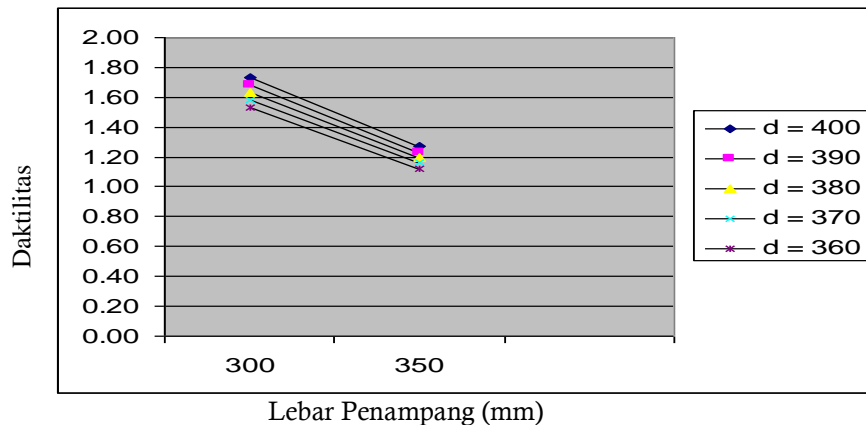
Gambar 20. Grafik HUBungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 245$ mm dan $f'_c = 25$ MPa



Gambar 21. Grafik Hubungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 240$ mm dan $f'_c = 35$ MPa



Gambar 22. Grafik Hubungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 240$ mm dan $f_c' = 30$ MPa



Gambar 23. Grafik Hubungan Tegangan Leleh baja (f_y) vs Daktilitas untuk $b = 240$ mm dan $f_c' = 25$ MPa

Dari grafik hubungan antara tegangan leleh baja (f_y) dan daktilitas beton bertulang, didapat hubungan bahwa semakin kecil nilai f_y akan semakin besar nilai daktilitas beton bertulang itu. Dari persamaan (4) hal ini dapat dijelaskan, bahwa dengan semakin kecil nilai f_y , maka tinggi balok beton ekuivalen (a) akan semakin kecil dan ini menjadikan garis normal berada di atas garis normal penampang seimbang. Ini berarti pula bahwa pengurangan nilai tegangan leleh baja (yang berarti pula pengurangan mutu baja) akan menjadikan baja tulangan menjadi relative lebih 'lemah' terhadap penampang betonnya. Sedemikian sehingga pada saat penampang balok menerima beban berlebih, maka regangan regangan leleh akan tercapai lebih dulu sebelum regangan hancur beton tercapai. Kondisi ini lebih aman, karena keruntuhan balok beton bertulang akan ditandai dulu oleh adanya tanda-tanda retak lebih dulu, sehingga memberi kesempatan kepada penghuni bangunan tersebut untuk lebih dini menyelamatkan diri keluar dari bangunan tersebut.

Dari mekanisme keruntuhan yang terjadi, pengurangan mutu baja menjadikan nilai daktilitas beton semakin besar, dimana keruntuhan beton lebih dulu ditandai oleh adanya tanda-tanda retak. Akan tetapi pengurangan mutu baja ini juga akan mengurangi kapasitas momen penampang seperti ditunjukkan oleh persamaan (6).

SIMPULAN

Kondisi penampang *balanced reinforced* adalah sebuah kondisi penampang beton bertulang dimana pada saat penampang menerima beban berlebih, maka regangan leleh baja terjadi secara

bersamaan dengan terjadinya regangan hancur beton. Perbandingan antara luas tulangan dan dimensi penampang beton dalam keadaan balanced disebut sebagai rasio penampang balanced (ρ_b). Ketentuan pembatasan penulangan tarik sebesar $0,75 \rho_b$ pada perencanaan beton bertulang terkandung maksud untuk menjaga kondisi penampang dalam keadaan under reinforced, sedemikian sehingga beton selalu dalam keadaan daktail. Toleransi 25% diberikan untuk tujuan apabila dalam perencanaan ada kesalahan-kesalahan dalam hal asumsi-asumsi yang diambil oleh perencana, sedemikian sehingga apabila kesalahan asumsi tersebut terjadi maka paling tidak penampang masih dalam keadaan balanced.

Pengurangan dimensi penampang dan pengurangan mutu beton akan berdampak tidak hanya pada berkurangnya kapasitas momen penampang, akan tetapi juga pada potensi terjadinya keruntuhan yang bersifat getas, yaitu keruntuhan yang mendadak karena tidak didahului oleh adanya tanda-tanda retak. Pengurangan mutu baja menjadikan beton bertulang menjadi semakin daktail, yaitu sebuah kondisi penampang beton bertulang dimana pada saat terjadi pembebanan yang berlebih, regangan leleh baja akan tercapai lebih dulu sementara regangan hancur beton belum mencapai nilai maksimum. Akan tetapi pengurangan mutu baja ini juga akan berdampak pada berkurangnya kapasitas momen penampang. Untuk alasan-alasan tertentu pengurangan dimensi penampang dapat dipertimbangkan untuk dilakukan, dengan nilai f_y antara 300-350 dan f_c' antara 30-35.

SARAN

Bahwa perencanaan struktur sudah memperhitungkan terhadap besarnya kapasitas momen penampang dan juga telah mempertimbangkan terhadap kemungkinan mekanisme keruntuhan yang terjadi. Sehingga dalam hal pekerjaan konstruksi sudah berjalan, kita perlu berhati-hati apabila akan melakukan perubahan desain, karena tidak hanya berpengaruh pada terjadinya perubahan kapasitas momen penampang, akan tetapi juga akan berpengaruh pada mekanisme keruntuhan yang akan terjadi. Apabila karena satu dan lain hal, dalam pelaksanaan pekerjaan konstruksi menuntut diadakannya pengurangan dimensi (karena faktor estetika misalnya), maka hal ini perlu dilakukan secara untuk menjamin tetap terjaganya besarnya kapasitas momen penampang serta kedaktailan penampang.

DAFTAR PUSTAKA

- Araby, M. Zardan, Samsul Rizal, Mochammad Afifuddin, and Abdullah Abdullah. 2021. "Analisis Perlakuan Joint Balok Kolom Terhadap Beban Siklik Dengan Penambahan Sengkok Pada Joint Sesuai SK SNI T-15-1991-03." *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan* 4(2):49–59.
- Aryanti, Riza, and Zulfira Mirani. 2008. "Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Menggunakan Modifikasi Alat Uji Tekan." *Jurnal Ilmiah Poli Rekayasa* 3(2):74–80.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung Dan Penjelasan*. Indonesia.
- Dady, Yohanes Trian, M. D. J. Sumajouw, and R. S. Windah. 2015. "Pengaruh Kuat Tekan Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulang." *Jurnal Sipil Statik* 3(5):341–50.
- Dipohusodo, Istimawan. 1994. "Balok Persegi Dan Plat Bertulang Tarik." in *Struktur Beton Bertulang: Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Limbongan, Steven, Servie O. Dapas, and Steenie E. Wallah. 2016. "Analisis Struktur Beton Bertulang Kolom Pipih Pada Gedung Bertingkat." *Jurnal Sipil Statik* 4(8):499–508.
- Maulana, Hafiz, Jati Sunaryati, and Rendy Thamrin. 2016. "Analisis Kapasitas Nominal Penampang Dan Kinerja Struktur Beton Bertulang Dengan Material Non-Linear." *Jurnal Rekayasa Sipil* 12(1):37–48. doi: <https://doi.org/10.25077/jrs.12.1.39-50.2016>.
- Mointi, Rahayu. 2014. "Kajian Eksperimental Mekanisme Retak Pada Balok Beton Bertulang." *Radial - Jurnal Peradaban Sains, Rekayasa, Dan Teknologi* 2(2):104–15. doi:

<https://doi.org/10.37971/radial.v2i2.52>.

- Nur, Oscar Fithrah. 2009. "Analisa Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan Terhadap Daktilitas Kurvatur Balok Beton Bertulang." *Jurnal Rekayasa Sipil* 5(1):23–34.
- Park, R., and T. Paulay. 1975. "Ultimate Deformation and Ductility of Members with Flexure." in *Reinforced Concrete Structures*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Sudarsana, I. K. 2010. "Analisis Pengaruh Konfigurasi Tulangan Terhadap Kekuatan Dan Daktilitas Kolom Beton Bertulang." *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil* 14(1):57–68.
- Triyuliani, Novita Ike, Sri Murni Dewi, and Lilya Susanti. 2019. "Metode Retrofit Tulangan Baja Eksternal Untuk Peningkatan Kekuatan Lentur Balok Beton Bertulang." *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Lingkungan* 3(2):135–44. doi: <https://doi.org/10.19184/jrsl.v3i2.10613>.