

PERILAKU KEKUATAN GESER BALOK BETON MUTU TINGGI DENGAN BEBAN TERPUSAT STATIK PADA BALOK TULANGAN TUNGGAL DAN TANPA TULANGAN GESER DENGAN BERBAGI BENTANG GESER

Suharwanto¹⁾, Mardiana Oesman²⁾,

¹⁾ Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Wiralodra, Indramayu

²⁾ Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bandung

Abstract

An experimental research of behavior and the mechanism of shear strength in reinforced concrete beams without stirrup. 9 sample has been tested on a loading frame or Rigid Portal Beam (RPB) to get load- deflection curves in the mid span. All of the samples of the concrete are compressive strength (f'_c) and shear span-to-depth ratio (a/d). Concrete strength (f'_c) was varied from 30 MPa to 70 MPa and shear span-to-depth ratio (a/d) was varied from 2.5 to 5.0. Longitudinal reinforcement ratio (ρ) is 1.46%. All of the sample test result will compare with Indonesian code, that is SNI T-15-1991-03. Shear force result that takes experimental study more than SNI T-15-1991-03 analysis, so they are conservatively predict than sample result.

Key words: *beam shear strength, concrete compressive strength, shear span-to-depth ratio (a/d), single reinforcement, longitudinal reinforcement ratio, and conservative.*

Abstrak

Penelitian secara eksperimental telah dilakukan untuk mempelajari perilaku dan mekanisme kekuatan geser pada balok beton dengan tulangan tunggal dan tanpa tulangan geser. Sebanyak 9 buah balok beton dengan tulangan tunggal diuji dengan menggunakan rangka penahan beban atau *Rigid Portal Beam* (RPB), dan kurva hubungan beban vs defleksi di tengah bentang balok telah diperoleh. Variabel yang digunakan pada eksperimen ini adalah kekuatan beton (f'_c) dan bentang geser (a/d). Kekuatan beton bervariasi nilai f'_c 30 MPa hingga f'_c 70 MPa. Sedangkan bentang geser (a/d) bervariasi antara 2.5 hingga 5.0. Dan rasio tulangan tarik longitudinal $\rho = 1,46\%$. Selanjutnya hasil uji eksperimen dianalisa dan dibandingkan dengan persamaan pada yang ada di dalam SNI T-15-1991-03. Hasil analisa terhadap pengaruh rasio tulangan tarik longitudinal dan bentang geser (a/d) menunjukkan bahwa nilai kuat geser jauh lebih tinggi dari hasil perhitungan dengan persamaan SNI T-15-1991-03. Dengan demikian nilai geser yang dari persamaan tersebut sangat konservatif.

Kata kunci : kuat geser balok, kuat tekan beton, bentang geser (a/d), tulangan tunggal, rasio tulangan tarik longitudinal, konservatif.

I. PENDAHULUAN

Pada dekade terakhir ini, perkembangan dan penggunaan beton mutu tinggi berkembang dengan pesat. Oleh karena itu, perilaku struktur beton mutu tinggi penting untuk diketahui dan dimengerti dengan baik, karena sifat mekanik beton berubah dengan meningkatnya kekuatan beton (Kim dan Park,1993).

Keruntuhan geser balok beton bertulang tanpa tulangan tekan sudah dikenal merupakan keruntuhan yang getas dan tiba-tiba. Kekuatan geser beton bertulang tanpa tulangan tekan pada dasarnya tergantung antara lain : kekuatan beton, rasio tulangan tarik longitudinal, lengan geser, tinggi bersih, ukuran maksimum agregat, diameter tulangan, jarak retak-retak lentur, dan lain-lain.

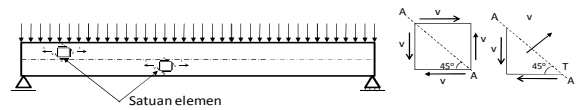
Beberapa penelitian dengan beton normal yang telah dilakukan menyatakan bahwa perkiraan kekuatan geser beton dengan perhitungan ACI code dan SNI T-15-1991-03 menunjukkan pengaruh rasio tulangan tarik longitudinal dan lengan geser a/d terhadap kekuatan geser berada pada ambang bawah untuk mendapatkan faktor keamanan tinggi. Hal ini perlu mendapatkan perhatian terutama apabila material beton mutu tinggi yang digunakan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari perilaku dan mekanisme kekuatan geser balok sehingga terjadi mode keruntuhan geser yang merupakan fungsi dari rasio momen terhadap geser , yang mencakup pola retak, kurva hubungan antara beban dan perpindahan, kurva hubungan antara momen dan kurvatur, serta gaya geser batas, dengan variabel mutu beton dari mutu normal ($f_c' < 40$ MPa) sampai dengan mutu tinggi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fenomega Geser Beton

Geser dalam beton merupakan akibat dari lenturan balok, dimana tegangan-tegangan tarik tambahan di tempat-tempat tertentu pada komponen struktur lentur akan menyesuaikan diri secara alami dengan membentuk keseimbangan tegangan geser dan tegangan normal masimum dalam satu bidang yang membentuk sudut kemiringan terhadap sumbu balok. (Dipohusodo, 1994).

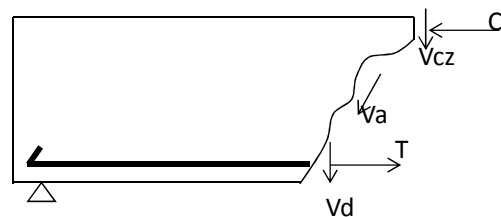


Gambar 1. Fenomena elemen balok

Tegangan geser dan lentur yang timbul pada balok akan bervariasi tergantung pada letak dan yang ditinjau sepanjang bentang balok dan jarak dari garis netralnya.

Mekanisme transfer gaya geser pada balok yang belum retak akan menuruti teori elastisitas, sedangkan pada balok setelah terjadi retak miring terbentuk, maka transfer gaya geser dilakukan oleh kombinasi dari beberapa mekanisme berikut:

1. Perlawanan geser oleh balok yang belum retak, V_{cz}
2. Perlawanan geser dari aksi interlock antara agregat beton sepanjang bidang retak, V_a
3. Aksi pasak, sebagai perlawanan dari tulangan memanjang terhadap gaya transversal, V_d
4. Aksi pelengkung sebagai sumbangan dari kuat tekan beton



Gambar 2. Mekanisme transfer gaya geser pada balok

Komponen V_{cz} , V_a , dan V_d disebut komponen gaya geser yang dapat ditahan oleh beton.

$$V_c = C_{cz} + V_a + V_d$$

Berdasarkan hasil penurunan rumus gaya geser yang hanya terjadi pada beton tersebut (Dipohusodo, 1994, MacGregor, 1992), maka dipeoleh persamaan :

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d$$

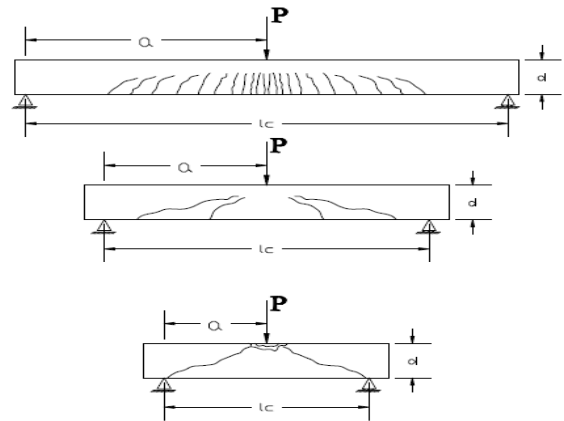
2.2 Perilaku Balok Tanpa Tulangan Geser

Balok yang tidak menggunakan tulangan sengkang merupakan model balok untuk mendapatkan fenomena gaya geser balok yang dapat dipikul oleh penampang beton.

Tegangan tarik dengan variasi besar dan kemiringan di sepanjang bentang balok akan menimbulkan fenomena gaya geser yang berbeda-beda tergantung pada kerusakan atau pola retak yang terbentuk. Pada umumnya kerusakan akan terjadi pada sekitar 3 (tiga) kali tinggi efektif balok dan daerah ini dinamakan **bentang geser** (Dipohusodo, 1994, MacGregor, 1992). Untuk bentang yang lebih pendek, maka kerusakan yang kan terjadi adalah kombinasi antara pergeseran, remuk dan belah dan sebaliknya adalah kerusakan yang terjadi adalah rusak atau retak lentur terlebih dahulu sebelum timbul rusak atau retak diaonal retak miring. Retak miring yang sebelumnya tidak mengalami retak lentur dinamakan retak geser badan. Sedangkan retak miring yang terjadi sebagai lanjutan dari retak lentur yang timbul sebelumnya dinamakan retak geser lentur.

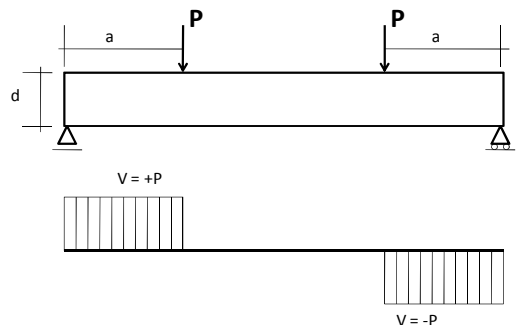
Ada tiga jenis retak yang umumnya terjadi pada balok. Jenis-jenis tersebut (MacGregor,1997;1997; Park & Paulay, 1975) adalah :

- a. **Retak Lentur (*Flexural Cracked*)**, terjadi pada daerah yang mengalami momen lentur besar dan gaya geser kecil atau lebih dominan momen lentur. Retak ini terjadi setelah tegangan tarik beton pada serat tarik balok terlampaui. Bentuk pola retak ini hampir tegak lurus arah sumbu balok (Gambar 3.a).
- b. **Retak Geser Lentur (*Flexural Shear Cracked*)**, merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang telah terjadi sebelumnya. Oleh karena itu,retak jenis ini terjadi pada bagian yang sudah mengalami retak lentur. Bentuk pola retak ini adalah beragam, yaitu dari mulai tegak hingga miring dan pada umumnya balok akan mengalami retak-retak pada seluruh bagian (Gambar 3.b).
- c. **Retak Geser Pada Badan Balok (*Web Shear Cracked*)**, umumnya terjadi pada balok yang mempunyai penampang relatif lebih tipis dan momennya relatif kecil dibanding dengan gaya gesernya. Retak jenis ini pada umumnya membentuk sudut 45° terhadap sumbu balok (Gambar 3.c).



Gambar 3. Pola retak untuk berbagai fungsi kelangsingan balok

Keragaman keruntuhan pada balok beton sangat tergantung pada kelangsingan balok yang dinyatakan dalam a/d untuk beban terpusat dan l/d untuk beban merata, dimana a adalah bentang geser, l adalah bentang bersih balok, dan d adalah tinggi efektif penampang balok. Sistem pengujian untuk menggambarkan pola retak dan bentang geser, maka pengujian dibuat model beban terpusat 2 titik seperti pada gambar berikut ini :



Gambar 4. Model pengujian balok

2.3 Perilaku Hubungan Beban Defleksi

Hubungan beban dan defleksi atau penurunan merupakan perilaku balok, dimana balok dapat berdeformasi hingga balok tersebut mengalami keruntuhan (gambar 4.a). Keruntuhan tersebut diakibatkan oleh kekuatan atau kapasitas balok yang terbatas, sehingga balok tersebut akan mengalami perubahan geometri berupa lenturan atau defleksi.

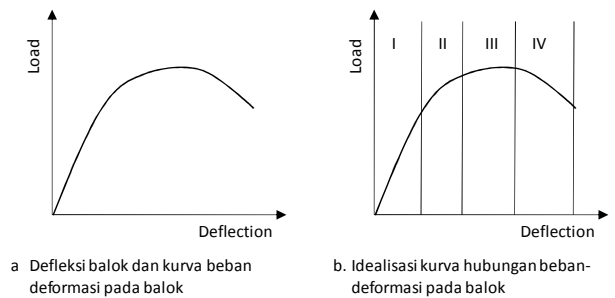
Defleksi pada balok dipengaruhi oleh beban yang bekerja, sifat material yang mengalami perubahan, sifat kelelahan material, rangkakan, dan perubahan geometri balok. Perubahan-perubahan ini akan menimbulkan tegangan dan regangan pada

materialnya, seperti beton dan besi tulangan. Perubahan tegangan dan regangan yang semakin besar akan mengakibatkan material mengalami kelelahan dan kehancuran, sehingga balok akan mengalami retak-retak yang semakin lama semakin bertambah jumlah dan lebar retaknya, yang selanjutnya balok beton akan menjadi hancur atau runtuh (Park & Paulay, 1975).

Secara umum kurva hubungan beban-defleksi dapat digambarkan dan di idealisasikan sebagai hubungan trilinear (Gambar 4.b) (Nawy dan Edward, 1996). Daerah pertama (I) adalah tahap sebelum terjadi retak (*Pre-cracking*), daerah kedua (II) adalah tahap pada saat setelah terjadi retak (*postcracking*), dan daerah ketiga (III) adalah tahap pada saat tulangan sudah mengalami leleh, namun balok masih mampu untuk menahan beban (*post serviceability cracking*). Sebelum terjadi retak, penampang balok beton mempunyai perilaku yang elastis. Tegangan tarik pada beton pada kondisi ini kurang dari kapasitas modulus runtuh (*modulus of rupture*, f_r). Setelah terjadi retak, kapasitas modulus runtuh beton terlampaui, sehingga kekuatan lentur penampang balok beton akan menurun dan garis kurva hubungan beban-defleksi akan menurun atau lebih landai bila dibandingkan dengan kondisi sebelum retak.

Peningkatan beban yang terus menerus mengakibatkan kekuatan balok semakin menurun. Hal ini diakibatkan oleh menurunnya kekuatan elemen-elemen pembentuk struktur (beton dan baja tulangan), dimana tahap ini baja tulangan telah mengalami leleh dan kekuatan penampang semakin menurun yang ditunjukkan dengan semakin banyak jumlah dan lebar retak. Pada tahap ini, peningkatan beban sudah tidak sebanding dengan peningkatan defleksi, sehingga garis kurva hubungan beban-defleksi akan semakin landai dari kondisi atau tahap sebelumnya. Tahap berikutnya (IV) adalah tahap keruntuhan. Tahap ini ditunjukkan oleh semakin panjang dan besar lebar retaknya. Tahap ini ditunjukkan oleh semakin panjang dan besar lebar retaknya. Hal ini mengakibatkan garis netral pada penampang balok semakin mendekati serat tertekan pada balok, dan pada akhirnya balok tersebut mengalami keruntuhan, karena tegangan

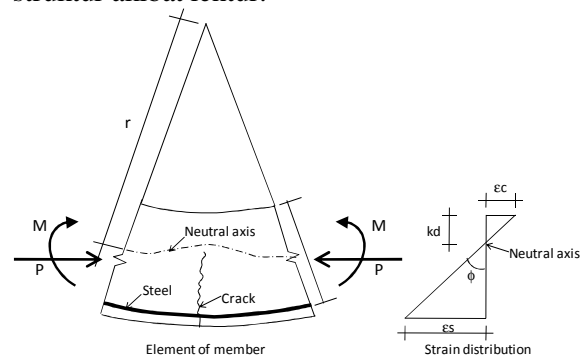
tekan yang terjadi melebihi kapasitas tekan atau mutu beton.



Gambar 4. Kurva beban-defleksi

2.4 Perilaku Hubungan Momen-Kurvatur

Kurvatur adalah gradien kemiringan (ϕ) dari diagram regangan atau perbandingan antara sudut lengkung maksimum balok (putaran sudut per unit panjang) dengan sudut kelengkungan leleh dari suatu elemen struktur akibat lentur.



Gambar 5. Fenomena lengkung (kurvatur) balok

Hubungan Momen dan kurvatur merupakan perilaku balok yang menunjukkan kegetasan (*ductility*) dari struktur balok beton. Kurva hubungan momen dan kurvatur mirip dengan hubungan antara beban dan defleksi, yang menggambarkan perilaku balok pada saat menerima beban. Pertambahan beban atau momen, maka kurvatur juga akan bertambah. Kemiringan kurva yang curam dan pendek menunjukkan elemen struktur balok yang semakin getas atau nilai daktilitasnya yang mengecil (Park & Paulay, 1975).

III. METODE PENELITIAN

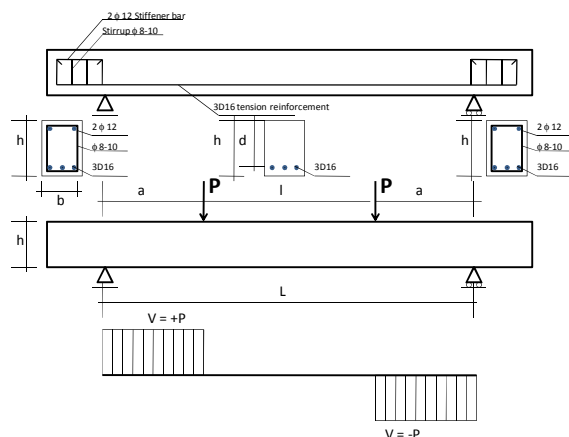
Metode pelaksanaan penelitian ini dilakukan beberapa tahap yang dimulai dari pencarian referensi dan studi pustaka atau literatur, pengujian material pembentuk beton

bertulang, seperti material pasir, batu pecah, besi tulangan, dan material beton, penyiapan peralatan uji, pembuatan benda uji termasuk pembuatan cetakan, pemasangan alat baca regangan (*strain gage*) yang ditempelkan di besi tulangan, pengecoran beton, pengaturan benda uji pada alat uji yang digambarkan pada Gambar 6, hingga analisa data hasil pengujian. Pemasangan alat monitoring regangan baja berupa strain gage dipasang atau ditempelkan pada baja tulangan (lihat Gambar 7) pada saat sebelum dilakukan pengecoran beton. Hal ini dimaksudkan agar pada saat pengujian berlangsung dapat mengetahui perkembangan regangan yang terjadi pada baja tulangan.

3.1 Pembuatan Benda Uji

Benda uji yang dibuat berupa balok persegi dengan tulangan tunggal dan skala yang disesuaikan dengan kapasitas alat uji di laboratorium agar benda uji dapat diuji hingga runtuh, sehingga perilakunya dapat diketahui. Dimensi dan bentuk balok tersebut dapat dilihat pada Gambar 5. Sedangkan penamaan benda ujinya dapat dilihat pada Tabel 1. Jumlah benda uji yang dibuat adalah 9 buah yang dibedakan berdasarkan kekuatan beton rencana dan rasio bentang geser a/d. Tulangan yang digunakan adalah :

- Tulangan tarik adalah 3D16 mm yang merupakan tulangan ulir dengan mutu baja $f_y = 400$ MPa
- Tulangan sengkang $\square 8$ mm-10cm yang merupakan tulangan polos dengan mutu baja $f_y = 240$ MPa
- Tulangan pengaku ujung balok $2 \square 12$ mm yang merupakan tulangan polos dengan mutu baja $f_y = 240$ MPa.



Gambar 5. Bentuk benda uji balok beton

Tabel 1. Uraian Balok Benda Uji

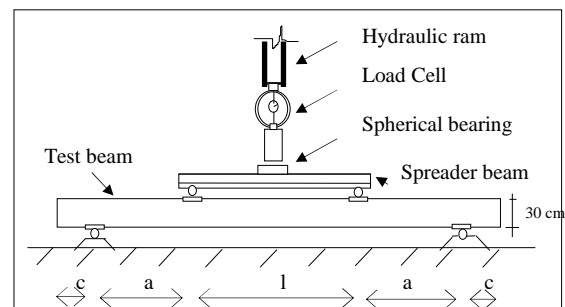
Kode Balok	b (mm)	d (mm)	a (mm)	l (mm)	L (mm)	c (mm)	fc' (MPa)	ρ (%)	As (m ²)
N-25	150	250	625	1000	3050	400	25.45	1.46	603
N-30	150	250	750	750	3050	400	33.23	1.46	603
N-50	150	250	1250	1000	4300	400	35.30	1.46	603
T-25	150	250	625	1000	3050	400	46.19	1.46	603
T-30	150	250	750	750	3050	400	47.45	1.46	603
T-50	150	250	1250	1000	4300	400	44.28	1.46	603
H-25	150	250	625	1000	3050	400	79.21	1.46	603
H-30	150	250	750	750	3050	400	59.34	1.46	603
H-50	150	250	1250	1000	4300	400	52.85	1.46	603

Keterangan:

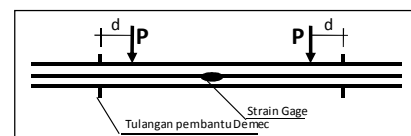
- Kode balok N-25, artinya balok dengan kekuatan beton normal ($f_c' < 30$ MPa) dengan a/d 2.5
- Kode balok H-25, artinya balok dengan kekuatan beton tinggi ($f_c' > 50$ MPa) dengan a/d 2.5
- Kode balok T-25, artinya balok dengan kekuatan beton peralihan dari mutu normal ke mutu tinggi ($30 \text{ Mpa} < f_c' < 50 \text{ Mpa}$) dengan a/d 2.5
- f_c' (MPa), artinya kekuatan balok beton aktual yang didapat dari hasil uji tekan silinder beton, sesaat sebelum balok beton dengan skala penuh diuji.

3.2 Pelaksanaan Pengujian.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine (UTM)*. Pengaturan pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 6, dimana peralatan dipasang untuk mencatat data pembebanan dan defleksi.



Gambar 6. Pengaturan pengujian benda uji balok beton



Gambar 7. Penempatan strain Gage dan Tulangan Pembantu jangka sorong Demec (*Demec gage*).

Balok uji ditumpu pada tumpuan sederhana dan dibebani oleh dua buah beban titik dengan jarak a . Tulangan tarik diukur regangannya dengan strain gage dan jangka sorong. Strain gage diletakkan pada tulangan tarik tengah dan diletakkan di tengah - tengah bentang pada permukaan atas balok beton. Sedangkan tulangan bantu pengukuran jangka sorong, yang berupa tulangan baja polos diameter 10 mm dengan panjang 6 cm, di las pada kedua tulangan tarik tepi sejarak d dari beban ke tepi luar, seperti terlihat pada Gambar 7. Pengukuran perpindahan yang terjadi pada balok uji selama pembebanan menggunakan transduser perpindahan atau *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) yang diletakkan pada bagian bawah balok uji. LVDT tersebut diletakkan pada tengah bentang dan pada kedua beban titik. Pengukuran perputaran sudut yang terjadi pada balok benda uji selama pembebanan berlangsung menggunakan inklinometer. Alat ini pada saat pembacaan diletakkan di atas sebelah ujung balok uji. Balok uji yang akan dibebani diletakkan pada rangka penahan beban atau *Rigid Portal Beam* (RPB). Selanjutnya, di atas balok uji tersebut diletakkan seperangkat alat pembebanan balok, seperti terlihat pada Gambar 6. Sistem pembebanan terhadap benda uji adalah monotonik. Pembebanan dilakukan dengan kontrol beban dan dilakukan secara perlahan-lahan hingga benda uji tersebut mengalami keruntuhan dan dimonitor penurunan benda uji, putaran sudut pada daerah tumpuan, dan regangan pada baja tulangan.

3.3 Pencatatan dan Anlisa Data Pengujian

Pencatatan data pengujian meliputi :

- Penurunan pada benda uji
- Regangan baja tulangan.
- Pola Retak

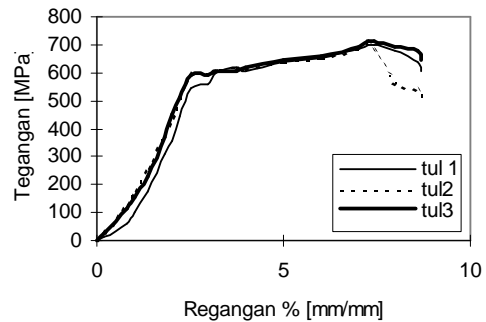
Analisa data pengujian meliputi :

- Momen dan Kurvatur
- Hubungan bentang geser dan tegangan geser.

3.4 Pengujian kuat tarik baja

Tulangan tarik longitudinal diuji tarik sehingga menghasilkan grafik hubungan regangan dan tegangan seperti Gambar 8. Dari grafik tersebut terlihat kekuatan leleh tulangan tersebut adalah 600 MPa dengan regangan leleh sebesar 0.0032 mm/mm, atau modulus elastisitas (E) baja sebesar 187.500

MPa. Hal ini melebihi dari target awal kekuatan tarik baja pada saat leleh adalah 400 MPa.



Gambar 8. Hubungan regangan-tegangan baja.

3.5 Pemeriksaan agregat Kasar dan Halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini adalah pasir Galunggung - Tasikmalaya - Jawa Barat, yang berasal dari daerah Tasik, Jawa Barat, sedangkan untuk agregat kasar ada 2 jenis yang berbeda, yaitu agregat kasar yang berasal dari Banjarnegara - Bandung - Jawa Barat untuk beton mutu normal dan agregat kasar yang berasal dari Semarang - Jawa Tengah untuk beton mutu tinggi. Hal ini dikarenakan sifat fisik yang berbeda, dimana secara visual agregat kasar dari Semarang ini memiliki gradasi yang lebih baik (tidak pipih) dan berwarna jauh lebih hitam (keras) dibandingkan dengan agregat kasar dari Banjarnegara, sehingga batu dari Banjarnegara sulit untuk mencapai mutu beton tinggi. Hasil uji karakteristik agregat halus dan kasar selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2 dan hasil analisa saringan dapat dilihat pada Gambar 9 hingga 11.

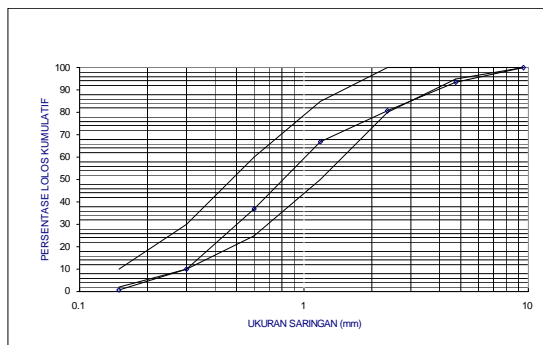
Selain semen portland, sebagai zat perekat, pada penelitian ini juga digunakan abu terbang untuk membuat benda uji beton mutu tinggi. Abu terbang yang digunakan merupakan limbah sentral termik (PLTU) yang berasal dari PLTU Suralaya. Menurut standar ASTM C 618, abu terbang ini dapat dikelompokkan sebagai class F fly ash.

Untuk memperbaiki tingkat kecacakan campuran beton ditambahkan zat kimia, superplasticizer. Pada penelitian ini digunakan bahan superplasticizer yang diproduksi oleh SIKA (PT. Sika Nusa Pratama) Bogor. Jenis superplasticizer yang digunakan pada penelitian ini adalah sikament - NN sesuai dengan standar ASTM C 494-83 tipe F yang mempunyai dosis

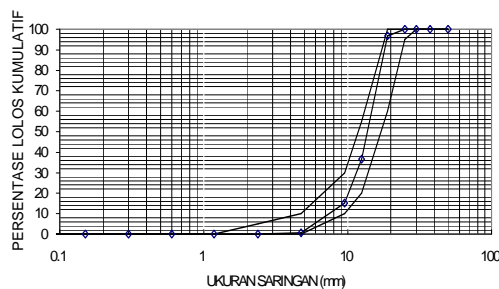
penggunaan antara 0.8 - 3%. Pada penelitian ini, pada proses perencanaan campuran beton, dosis superplasticizer yang digunakan adalah 1.5%.

Tabel 2. Karakteristik Agregat

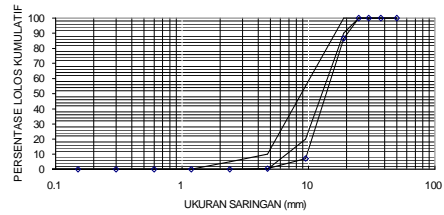
URAIAN	Agregat Kasar Banjaran	Agregat Kasar Semarang	Agregat Halus Galunggung
Apparent specific gravity	2.55 t/m ³	2.749 t/m ³	2.76 t/m ³
Bulk specific gravity (dry)	2.36 t/m ³	2.674 t/m ³	2.45 t/m ³
Bulk specific gravity (ssd)	2.44 t/m ³	2.702 t/m ³	2.56 t/m ³
% Absorpsi of water	3.17 %	2.0406 %	4.74 %
Berat volume padat	1.439 kg/ltr	1.439 kg/ltr	1.638 kg/ltr
Berat volume gembur	1.297 kg/ltr	1.297 kg/ltr	1.395 kg/ltr
Ukuran agregat maks.	5 s.d 19 mm	5 s.d 19 mm	4.75 mm
Kadar lumpur	0.3%	0.2 %	4.6 %
Angka kehalusan	8.505	8.059	2.789
Total water moister	2.13 %	1.652 %	9.29 %



Gambar 9. Kurva gradasi agregat halus dari Galunggung



Gambar 10. Kurva gradasi agregat kasar dari Banjaran



Gambar 11. Kurva gradasi agregat kasar dari Semarang

3.6 Komposisi dan Pemeriksaan Uji Kuat Tekan Beton

Berdasarkan hasil uji karakteristik agregat halus dan kasar tersebut di atas, selanjutnya dilakukan perhitungan komposisi kandungannya di dalam beton yang dapat dilihat pada Tabel 3. Selanjutnya dilakukan uji kekuatan tekan beton sebagai kontrol terhadap mutu beton yang dibentuknya. Berdasarkan hasil uji tersebut, diperoleh hasil kekuatan yang melebihi dari target yang dicapai. Hasil uji tersebut juga dapat dilihat pada Tabel 3.

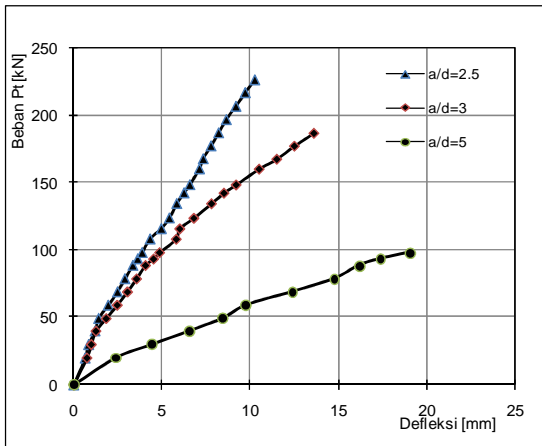
Tabel 3: Komposisi campuran beton per m³

Kekuatan Rencana Beton fc' [MPa]	30	50	70
Agregat Halus [kg]	859.71	670.28	653.50
Agregat Kasar [kg]	855.58	1053.63	1077.00
Semen [kg]	374.00	460.56	513.00
Abu Terbang [kg]	0	51.17	57.00
Superplasticizer [kg]	0	2.40	6.47
Air [kg]	154.91	157.60	143.50
Faktor air semen	0.41	0.34	0.28
Hasil Uji Tekan rata-rata (MPa)	32.6	52.4	70.8

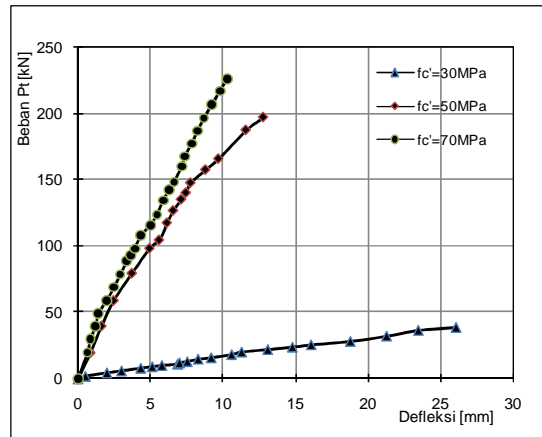
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Beban-Defleksi

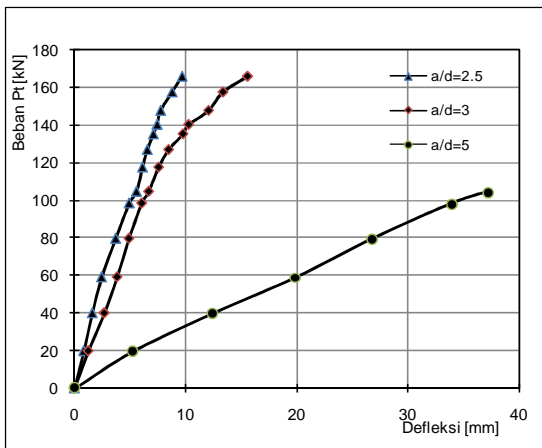
Pengaruh lengan geser a/d terhadap defleksi pada tengah bentang untuk beton bertulang tunggal mutu normal maupun mutu tinggi terlihat pada Gambar 9 sampai dengan Gambar 12 hingga 14. Dari grafik-grafik tersebut terlihat bahwa semakin kecil nilai lengan geser a/d semakin curam modulus sekan (Es) yang bersangkutan. Hal ini menunjukkan perbedaan transfer beban dari momen lentur menjadi gaya geser dominan.



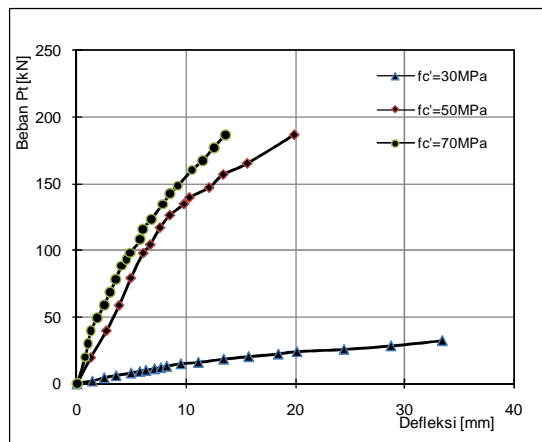
Gambar 12. Hubungan Beban vs Defleksi untuk beton mutu tinggi ($f_c' = 70$ MPa)



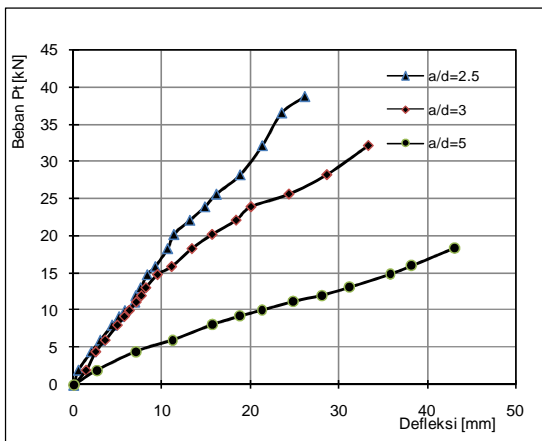
Gambar 15. Hubungan Beban vs Defleksi untuk bentang geser ($a/d = 2.5$)



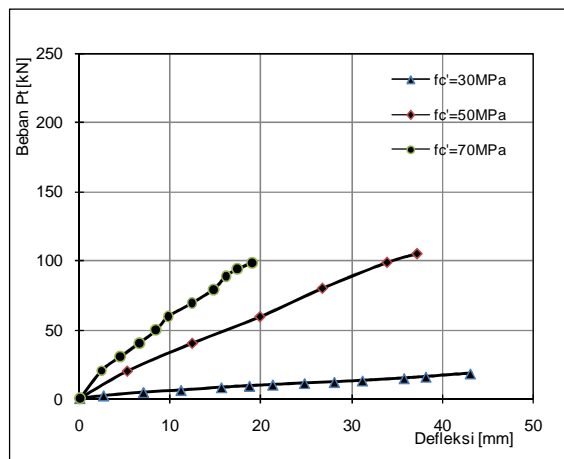
Gambar 13. Hubungan Beban vs Defleksi untuk beton mutu $40 \text{ MPa} < f_c' < 50 \text{ MPa}$



Gambar 16. Hubungan Beban vs Defleksi untuk bentang geser ($a/d = 3$)



Gambar 14. Hubungan Beban vs Defleksi untuk beton mutu normal ($f_c' = 30$ MPa)



Gambar 17. Hubungan Beban vs Defleksi untuk bentang geser ($a/d = 5$)

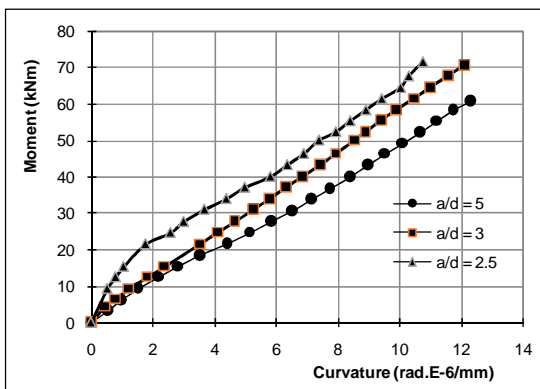
Dari Gambar 12 hingga 14 dapat dilihat pengaruh kekuatan beton terhadap defleksi pada tengah bentang tersebut menunjukkan bahwa semakin pendek bentang geser, maka kurva beban-defleksi semakin pendek yang berarti semakin getas atau semakin mudah

runtuh. Hal ini dikarenakan retak yang terjadi adalah retak geser tanpa melalui retak lentur terlebih dahulu, sehingga retak mudah bertambah panjang dan lebar.

Disamping itu, Gambar 15 hingga 17 bertambah besar kekuatan beton juga akan semakin curam modulus sekan (E_s) yang bersangkutan. Terlihat bahwa mutu beton tinggi mempunyai modulus sekan (E_s) lebih besar daripada modulus sekan (E_s) untuk kekuatan beton mutu normal. Hal ini juga berarti semakin tinggi mutu beton juga akan semakin getas atau mudah runtuh, walaupun mempunyai kekuatan yang lebih tinggi, sehingga semakin tinggi beton dan pendek bentang gesernya akan semakin mudah runtuh dan akan semakin berbahaya untuk struktur, karena keruntuhan tidak didahului dengan peringatan yang lama ataupun panjang, namun harus diwaspadai setelah ada keretakan pada balok beton. Dengan demikian, perencanaan struktur sebaiknya memperpanjang bentang geser agar tidak terjadi retak geser terlebih dahulu.

4.2 Momen-Kurvatur

Bentuk tipikal grafik momen vs kurvatur untuk beton dengan tulangan tunggal dapat dilihat pada Gambar 18. Momen dihitung secara statik berdasarkan besarnya beban yang diberikan pada balok. Sedangkan nilai kurvatur yang bersangkutan, dihitung dari distribusi regangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi mutu beton maka tingkat kegetasan akan semakin tinggi juga, karena pada saat runtuh nilai kurvatur balok beton mutu tinggi dengan tulangan tunggal lebih kecil dari pada nilai kurvatur balok beton normal dengan tulangan tunggal.

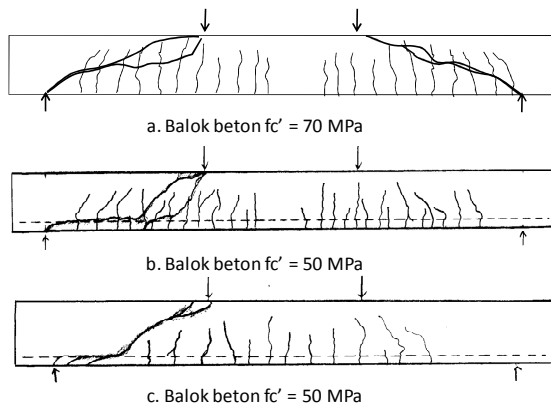


Gambar 18. Tipikal Kurva Momen Vs Kurvatur

Gambar 18 menunjukkan bentuk grafik hubungan beban vs defleksi mirip dengan grafik momen vs kurvatur, dimana modulus sekan (E_s) akan semakin tinggi nilainya seiring dengan peningkatan mutu beton. Pada awal pembebanan, terjadi hubungan yang linier antara momen (atau beban) dengan kurvatur (atau defleksi) yang menunjukkan bahwa pada tahap ini, balok masih bersifat elastis, yang selanjutnya bersifat elasto plastis yang ditunjukkan dengan kemiringan kurva yang mulai tidak linier lagi. Pada tahap ini balok mulai mengalami retak, karena kuat tarik beton (*modulus rupture*) sudah terlampaui dan pada diakhiri terbentuknya retakan yang seperti terbelah (*splitting crack*) dan dan retak miring (*inclined cracking*) yang selanjutnya terjadi keruntuhan. Namun pada bentang geser (a/d) yang semakin pendek akan mengalami keruntuhan mendadak.

4.3 Pola Retak

Pola retak menggambarkan perilaku balok beton pada saat dibebani, dimana pada saat kuat tarik beton pada bagian atau permukaan bawah terlampaui akan mengalami retak dan retak tersebut akan semakin berkembang atau bertambah panjang dan melebar seiring dengan bertambahnya beban. Pola retak tersebut juga menggambarkan retak lentur dan geser, dimana retak lentur digambarkan retak yang relatif tegak, sedangkan retak geser digambarkan retak yang relatif miring sudutnya. Kemiringan retak akan menunjukkan besarnya tegangan geser yang terjadi, dimana semakin miring sudut retaknya akan menunjukkan tegangan geser yang semakin besar. Penggambaran retak dilakukan manual dengan mencontoh atau meniru pola retak yang terjadi setelah mengalami runtuh. Gambar selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Pola retak pada balok beton setelah diuji

Gambar 19 menunjukkan pola retak dan keruntuhan balok uji untuk mutu beton (f_c ;) 30 MPa, 50 MPa dan 70. Retak mulai terjadi pada tengah bentang, pada daerah bidang momen yang besar. Retak berkembang relatif tegak lurus terhadap garis netral balok. Retak-retak ini tergolong retak lentur. Kemudian retak berkembang diikuti dengan retak-retak geser lentur pada jarak sekitar 1,5 hingga 2d dari tumpuan.

Keruntuhan terjadi akibat tidak adanya ikatan antara tulangan tarik dan beton disekitarnya karena *splitting crack*. Keruntuhan terjadi pada bagian diantara beban titik dan tumpuan. Keruntuhan ini dimulai dari lepasnya lekatan tulangan tarik dengan beton di sekitar perletakan menuju tengah bentang sampai jarak "d" dari titik beban, dilanjutkan menyerupai garis dengan kemiringan sekitar 45 derajat ke permukaan tekan balok ke titik beban. Pola retak runtuh ini terjadi secara tiba-tiba, tidak terlihat (terdeteksi) sesaat sebelum terjadinya keruntuhan. Dilihat dari pola runtuhnya, maka sifat runtuh yang terjadi merupakan keruntuhan geser-lentur. Semakin tinggi mutu beton retakan yang terjadi semakin sedikit dan kemiringan retak juga semakin mendekati 45 derajat. hal ini juga seiring dengan sifat beton, dimana semakin tinggi mutu beton, maka beton akan semakin getas. Namun demikian, beban yang diperlukan untuk memulai retak akan memerlukan beban yang lebih tinggi bila dibanding dengan mutu yang lebih kecil.

4.4 Pengaruh Rasio Lengan Geser (a/d) Terhadap Kekuatan Geser

Kekuatan geser balok beton bertulang pada dasarnya tergantung pada beberapa

variabel, antara lain kekuatan beton, rasio tulangan longitudinal, dan rasio lengan geser ($a/d = M/Vd$), sebagaimana tertera pada SNI T-15-1991-03:

$$V_c = \left[\left(\sqrt{f'_c} + 120\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) : 7 \right] b_w d \quad [\text{MPa}]$$

Dari hasil percobaan eksperimental pembebanan balok uji dapat dihitung besarnya kekuatan geser balok tersebut, sebagai berikut:

$$v_u = \frac{V_u}{bd\phi}$$

dimana :

v_u = tegangan geser pada penampang

V_u = gaya geser

b = lebar penampang balok

d = tinggi bersih balok

ϕ = faktor reduksi kekuatan geser

Tabel 4 menunjukkan nilai kekuatan geser yang didapat dari hasil pengujian balok, terhadap rasio lengan geser (a/d) untuk beton mutu normal dan beton mutu tinggi dengan rasio penulangan longitudinal sebesar 1.46%.

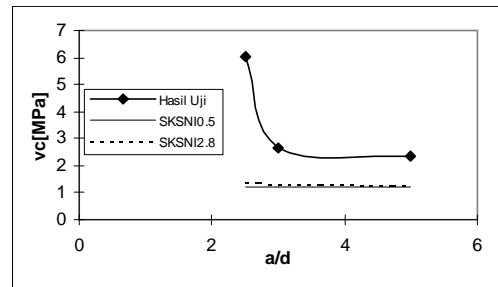
Tabel 4: Kekuatan Geser Balok Hasil Uji

Tipe Balok	f_c' [MPa]	a/d	V_R [kN]	v_R [Mpa]
N-25	25.45	2.5	109.40	2.65
N-30	33.23	3.0	128.02	3.10
N-50	35.30	5.0	90.25	2.19
T-25	46.19	2.5	182.15	4.42
T-30	47.45	3.0	98.20	2.38
T-50	44.28	5.0	98.20	2.38
H-25	79.21	2.5	248.52	6.02
H-30	59.34	3.0	108.60	2.63
H-50	52.85	5.0	98.20	2.38

Tabel 5 menunjukkan nilai kekuatan geser balok terhadap rasio lengan geser (a/d), yang dihitung berdasarkan SNI T-15-1991-03 untuk kekuatan rencana beton 30MPa, 50MPa, dan 70MPa dengan rasio tulangan longitudinal 0.5% dan 2.8%

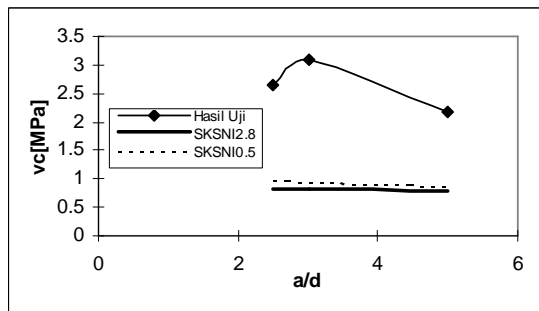
Tabel 5: Kekuatan Geser Menurut SNI T-15-1991-03

f_c' [MPa]	ρ [%]	a/d	d/a	v_c [MPa]
30	0.5	2.5	0.40	0.817
30	0.5	3.0	0.33	0.811
30	0.5	5.0	0.20	0.800
50	0.5	2.5	0.40	1.040
50	0.5	3.0	0.33	1.038
50	0.5	5.0	0.20	1.027
70	0.5	2.5	0.40	1.230
70	0.5	3.0	0.33	1.224
70	0.5	5.0	0.20	1.213
30	2.8	2.5	0.40	0.975
30	2.8	3.0	0.33	0.941
30	2.8	5.0	0.20	0.879
50	2.8	2.5	0.40	1.202
50	2.8	3.0	0.33	1.168
50	2.8	5.0	0.20	1.106
70	2.8	2.5	0.40	1.388
70	2.8	3.0	0.33	1.354
70	2.8	5.0	0.20	1.292



Gambar 22. Hubungan v_u dan a/d untuk f_c' 70 MPa

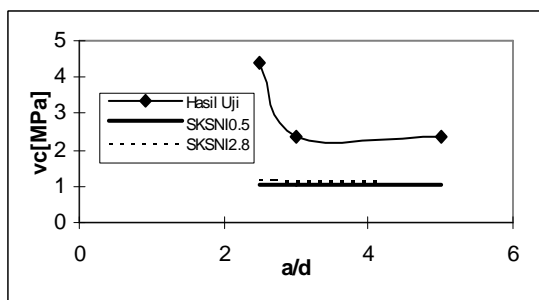
Gambar 20 hingga 22 menunjukkan hubungan kekuatan geser balok terhadap rasio bentang geser (a/d) dengan rasio tulangan longitudinal $\rho = 1.46\%$ (series 1 = hasil uji), $\rho = 0.5\%$ (series 2 = SNI T-15-1991-03) dan $\rho = 2.8\%$ (series 3 = SNI T-15-1991-03). Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa nilai kekuatan geser untuk $\rho = 1.46\%$ dengan perhitungan menurut SNI T-15-1991-03 (berada di antara grafik $\rho = 0.5\%$, menurut SNI T-15-1991-03 dan $\rho = 2.8\%$, menurut SNI T-15-1991-03) jauh lebih rendah dibandingkan nilai kekuatan geser dengan rasio tulangan yang sama $\rho = 1.46\%$, yang didapat dari hasil pengujian.



Gambar 20. Hubungan v_u dan a/d untuk f_c' 30 MPa

Gambar hubungan kekuatan geser balok dan rasio bentang geser tersebut di atas menunjukkan bahwa nilai kekuatan geser balok v_u sangat bervariasi tergantung nilai rasio bentang geser (a/d).

Berdasarkan pengujian yang dilakukan dapat dilihat bahwa untuk beton mutu tinggi pengaruh rasio bentang geser (a/d) terhadap kekuatan geser balok adalah bahwa semakin besar rasio bentang geser (a/d) semakin kecil kekuatan geser balok dan sebaliknya.



Gambar 21. Hubungan v_u dan a/d untuk f_c' 50 MPa

Dari ketiga gambar tersebut di atas, terlihat bahwa pengaruh rasio bentang geser (a/d) pada kekuatan geser balok yang dihitung berdasarkan SNI T-15-1991-03 menghasilkan kekuatan geser yang jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan kekuatan geser balok uji. Dengan kata lain persamaan kekuatan geser SNI T-15-1991-03 berada pada ambang baras bawah (konservatif).

4.5 Pengaruh Kekuatan beton f_c' dan Lengan Geser a/d pada Kekuatan Relatif Balok

Nilai kekuatan relatif balok pada pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6: Kekuatan Relatif balok

Tipe Balok	a/d	a [m]	Pt [kN]	Mu [kNm]	Mu/Mfl [%]
N-25	2.5	0.625	109.4	34.19	46.48
N-30	3.0	0.700	44.81	44.81	60.91
N-50	5.0	1.250	56.41	56.41	76.68
T-25	2.5	0.625	182.15	59.92	81.45
T-30	3.0	0.700	98.20	34.37	46.72
T-50	5.0	1.250	98.20	61.37	83.42
N-25	2.5	0.625	248.52	77.66	105.57
N-30	3.0	0.700	108.60	38.0	51.66
N-50	5.0	1.250	98.20	61.37	83.42

Berdasarkan teori, diagonal failure ditentukan oleh dua persamaan berikut:

(a) apabila $a/d \geq 5$ (momen dominan), momen batas ditentu oleh persamaan berikut [Kani, 1979]

$$M_u = \frac{f'_t}{6} bjd \frac{\Delta x}{s} a$$

(b) apabila $a/d < 5$ dimana geser dominan

$$M_u = \frac{M_{fl}}{0.9} \frac{d}{a}$$

dimana:

M_u = kapasitas momen batas balok

M_{fl} = kapasitas lentur balok secara teoritis
= $jd \cdot A_s \cdot f_y$

f'_t = tegangan tarik maksimum beton

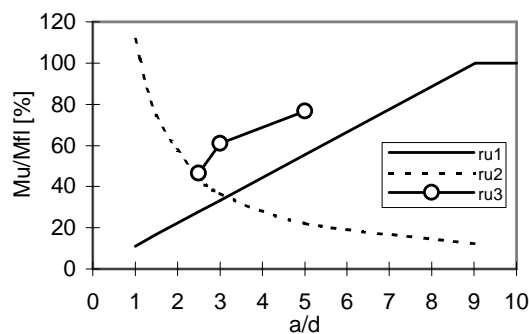
b = lebar penampang balok

jd = lengan momen dalam

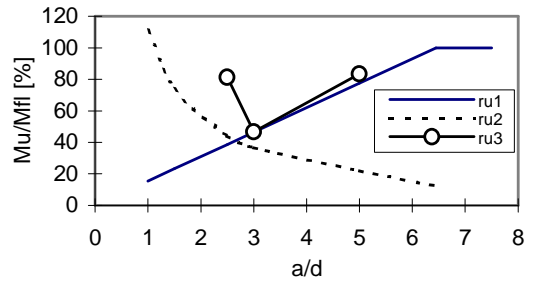
s = rata-rata lebar retak

Δx = lebar gigi antar retak

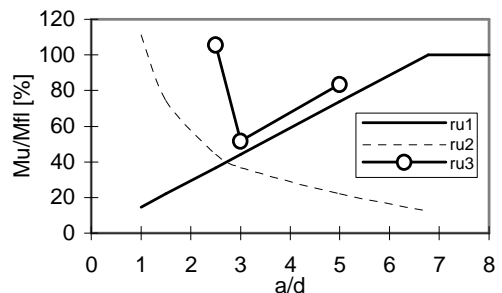
a = lengan geser, jarak antara beban titik dan tumpuan



Gambar 23. Pengaruh f'_c dan a/d pada kekuatan balok untuk beton mutu $f'_c = 30$ MPa



Gambar 24. Pengaruh f'_c dan a/d pada kekuatan balok untuk beton mutu $f'_c = 50$ MPa



Gambar 25. Pengaruh f'_c dan a/d pada kekuatan balok untuk beton mutu $f'_c = 70$ MPa

Keterangan:

ru1 = *capacity line of concrete teeth*

ru2 = *capacity line of remaining arch*

ru3 = hasil pengujian

Gambar 23 hingga 25 menunjukkan pengaruh kekuatan beton dan bentang geser (a/d) pada kekuatan relatif balok untuk kekuatan beton normal sampai beton mutu tinggi. Gambar tersebut menunjukkan bahwa ketiga balok uji dengan bentang geser (a/d) yang berbeda berada pada daerah yang diijinkan, karena berada di atas nilai M_u/M_{fl} minimum. Ketiga balok uji tersebut mempunyai kekuatan lentur dan geser dibawah *full flexural capacity*, dan untuk mencapai *full flexural capacity*, maka balok tersebut dapat ditingkatkan dengan menambahkan tulangan sengkang. Gambar ini juga menunjukkan bahwa gaya atau beban terpusat yang semakin menjauh dari tumpuan atau bentang geser (a/d) yang semakin besar, maka bentang balok tersebut semakin panjang, dan retak lentur akan lebih dominan. Sebaliknya, semakin kecil bentang geser (a/d), maka bentang balok semakin pendek dan retak geser akan lebih dominan.

V. KESIMPULAN

1. Perilaku kekuatan geser balok beton mutu tinggi dengan tulangan tunggal tidak banyak berbeda dengan balok beton normal dengan tulangan tunggal. Meskipun demikian, balok beton mutu tinggi dengan tulangan tunggal lebih kaku, mempunyai kekakuan (EI) rata-rata lebih tinggi, dibandingkan dengan balok beton normal dengan tulangan tunggal. Selain itu, balok beton mutu tinggi dengan tulangan tunggal menunjukkan tingkat kegetasan yang lebih tinggi, karena pada saat runtuh nilai kurvatur balok beton mutu tinggi dengan tulangan tunggal lebih kecil dari pada nilai kurvatur balok beton normal dengan tulangan tunggal.
2. Untuk balok dengan bentang panjang ($a/d \geq 5$) pola keruntuhan geser terjadi setelah tegangan lekatan rusak dari tumpuan sampai disuatu titik sekitar 2.5 sampai dengan 3.0 d dari perletakan. Untuk balok dengan bentang pendek ($a/d \leq 3$) keruntuhan geser tidak diawali oleh kerusakan tegangan lekatan, tetapi langsung mengarah pada pola retak geser.
3. SNI T-15-1991-03 memberikan prediksi yang konservatif untuk beton mutu tinggi. Untuk balok dengan tulangan tunggal dengan lengan geser $a/d \geq 3$ mempunyai faktor keamanan sekitar 2. Sedangkan untuk balok dengan tulangan tunggal dengan lengan geser $a/d < 3$ mempunyai faktor keamanan lebih besar dari 2,5. Bahkan, untuk balok dengan tulangan tunggal dengan kekuatan beton $f_c' \geq 70$ MPa, faktor keamanan bisa mencapai 4.34

Department of Civil Engineering
University of Toronto, 1979.

6. MacGregor, J., "Reinforced Concrete Mechanics and Design", Printice Hall, 1997.
7. Nawy, E.G., "Reinforced Concrete A Fundamental Approach", Printice Hall, 1996.
8. Park, R., and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures", John Wiley & Sons, 1975.
9. Shah, S.P., "High Performance Concretes And Applications", Edward Arnold, 1994.
10. Xie, Y.; Ahmad, S.H.; Chung, W., "Shear Ductility of Reinforced Concrete Beams of Normal and High-Strength Concrete", ACI Structural Journal, Technical Paper, March-April 1994.

DAFTAR PUSTAKA

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-89/ACI 318R-89)", American Concrete Institute, 1989.
2. Chung, W.; Ahmad, S.H., "Model for Shear Critical High-Strength Concrete Beams", ACI Structural Journal, Technical Paper, January-February 1994.
3. Departemen Pekerjaan Umum, 1991, "Standar Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung", (SNI T-15-1991-03).
4. Dipohusodo, I. "Struktur Beton bertulang" Gramedia, 1994.
5. Kani, M., and Huggins, R., "Kani On Shear In Reinforced Concrete",