

Perilaku Hubungan Beban-Displasemen Pada Balok Beton Mutu Tinggi Dengan Kelangsingan Sedang

Inyoman Merdana

Jurusan Teknik Sipil-Fakultas Teknik Universitas Mataram

Jln. Majapahit 62 Mataram 83125.

Email : nmerdana@yahoo.com

Abstrak

Kinerja suatu struktur pada dasarnya dinilai dengan dua kriteria yaitu dari segi kekuatan, dan kekakuan. Pada bangunan yang peka terhadap displasemen maka kriteria kekakuan ini menjadi faktor penentu dalam hal kinerja struktur tersebut. Tulisan ini membahas tentang perilaku hubungan Beban-Displasemen pada balok beton mutu tinggi dengan Kelangsingan Sedang akibat beban statis dengan menggunakan kekuatan beton $f'_c=70,83\text{MPa}$ dan baja $f_y=442,6\text{MPa}$. Hasil penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan peneliti lain serta prediksi secara teoritis. Hubungan Beban vs Displasemen untuk beton mutu tinggi secara kualitatif tidak berbeda nyata bila dibandingkan dengan beton normal, terutama untuk balok dengan rasio $a/d=2,5$ dan $3,0$. Kedua balok tersebut memperlihatkan perilaku yang getas saat keruntuhan yang mana ditunjukkan dengan displasemen yang relatif kecil. Perilaku hubungan Beban vs Displasemen mendekati prediksi displasemen teoritis untuk kondisi beban sampai dengan beban runtuh. Balok dengan rasio $a/d\leq 5,0$, untuk beton mutu tinggi memberikan keruntuhan yang dapat dikategorikan sebagai keruntuhan Geser Lentur

Kata Kunci: Beton Mutu Tinggi, Displacement, Moderate slenderness

Abstract

Generally, there are two criterions for assessment of the structural performance, those are strength, and rigidity which often related to deflection. In a building that is sensitive due to displacement, the rigidity criterion becomes significant in assessments of performance of the structures. It is often the deflection criterion becoming imperative in designing stages. This article discusses about the behavior of Load Vs Displacement relationship of intermediate slenderness high strength concrete beams due to static loading having concrete strength of $70,83\text{MPa}$ and steel of $442,6\text{MPa}$. The results of the research is compared to either other research results and prediction theoretically. Qualitatively, the load Vs deflection relationship of intermediate slender high strength concrete and normal strength concrete beam are the same, especially for beam with ratio $a/d=2,5$ and $3,0$. Both of the beams exhibit brittle failure mode which have relatively small displacement at failure. The behavior of load Vs deflection relationship has good agreement with prediction theoretically up to collapse load. High strength concrete beam having ratio $a/d\leq 5,0$ gives Flexural Shear cracks failure.

Keywords: High Stregth Concrete, Displacement, Moderate slenderness

1. Latar Belakang

Dalam suatu bangunan teknik sipil, umumnya digunakan dua kriteria untuk menilai kelayakan suatu struktur yaitu dari segi kekuatan, yang mana sering dihubungkan dengan tegangan, dan kekakuan yang sering dikaitkan dengan defleksi. Jadi, selain tegangan yang terjadi dalam suatu struktur atau elemennya berada dalam batas batas yang wajar maka kinerja

suatu struktur juga ditentukan berdasarkan defleksinya. Pada bangunan bangunan tertentu yang peka terhadap penurunan maka kriteria kekakuan ini menjadi faktor yang dominan dalam hal kinerja struktur tersebut. Seringkali defleksi ini menentukan dalam pengambilan keputusan pada tahap perancangan. Suatu bangunan yang mengalami defleksi terlalu berlebihan tentunya akan sangat mengganggu

kenyamanan penghuni, dan dapat merusak elemen struktur yang lainnya.

Akhir dekade ini kebutuhan beton mulai banyak diproduksi hingga mencapai kekuatan tekan 100 MPa. Tentunya pemakaian beton ini menimbulkan konsekuensi persyaratan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton kekuatan normal. klasifikasi kekuatan beton dibedakan menjadi tiga yaitu; Beton normal untuk kekuatan tekan 20-50 MPa, Beton mutu tinggi untuk kekuatan 50-80 MPa, dan beton mutu sangat tinggi untuk kekuatan tekan lebih dari 80 MPa. [8]. Beton mutu tinggi seharusnya bukanlah semata mata berarti kualitas yang berorientasi hanya kepada kekuatan tekan, mutu haruslah diartikan lebih luas yaitu mencakup kekuatan, keawetan, daktilitas dan lainnya.

Bila mengingat perkembangan peraturan atau standar yang pernah ada dan berlaku di Indonesia dapat dilihat bahwa Indonesia pernah mempunyai PBI 1955, PBI 1971, dan sekarang SK SNI T-15-1991-03. Standar yang terakhir ini belum mengatur atau mencakup secara eksplisit hal hal yang berkaitan dengan Beton mutu tinggi [2,8].

Berdasarkan rasio bentang geser terhadap tinggi efektif balok a/d terdapat tiga mode kelangsingan balok yaitu Balok Langsing dengan rasio $a/d \geq 5,5$, balok kelangsingan sedang ($a/d=2,5-5,5$) dan balok tinggi ($a/d=1-2,5$). [4]. Dengan semakin tingginya kekuatan beton yang digunakan maka seringkali menghasilkan penampang elemen struktur yang begitu ramping. Walaupun dari segi kekuatan adalah cukup memadai namun dari segi kekakuan masih perlu untuk dipertanyakan. Dalam mengantisipasi kondisi itu maka perlu kiranya dilakukan suatu kajian yang membahas tentang Beton mutu tinggi dari segi kekakuan.

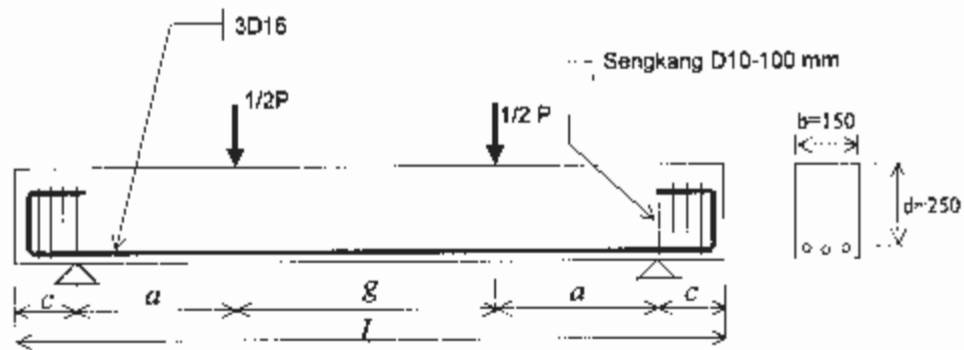
Dari Latar belakang tersebut diatas, kiranya secara sederhana dapat dirumuskan permasalahan pokok, yaitu bagaimana perilaku hubungan beban-displasemen pada balok beton mutu tinggi dengan kelangsingan sedang dibandingkan beton kekuatan normal akibat beban monoton. Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu mempelajari perilaku hubungan *beban vs displasemen* pada balok beton mutu tinggi dengan kelangsingan sedang.

2. Metodologi Penelitian

Adapun metode yang digunakan adalah dengan metode eksperimental di laboratorium. Pelaksanaan pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Struktur Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan ITS.

Alat alat utama yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini yaitu Universal testing machine, Bending Test Machine, Dial gage, Mesin uji tekan beton, dan peralatan pembuatan beton serta perlengkapannya. Sedangkan bahan bahan utama yang dipergunakan yaitu semen portland tipe I merk dagang Tiga Roda sesuai dengan standar ASTM C150-94 [1], tulangan baja deform diameter nominal 16mm dengan kekuatan leleh rata rata $f_y=442,6$ MPa sebagai tulangan lentur dan $f_y=313,3$ MPa untuk tulangan sengkang, yang mana keduanya memenuhi standar ASTM A615. Agregat halus yang digunakan adalah agregat dari alam sedangkan agrgegat kasar yang digunakan adalah agregat kasar yang berupa batu pecah.

Adapun bentuk dan ukuran dari balok uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperti terlihat pada Gambar 1 dan Tabel 1.



Gambar 1.
Bentuk typical benda uji Balok beton Mutu Tinggi

Tabel 1.
Rancangan Dimensi Benda Uji Balok

Tipe Balok	a (mm)	g (mm)	C (mm)	L (mm)	d (mm)	a/d	ρ (%)	f _c (MPa)
70-5	1250	600	200	3500	250	5	1,61	70.83
70-4	1000	600	200	3000	250	4	1,61	70.83
70-3	750	600	200	2500	250	3	1,61	70.83
70-2,5	625	600	200	2250	250	2.5	1,61	70.83

3. Analisa teoritis

Pada prinsipnya hubungan antara beban-displasemen untuk beton bertulang dapat di-idealisasikan menjadi tiga tahap yaitu *Precracking stage*, *Postcracking service loads* dan *Postserviceability cracking*. Defleksi suatu elemen dapat dihitung dengan integrasi kurvatur sepanjang elemen. Rotasi antara titik A dan B pada suatu batang dapat ditentukan oleh Persamaan (1) [6].

$$\theta_{AB} = \int_A^B \phi dx \quad (1)$$

Rotasi $d\theta = \phi dx$ dengan ϕ adalah kurvatur pada suatu elemen. Selanjutnya defleksi transversal $d\Delta$ di titik A dari tangen (garis singgung) ke sumbu batang akibat rotasi $d\theta$ dapat dihitung dengan Persamaan (2) [6].

$$\Delta_{AB} = \int_A^B x \phi dx \quad (2)$$

Persamaan (1) dan (2) tersebut di atas adalah merupakan generalisasi dari teorema *Moment Area* dengan mengabaikan

pengaruh geser, yang berlaku baik pada kondisi elastis maupun daerah plastis.

Dalam prediksi displasemen ini kurvatur elemen dihitung dengan menganggap bahwa tegangan beton pada elemen struktur memenuhi persamaan beton mutu tinggi yang diusulkan oleh Popovic yang disempurnakan oleh Thornfeldt, Tomaszewicz, dan Jensen [3]. Persamaan tersebut diatas dinyatakan dengan Persamaan (3) dan berlaku untuk kuat tekan $f_c = 60$ MPa hingga 120 MPa.

$$f_c = f'_c \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \frac{\rho}{\rho - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c}\right)^{pk}} \quad (3)$$

$$k = 0,67 + \frac{f'_c}{62} \quad (4)$$

$$\rho = 0,8 + \frac{f'_c}{17} \quad (5)$$

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \quad (6)$$

$$\epsilon'_c = \frac{f'_c}{E_c} \frac{\rho}{\rho - 1} \quad (7)$$

dengan : f_c = tegangan tekan, fungsi dari ϵ_c

f_c = tegangan maksimum
 ϵ_c = regangan tekan
 ϵ'_c = regangan saat f_c mencapai f'_c
 p = Curve fitting factor.

Untuk sembarang nilai regangan beton ϵ_{cm} pada serat tekan maksimum, gaya tekan beton C_c dan titik kerjanya dinyatakan dengan parameter α dan γ seperti Persamaan (8) [6],

$$C_c = \alpha f'_c b.c \quad (8)$$

dengan f'_c adalah kekuatan beton pada struktur yang besarnya $0,85 f_c$ dan c adalah tinggi garis netral.

$$\alpha = \frac{\int_0^{\epsilon'_{cm}} f_c d\epsilon_c}{f'_c \epsilon_{cm}} \quad (9)$$

Selanjutnya gaya tarik yang timbul pada tulangan baja T , momen nominal M_n , dan kurvatur ϕ penampang dapat dihitung dengan persamaan (10)-(11):

$$T = A_s f_s \quad (10)$$

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} \epsilon_c f_c d\epsilon_c}{\epsilon_{cm} \int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c} \quad (11)$$

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_c (d - c)}{c} \quad (12)$$

$$\Delta_{(x=1/2)} = \frac{\phi(l^2 - 1a)}{4} - \left\{ \frac{\phi a}{12} (3l - 4a) + \frac{\phi}{2} \left(\frac{l}{2} - a \right)^2 \right\} \quad (15)$$

$$\Delta_{(x=a)} = \frac{3\phi 1a - 4\phi a^2}{6} \quad (16)$$

$$M = T (d - \gamma cd) = C_c (d - \gamma c) \quad (13)$$

$$\phi = \frac{\epsilon_{cm}}{c} \quad (14)$$

dengan

C_c = gaya tekan beton

c = tinggi garis netral

ϕ = kurvatur penampang

α = faktor tegangan rata rata

γ = faktor titik berat untuk C_c

f_c = tegangan beton, fungsi dari ϵ_c

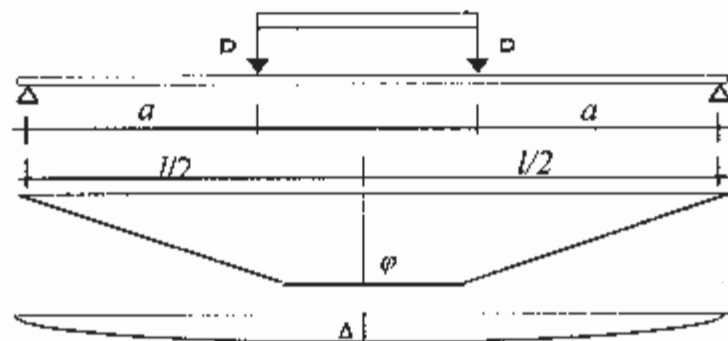
ϵ_{cm} = regangan tekan pada serat ekstrim

Perhitungan displasemen Δ pada daerah elastis yaitu dimana beton masih bersifat elastis sempurna dihitung dengan menggunakan kurvatur pada saat penampang belum mengalami leleh. Untuk tujuan analisa displasemen teoritis dianggap bahwa balok uji memiliki bentuk kurvatur seperti tampak pada Gambar 2. Dengan melihat pada Gambar 2 dan Persamaan (2), maka displasemen akibat lentur ditengah bentang dan dibawah beban P pada kondisi elastis dapat dihitung masing masing dengan Persamaan (15) dan (16),

dengan l = lebar bentang

ϕ = kurvatur pada titik yang ditinjau

Δ = displasemen pada titik yang ditinjau (akibat lentur)



Gambar 2.
 Displasemen pada Balok dengan Kurvatur Elastis

Untuk suatu balok dengan bentang yang relatif pendek maka pengaruh geser menjadi signifikan. Perhitungan defleksi balok akibat pengaruh geser dapat dihitung dengan metode Energi Regangan (*Strain Energy Method*). Untuk material yang bersifat elastis regangan geser adalah sebanding dengan tegangan geser. Energi regangan U_s merupakan usaha yang dikerjakan dalam bentuk peregangannya yang dinyatakan dengan persamaan (17); Untuk balok yang dibebani dengan dua buah beban P seperti nampak pada Gambar 2 maka displasemen akibat geser dibawah beban dapat dihitung dengan Persamaan (20) [7].

$$U_s = \frac{G}{2} \iint \tau^2 dA dx \quad (17)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (18)$$

$$\tau = \left(\frac{6F}{bd^3} \right) \left(\frac{d^2}{4} - y^2 \right) \quad (19)$$

$$\Delta_s = \frac{6}{5Gb d} Pa \quad (20)$$

Dengan demikian, displasemen yang sesungguhnya terjadi pada balok dengan memperhitungkan pengaruh geser yaitu dinyatakan dengan Persamaan (21).

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_s \quad (21)$$

Dalam rangkaian penelitian ini, pembebanan dilakukan dengan cara beban monoton bertahap dan terkontrol. Beban dikerjakan terhadap masing masing balok mulai dari nol hingga terjadi keruntuhan. Tinggi defleksi yang timbul pada balok dicatat pada setiap nilai beban sehingga memungkinkan untuk digambarkan pola hubungan beban vs Displasemen pada setiap tipe balok.

Semua hasil pengukuran beban dan displasemen dalam penelitian ini selanjutnya dibandingkan terhadap hasil

penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti lainnya [5], yang menggunakan beton normal dengan rasio a/d yang sesuai.

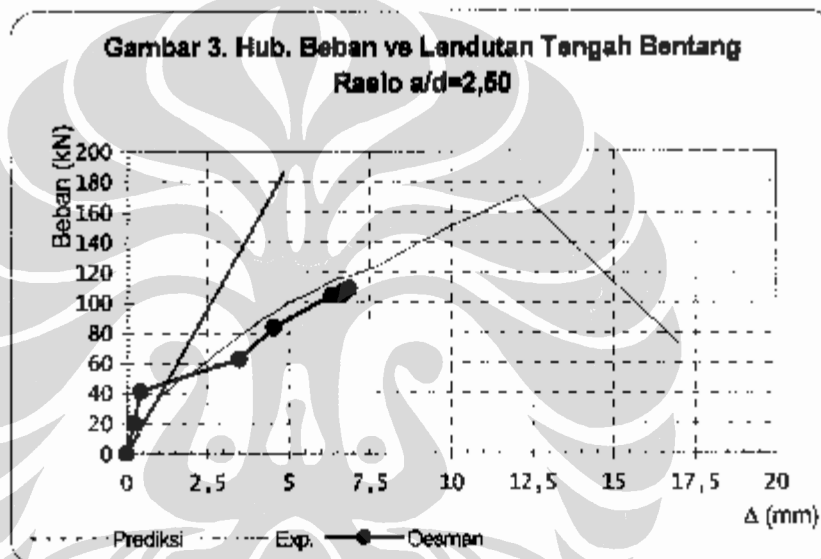
4. Hasil Penelitian Dan Pembahasan

Balok benda uji di tes ketika balok berumur 39 hari. Pada saat balok di Test, displasemen yang terjadi baik di tengah bentang maupun di bawah beban P di ukur dengan menggunakan *Dial Gage*. Berdasarkan data data yang diperoleh dari pengujian di laboratorium, dapat digambarkan hubungan *Beban vs Displasemen* yang timbul selama pembebanan yang dibandingkan dengan displasemen prediksi untuk tengah bentang dan hasil uji dari peneliti lain [5] yang menggunakan beton normal yaitu $f'c=25,45$ MPa untuk balok rasio $a/d=2,5$, $f'c=33,23$ MPa untuk balok rasio $a/d=3$ dan $f'c=35,3$ MPa untuk rasio $a/d=5$. Pada Gambar 3, 4, dan 6 masing masing dapat dilihat grafik hubungan beban vs displasemen untuk balok dengan rasio $a/d=2,5$; $a/d=3$ dan $a/d=5$ yang merupakan hasil pengujian, dan perbandingan dengan hasil penelitian lain [5] yang menggunakan beton kekuatan normal serta dibandingkan pula dengan prediksi displasemen secara teoritis. Balok dengan $a/d=2,5$ mengalami retak pertamakali saat beban total mencapai 56,25kN dengan disertai lendutan ditengah bentang sebesar 2,21mm. Sedangkan beban retak prediksi teoritis adalah $P_{cr}=75,83$ kN.

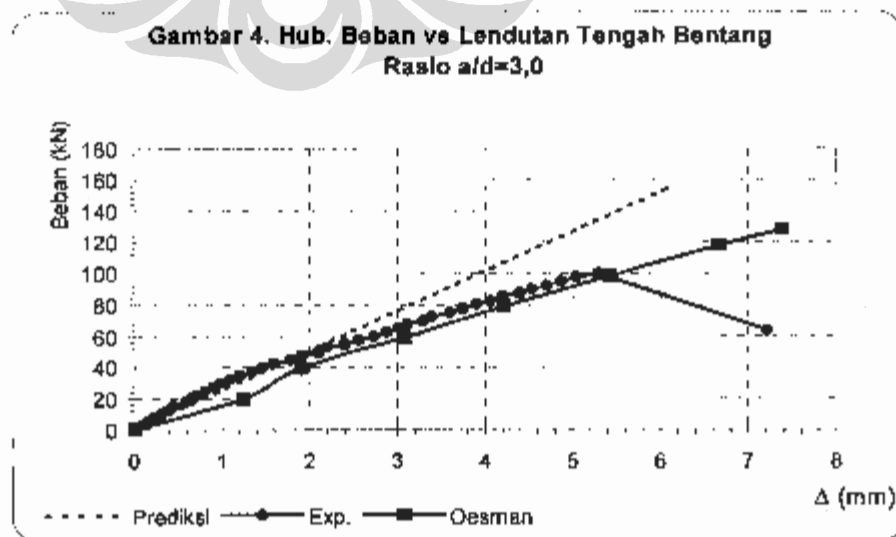
Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa untuk beban dibawah beban retak terdapat hubungan beban Vs Displasemen yang sangat sesuai dengan displasemen teoritis, begitu balok mengalami retak maka kekakuan balok mengalami reduksi yang sangat berarti sehingga displasemen menjadi jauh lebih besar dari prediksi. Perilaku displasemen yang sama pula didapatkan untuk balok dengan rasio $a/d=3$, yang mana balok mengalami retak ketika beban sebesar 60 kN, dengan lendutan maksimum tengah bentang setinggi 1,13 mm yang mana masing masing 5,05 % lebih kecil dari beban retak perkiraan teoritis (63,1929 kN), dan (73,22 %) lebih

rendah dari pada lendutan perkiraan teoritis (4,22mm) dengan memperhitungkan pengaruh tegangan geser. Pada awalnya, retak yang timbul relatif tegak lurus terhadap sumbu balok yang berjarak rata-rata sekitar 10 cm. Retak ini tergolong retak lentur. Seiring dengan bertambahnya beban maka retak akan bertambah merata dan semakin tinggi. Dengan melihat pola retak yang timbul maka balok balok tersebut mengalami retak Geser Lentur (*Flexural Shear Cracks*).

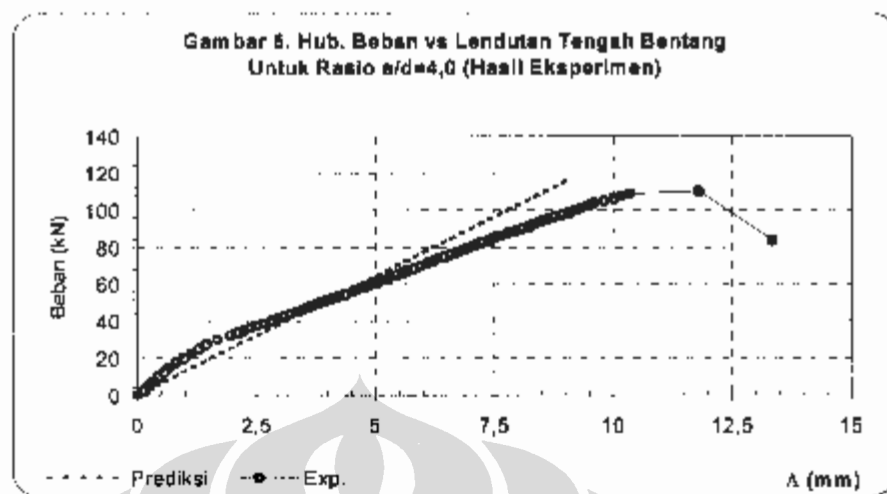
Dari Gambar 3 dan 4 untuk rasio $a/d=2,5$ dan $3,0$ dapat dilihat bahwa hubungan *Beban vs Displasemen* ditengah bentang tidak berbeda nyata antara beton normal dan beton mutu tinggi. Sedangkan untuk balok dengan rasio $a/d=5,0$ balok beton mutu tinggi menghasilkan kekakuan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan balok beton normal. Untuk balok dengan rasio $a/d=3,0$ dapat dilihat bahwa displasemen prediksi sangat mendekati nilai displasemen yang terukur di laboratorium



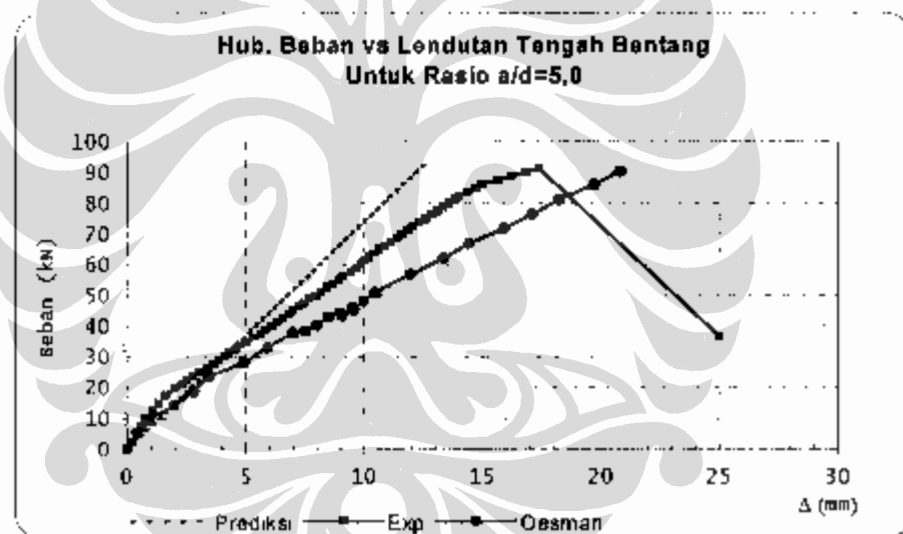
Gambar 3
Hubungan Beban Vs Displasemen untuk balok $a/d=2,5$



Gambar 4
Hubungan Beban Vs Displasemen untuk balok $a/d=3,0$



Gambar 5.
Hubungan Beban Vs Displasemen untuk balok $a/d=4,0$



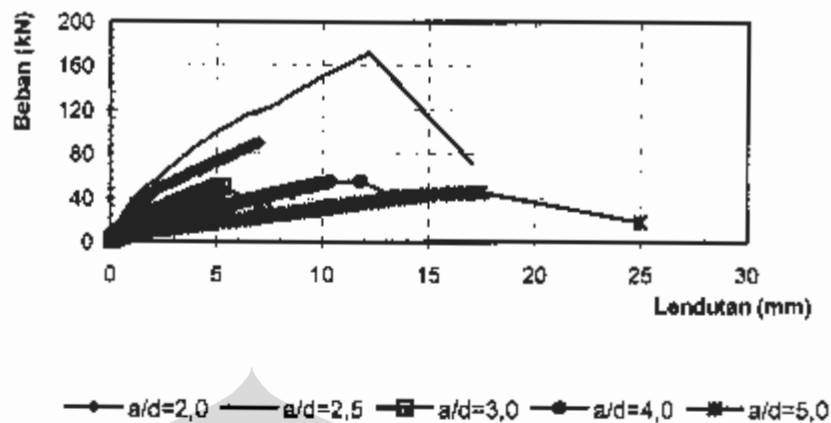
Gambar 6.
Hubungan Beban Vs Displasemen untuk balok $a/d=5,0$

Balok tipe 70-4,0 pada saat dibebani, mengalami retak pertama kali ketika beban total sebesar 51,25 kN, dengan lendutan maksimum tengah bentang setinggi 3,99 mm yang mana masing masing 7,52 % lebih besar dari beban retak perkiraan (47,3947 kN), dan (12,50 %) lebih rendah dari pada lendutan perkiraan teoritis (4,56 mm). Dari Gambar 5 dapat diketahui bahwa displasemen hasil eksperimen sangat mendekati displasemen prediksi teoritis. Namun balok beton mutu tinggi dengan

rasio $a/d=4,0$ ini tidak dapat dibandingkan dengan balok beton normal mengingat tidak adanya data laboratorium.

Dengan melihat pada Gambar 3, 4, 5 dan 6 juga dapat diketahui bahwa terdapat penyimpangan kecil pada perilaku hubungan beban vs displasemen antara prediksi teoritis dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium. Hal ini terjadi karena, begitu balok beton mengalami retak maka balok

Gambar 7. Hubungan Beban vs Displasemen Tengah Bentang Untuk Berbagai Rasio a/d Hasil Eksperimen



Gambar 7. Hubungan Beban Vs Displasemen untuk berbagai rasio a/d

mengalami reduksi kekakuan sehingga memberikan penyimpangan dari prediksi teoritis. Namun hal untuk beban yang lebih kecil daripada beban retak perilaku hubungan beban vs displasemen pada balok beton mutu tinggi sangat mendekati prediksi teoritis.

Pada Gambar 7 dapat dilihat grafik hubungan Beban vs Displasemen balok beton mutu tinggi dengan berbagai rasio a/d . Dapat diketahui bahwa semakin kecil rasio a/d , yaitu bila kelangsingan balok mengecil maka balok akan menjadi relatif lebih kaku. Dengan kata lain, semakin kecil ukuran penampang balok maka kelangsingan akan bertambah sehingga kekakuan akan berkurang yang mana hal ini tentunya perlu mendapat perhatian serius untuk beton mutu tinggi.

3. Kesimpulan

Dari rangkaian pengujian di atas kiranya dapat diambil kesimpulan :

1. Secara kualitatif, hubungan *Beban vs Displasemen* untuk beton mutu tinggi tidak berbeda jauh bila dibandingkan dengan beton normal, terutama untuk balok dengan rasio $a/d=2,5$ dan $3,0$ sehingga perhitungan displasemen yang

terjadi pada balok beton mutu tinggi dapat menggunakan persamaan yang sama dengan untuk balok beton kekuatan normal.

2. Perilaku hubungan Beban vs Displasemen mendekati prediksi displasemen teoritis untuk kondisi beban dibawah beban runtuh. Perhitungan displasemen teoritis untuk beton mutu tinggi dapat menggunakan teori yang konvensional.
3. Balok beton mengalami reduksi kekakuan dengan semakin besarnya kelangsingan balok

Daftar Acuan

1. Anonim, *Standard Specification for Portland cement ASTM C 150-92* (Annual Books of ASTM Standards, Vol 04.01), ASTM, pp. 91-95
2. Anonim, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SK SNI T 15 1991-03)*, Departemen Pekerjaan Umum, Dep. PU. Yayasan LPMB, Bandung, 1991, Pp.3-14

3. Mordana, N., *Pengaruh Rasio a/d terhadap Kekuatan Geser Balok Beton Mutu Tinggi*, Tesis Magister Teknik Sipil Pada Institut Teknologi 10 Nopember, 1999, Surabaya, Ch.2. Pp. 17-23
4. Nawy, E.G., , *Reinforced Concrete, A Fundamental Approach 3rd edition*, Prentice Hall, New Jersey, 1996
5. Oesman. M., 1997, *Analisis Kekuatan Geser Balok Beton Mutu Tinggi*, Tesis Magister Pada Program Pascasarjana Institut Teknologi Bandung, Bandung, Pp. D1-D8
6. Park, R., Paulay, T., , *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley&Sons Inc, Canada, 1975, Ch.6. Pp. 201-202, 236-237
7. Ryder, G.H., , *Strength of Materials 3rd edition in SI units*, English Language Book Society and MacMillan, London, 1969, Ch.9.Pp.152-175
8. Raka, IGusti Putu, , *Mengenal Beton Mutu Tinggi*, Seminar Sehari Himpunan Mahasiswa Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar Bali, 1997, Pp.2-8