

KAJIAN TERHADAP PERUMUSAN TULANGAN GESER MINIMUM PADA BALOK BETON MUTU TINGGI

Benny Kusuma

Kandidat Doktor, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya
Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus (UKIP) Makassar
Jl.. Perintis Kemerdekaan Km.13 Daya, Makassar
email : kusuma06@yahoo.com

ABSTRAKSI

Makalah ini membahas kajian terhadap berbagai perumusan tulangan geser minimum untuk balok beton mutu tinggi yang diberikan dalam beberapa tata cara (*codes*) dan oleh beberapa peneliti terdahulu. Pengujian eksperimental dilakukan pada 12 balok beton bertulang dengan kuat tekan sekitar 70 MPa. Balok-balok tersebut dibebani sampai mengalami keruntuhan geser. Variabel yang ditinjau dalam pengujian ini adalah jumlah tulangan geser minimum. Rasio lengan geser dan tulangan longitudinal balok berturut-turut sebesar 4 dan 3,68%, sama untuk semua balok.

Hasil eksperimen ini dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan persamaan-persamaan tulangan geser minimum dalam ACI 318M-02; CSA A23.3-94; AASHTO 1994; Krauthammer (1992); dan Ozcebe, dkk. (1999), termasuk hasil eksperimen oleh peneliti lainnya. Hasil evaluasi tersebut menunjukkan bahwa perumusan tulangan geser minimum dalam tata-tata cara yang ditinjau tersebut cukup konservatif.

Kata kunci: balok; beton mutu tinggi; kuat geser; sengkang; tata cara; tulangan geser minimum.

ABSTRACT

This paper presents an evaluation of various minimum shear reinforcement equations for high-strength concrete beams given in several codes of practice and by a few previous researchers. The experimental testing was conducted on 12 reinforced concrete beams with compressive strength of about 70 MPa. The beams were loaded until failure in shear. The variables considered in the tests are the amount of minimum shear reinforcement. The ratios of shear arm and longitudinal reinforcement of the beams are 4 and 3.68%, respectively, and are equal for all the beams.

The experimental results were compared with the computational results using the equations for minimum shear reinforcement in ACI 318M-02; CSA A23.3-94; AASHTO 1994; Krauthammer (1992); and Ozcebe, et al. (1999), including the experimental results reported by other researchers. The results of the evaluation show that the minimum shear reinforcement in the codes of practice considered in the paper are quite conservative.

Keywords: beams; high-strength concrete; shear strength; stirrups; codes of practice; minimum shear reinforcement.

1. PENDAHULUAN

Tulangan geser minimum harus mampu mencegah keruntuhan geser secara tiba-tiba ketika terjadinya retak tarik diagonal pada kondisi ultimat dan juga harus bisa membatasi retak tarik diagonal pada saat kondisi layan. Untuk mencegah keruntuhan beton yang bersifat getas, cadangan kekuatan yang cukup harus diberikan oleh tulangan geser setelah terjadinya retak diagonal pada balok beton bertulang. Untuk mengontrol lebar retak pada kondisi layan, tidak hanya jumlah tulangan geser minimum saja yang harus disediakan, namun jarak maksimum antar tulangan geser juga harus dibatasi. Sebagai akibat kuat tarik yang lebih tinggi pada beton mutu tinggi, geser yang mengakibatkan retak juga akan meningkat sehingga memerlukan jumlah tulangan geser minimum yang lebih banyak.¹⁻³ Oleh karena itu, perumusan jumlah tulangan geser minimum yang lama kemungkinan tidak mencukupi bilamana diterapkan pada balok beton mutu tinggi.

Wang dan Salmon (1998), tulangan geser yang terlalu sedikit jumlahnya akan meleleh segera ketika terbentuknya retak miring diagonal, sebelum balok tersebut mengalami keruntuhan. Jika jumlah tulangan geser terlalu tinggi, maka akan terjadi keruntuhan geser-tekan sebelum melelehnya tulangan geser. Jumlah tulangan geser yang optimal bilamana tulangan geser dan daerah beton tekan kedua-duanya terus memikul geser setelah pembentukan dari retak diagonal sampai melelehnya tulangan geser, dengan demikian menjamin suatu keruntuhan yang daktail.

Pembahasan mengenai pengaruh jumlah tulangan geser minimum terhadap penambahan kuat geser beton masih sangat jarang dilakukan. Pembahasan yang dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu tidak menyajikan hasil eksperimen kuat geser beton (V_c) dan hanya terbatas pada kuat geser ultimat (V_u) saja. Oleh karena itu, penulis menganggap perlu untuk mengadakan evaluasi terhadap pengaruh jumlah tulangan geser minimum yang lebih detail pada kuat geser beton.

Tujuan penelitian ini adalah untuk (1) mempelajari perilaku geser balok beton mutu tinggi berdasarkan variabel jumlah tulangan geser minimum menurut tata-tata cara (*codes*) ACI 318M-02; CSA A23.3-94; dan AASHTO-94; dan (2) mengevaluasi pengaruh tulangan geser minimum dengan membandingkan kuat geser hasil pengujian dengan kuat geser nominal dari masing-masing tata cara beton tersebut.

2. PERSYARATAN TULANGAN GESER MINIMUM

Tata cara ACI 318M-99 (1999) mensyaratkan rasio tulangan geser minimum yang diijinkan untuk balok beton bertulang sebagai berikut:

$$f'_c \leq 69 \text{ MPa}, \rho_{v(\min)} = \frac{0,345}{f_y} \quad (1a)$$

$$f'_c > 69 \text{ MPa}, \rho_{v(\min)} = \frac{1}{3f_y} \times \frac{f'_c}{35} = 0,01 \frac{f'_c}{f_y} \leq \frac{1}{f_y} \quad (1b)$$

Karena nilai $\sqrt{f'_c}$ yang digunakan dalam perhitungan kuat geser beton V_c dibatasi hanya sampai 8,3 MPa dalam menghasilkan Persamaan(1a), maka perancangan geser tidak berlaku untuk kuat tekan beton lebih besar dari 69 MPa, kecuali bila disediakan tulangan geser minimum yang lebih besar seperti dalam Persamaan (1b).

Karena tegangan retak dalam beton tergantung pada kuat tekan beton f'_c , tata cara ACI 318M-02⁵ memperkenalkan Persamaan (2) sebagai pengganti Persamaan (1a) untuk memasukkan pengaruh kuat tekan beton.

$$\rho_{v(\min)} = 0,0625\sqrt{f'_c}/f_y \quad (2)$$

tetapi nilainya tidak boleh kurang dari 0,345 MPa seperti diberikan dalam Persamaan (1a).

Tata cara CSA A23.3-94 (1994) mensyaratkan rasio tulangan geser minimum sebagai berikut :

$$\rho_{v(\min)} = 0,06\sqrt{f'_c}/f_y \quad (3)$$

Pada tahun 1994, AASHTO-94 (1994) memperkenalkan edisi pertama Spesifikasi LRFD, dimana persamaan tulangan geser minimum diberikan oleh:

$$\rho_{v(\min)} = 0,083\sqrt{f'_c}/f_y \quad (4)$$

Persamaan AASHTO (1994) ini mirip dengan persamaan CSA (1994), akan tetapi perumusan AASHTO memerlukan tulangan 38% lebih besar untuk kuat tekan beton yang sama. Persamaan tersebut tetap sama untuk edisi kedua tahun 1998. Sebagai tambahan persyaratan jumlah minimum tersebut, tata cara ACI 318M-02 (2002) membatasi spasi tulangan geser sampai $d/2$, sementara batasan-batasan CSA A23.3-94 (1994) dan AASHTO-94 (1994) berturut-turut sebesar $0,7d$ dan $0,8d_v$. Namun dari ketiga tata cara tersebut tidak boleh melampaui 600 mm. Batasan-batasan ini didasarkan pada eksperimen pada balok-balok beton mutu normal. Kesesuaian batasan-batasan ini untuk beton mutu tinggi belum diinvestigasi secara mendalam.

Untuk mencegah kegagalan getas pada saat terjadinya retak diagonal pertama, Ozcebe dkk (1999) mengusulkan agar kuat geser ultimat balok dengan tulangan geser harus lebih besar dari kuat geser retak diagonal beton, yaitu :

$$V_u > V_{cr} \quad (5)$$

$$(V_s + V_c) > V_{cr} \quad (6)$$

Untuk mencapai keamanan yang cukup, V_{cr} diasumsikan sebesar $1,3V_c$, dan V_s dinyatakan sebagai $A_v f_y d/s$, Persamaan (7) dapat ditulis ulang sebagai:

$$\rho_{v(\min)} = 0,3 \frac{V_c}{b_w d f_y} \quad (7)$$

Persamaan (7) adalah rasio tulangan geser minimum yang diperlukan. V_c dapat diperoleh dari tata cara ACI 318M-02 (2002).

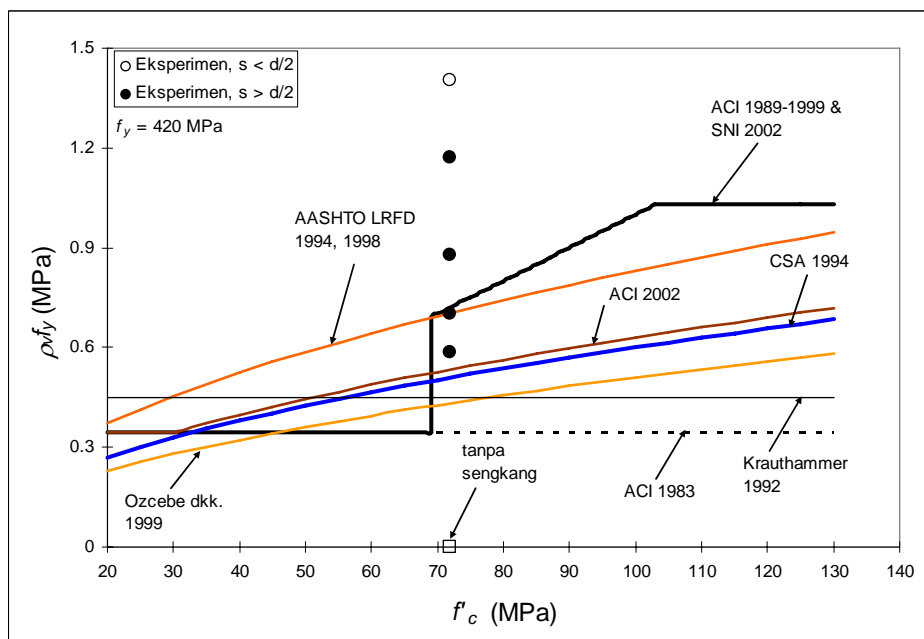
$$V_c = \left(0,16\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (8)$$

atau dengan persamaan sederhananya

$$V_c = 0,17\sqrt{f'_c} b_w d \quad (9)$$

Sedangkan Krauthammer (1999) mengusulkan persamaan yang sederhana seperti dalam tata cara ACI 318M-99 (1999), tetapi dengan koefisien yang lebih tinggi. Rasio tulangan geser minimumnya diberikan oleh:

$$\rho_{v(\min)} = \frac{0,45}{f_y} \quad (10)$$



Gambar 1. Perbandingan persyaratan tulangan geser minimum dalam berbagai tata cara dan usulan peneliti serta hasil eksperimen

Gambar 1 menunjukkan tujuh persyaratan tulangan geser minimum yang diperoleh dari Persamaan (1) sampai (10). Dalam perbandingan ini, tegangan leleh tulangan geser diasumsikan sebesar $f_y = 420$ MPa. Persamaan (1) sampai (10) tidak memperhitungkan pengaruh rasio tulangan longitudinal dan rasio bentang geser (a/d). Kurva ACI 1989-1999 didasarkan pada asumsi bahwa nilai $\sqrt{f'_c}$ diperkenankan melebihi 8,3 MPa dalam perhitungan V_c . Gambar tersebut jelas memperlihatkan adanya perubahan yang mendadak dalam persyaratan ACI 1989-1999 pada kuat tekan beton 69 MPa. Di bawah kekuatan ini, persyaratan AASHTO adalah yang paling konservatif, kecuali untuk mutu di bawah 30 MPa usulan Krauthammer adalah yang paling konservatif. Sebagai contoh pada mutu beton 65 MPa, AASHTO mensyaratkan $\rho_v f_y$ sebesar 0,67 MPa, dimana sekitar 94% lebih besar dari persyaratan ACI 1989-1999 dan SNI 2002¹¹ sebesar 0,345 MPa, sekitar 38% lebih besar dari persyaratan CSA A23.3 sebesar 0,484 MPa, dan sekitar 31% lebih besar dari persyaratan ACI 2002 sebesar 0,51 MPa; serta sekitar 63% dan 49% lebih besar dari hasil usulan Ozcebe dkk. dan Krauthammer, masing-masing sebesar 0,41 dan 0,45 MPa. Pada kuat tekan 100 MPa,

AASHTO mensyaratkan 0,83 MPa, dimana sekitar 17% lebih kecil dari persyaratan ACI 1989-1999 sebesar 1,0 MPa, sekitar 38% lebih besar dari persyaratan CSA A23.3 sebesar 0,60 MPa, dan sekitar 63% dan 84% lebih besar dari usulan Ozcebe dkk. dan Krauthammer, masing-masing sebesar 0,51 dan 0,45 MPa. Perbedaan yang paling mencolok antara persyaratan tata cara serta usulan peneliti adalah pada mutu beton antara 65 dan 75 MPa.

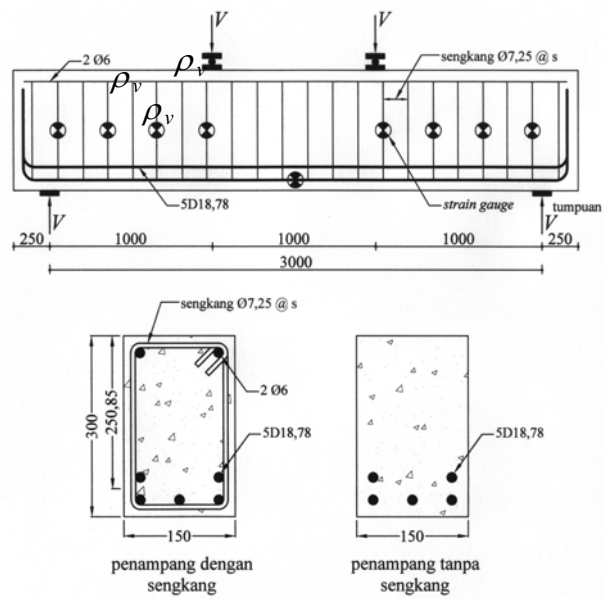
Studi yang paling relevan untuk kuat tekan beton mendekati 65 MPa adalah oleh Yoon, Cook, dan Mitchell (1996), yang telah melaporkan 12 hasil pengujian pada benda uji beton dengan kuat tekan sebesar 36, 67, dan 87 MPa serta menggunakan tulangan geser minimum sesuai dengan ACI 318-83, CSA A23.3-94, dan ACI 318-89. Mereka menyimpulkan bahwa persyaratan tata cara CSA A23.3-94 mencukupi untuk beton mutu tinggi, sementara itu tidak mencukupi untuk ACI 318-83. Ketentuan ACI 318-89 juga didapati tidak mencukupi untuk benda uji dengan kuat tekan 67 MPa. Pengujian oleh Ozcebe, Ersoy, dan Tankut (1999), terutama pada beton dengan kuat tekan 75 MPa dan analisis mereka terhadap hasil eksperimen sebelumnya menunjukkan bahwa ketentuan ACI 318-83 tidak mencukupi untuk beton mutu tinggi.

Makalah ini memfokuskan pada studi mengenai perilaku geser balok beton bertulang mutu tinggi dengan kuat tekan 70 MPa dan hampir seluruh balok mempunyai spasi tulangan geser lebih besar dari $d/2$, melebihi persyaratan yang ditetapkan oleh SNI 2002; ACI 1989-1999; dan ACI 2002, melalui serangkaian pengujian eksperimental.

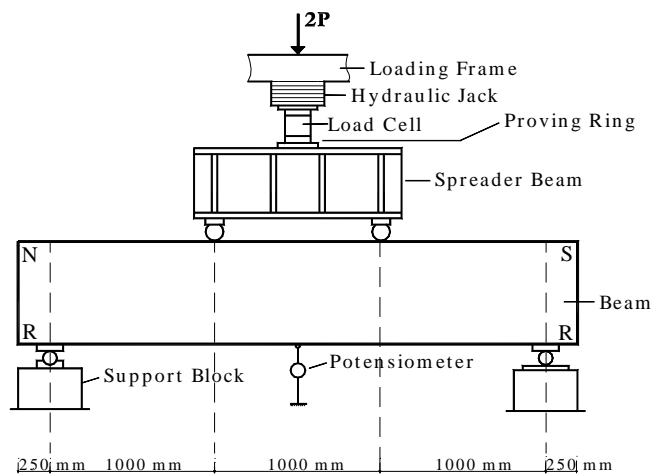
3. RANCANGAN EKSPERIMEN

Rancangan eksperimen terdiri dari lima tipe balok beton mutu tinggi bertulangan tunggal bersengkang dan sebuah tipe balok tanpa sengkang. Masing-masing tipe balok dibuat rangkap dua, sehingga secara keseluruhan ada 12 balok. Balok-balok tersebut dibebani oleh dua buah beban titik. Gambar 2 dan 3 menunjukkan detail penampang dan rangkaian peralatan pengujian balok. Tabel 1 menunjukkan nilai kuat geser yang diperoleh dari hasil uji balok dengan variasi tulangan geser minimum dan rasio tulangan longitudinal konstan sebesar 3,68%.

Ukuran seluruh balok adalah sama, $150 \times 300 \times 3500$ mm. Semua balok diuji dengan rasio bentang geser terhadap tinggi efektif balok, $a/d = 4$. Dua buah balok pertama hanya dipasang tulangan longitudinal saja (TS), sedangkan sepuluh balok lainnya dipasang baik tulangan longitudinal dan transversal. Spasi sengkang balok dibuat bervariasi, yaitu 300, 250, 200, 150, dan 125 mm. Delapan buah spesimen dipasang spasi sengkang lebih besar dari $d/2 = 125,4$ mm. Semua benda uji dirancang dengan rasio tulangan geser yang tinggi, sangat aman menurut tata cara ACI 2002 dan CSA A23.3-94, tetapi tidak aman menurut persyaratan ACI 1989-1999 dan AASHTO-94. Semua balok uji dirancang mengalami kegagalan geser mendahului kegagalan lenturnya dengan cara memastikan bahwa kecukupan tulangan longitudinal sehingga kuat lenturnya lebih besar dari kuat gesernya.



Gambar 2. Detail penampang benda uji balok



Gambar 3. Rangkaian peralatan pengujian kuat geser balok

Tabel 1. Detail benda uji dan hasil eksperimen

Type Balok	S (mm)	ρ_v	$\rho_f f_y$	V_{cr} (kN)	V_u (kN)	V_u / V_{cr}
TS	?	0	0	64.4	81.90	1.27
S-300	300	0.00183	0.584	65.8	101.30	1.54
S-250	250	0.00220	0.702	73.05	105.05	1.44
S-200	200	0.00275	0.878	80.45	129.65	1.61
S-150	150	0.00367	1.172	85.90	126.90	1.48
S-125	125	0.00440	1.405	91.20	127.55	1.40

4. MATERIAL DAN PENGUJIAN EKSPERIMEN

Dari hasil uji tarik tulangan diketahui bahwa tulangan tarik longitudinal mempunyai tegangan dan regangan leleh masing-masing sebesar 363 MPa dan 0,00183. Modulus elastisitasnya sebesar 198.380 MPa. Sedangkan tulangan geser mempunyai tegangan dan regangan leleh masing-masing sebesar 319,3 MPa dan 0,00161. Modulus elastisitas bajanya sebesar 198.650 MPa. Semua balok uji diberi tulangan ulir longitudinal sebanyak lima buah. Diameter tulangan ulir longitudinal tersebut adalah 18,78 mm, sedangkan sengkangnya merupakan baja polos berdiameter 7,25 mm. Kupon tulangan baja tersebut diuji sesuai dengan ASTM A615 dengan memakai alat uji *Universal Testing Machine Digital* berkapasitas 100 ton. Uji modulus elastisitas baja dilakukan memakai ekstensiometer yang dilekatkan di tengah-tengah baja tulangan.

Dalam penelitian ini digunakan semen tipe I, dengan komposisi campuran beton per m³ untuk kuat tekan rencana sebesar 70 MPa seperti ditunjukkan dalam Tabel 2. Setiap pengecoran balok disertai dengan pembuatan benda uji silinder 15 × 30 cm sebanyak empat buah tiap benda uji balok sesuai pedoman ASTM C39-94. Pengujian benda uji silinder dilakukan bersamaan dengan pengujian balok pada umur sekitar 28 hari. Rancangan pengujian eksperimen diperlihatkan dalam Gambar 3. Untuk pengujian benda uji silinder digunakan alat uji *Universal Testing Machine Analog* berkapasitas 200 ton. Dari hasil pengujian benda uji silinder, diperoleh kuat tekan beton rata-rata sebesar 71,93 MPa.

Tabel 2. Komposisi campuran beton 70 Mpa

Bahan	Satuan	70 MPa
Semen	kg/m ³	561
Fly Ash	kg/m ³	89
Silica Fume	kg/m ³	10
15 mm Agregat kasar	kg	1001
Agregat halus	kg	613
Air	kg/m ³	185
W/C		0.28
Retarder	l/m ³	1.68
Superplasticizer	l/m ³	5.61

Pembebanan balok uji dilaksanakan dengan memakai alat uji *Bending Testing Machine* berkapasitas 100 ton sesuai dengan ASTM C78-94 dan pembacaan bebannya melalui *load cell* berkapasitas 60 ton. Balok dibebani sampai terjadi kegagalan geser dengan cara meningkatkan beban *P* secara bertahap menggunakan sistem pembebanan monotonik. Pada setiap kenaikan beban 10 kN, retak yang terjadi diamati dan ditandai. Setelah mendekati beban maksimum, interval pembebanan diturunkan menjadi 2,5 atau 5 kN.

Sepuluh buah *strain gauge* dipasang pada tulangan untuk masing-masing balok, kecuali balok TS dimana hanya dipasang dua buah pada tulangan longitudinal yang ditempatkan di tengah-tengah panjang tulangan. Untuk balok bersengkang, dua buah *strain gauge* dipasang pada tulangan longitudinal yang ditempatkan di tengah-tengah panjang tulangan, sedangkan sisanya ditempelkan pada kaki vertikal sengkang seperti dalam Gambar 2. Fungsi *strain gauge* tersebut adalah untuk mengetahui besarnya kontribusi kuat geser yang disumbangkan oleh sengkang dan beton melalui bacaan regangan *strain gauge*. Alat pembaca regangan yang digunakan adalah *Multipoint Measuring Unit (UPM) 100*. Alat ini kemudian

dihubungkan ke data akuisisi *Hottinger Baldwin Messtechnik* (HBM) yang selanjutnya dihubungkan ke komputer lengkap dengan *software* untuk merekam secara otomatis data yang dibaca.

5. HASIL EKSPERIMEN

Tabel 1 menyajikan kuat geser beton akibat retak miring diagonal dan kuat geser ultimat hasil eksperimen.

5.1. Kuat Geser Beton

Kuat geser beton, V_{cr} , adalah kuat geser yang diakibatkan oleh retak miring diagonal pada saat terjadi pertama kalinya atau retak miring yang terjadi setelah melewati setengah tinggi balok. Untuk memperoleh gaya geser beton akibat retak miring dapat dilakukan dengan: (1) melalui pengamatan visual langsung pada saat retak miring mendekati setengah tinggi penampang balok, (2) pembacaan *strain gauge* yang dilekatkan pada kaki sengkang, dan (3) pembacaan *displacement gauge* yang ditempelkan di permukaan balok beton pada daerah bentang geser. Dalam studi ini pembacaan dilakukan melalui *strain gauge* yang dipasang di kaki sengkang dan dilakukan pengamatan visual langsung pada saat pengujian berlangsung. Hasil pengamatan visual menunjukkan kemiripan dengan hasil pembacaan *strain gauge*. Jika regangan pada *strain gauge* telah diketahui, maka gaya yang bekerja pada sengkang dapat dihitung dengan cara mengalikan regangan dengan luas penampang sengkang dan modulus elastisitas baja ($V_s = A_v \epsilon_s E_s$). Gaya yang ditahan oleh beton V_{cr} merupakan hasil pengurangan gaya geser ultimat dengan gaya geser baja sengkang, $V_{cr} = V_u - V_s$.

5.2. Pola Retak Balok

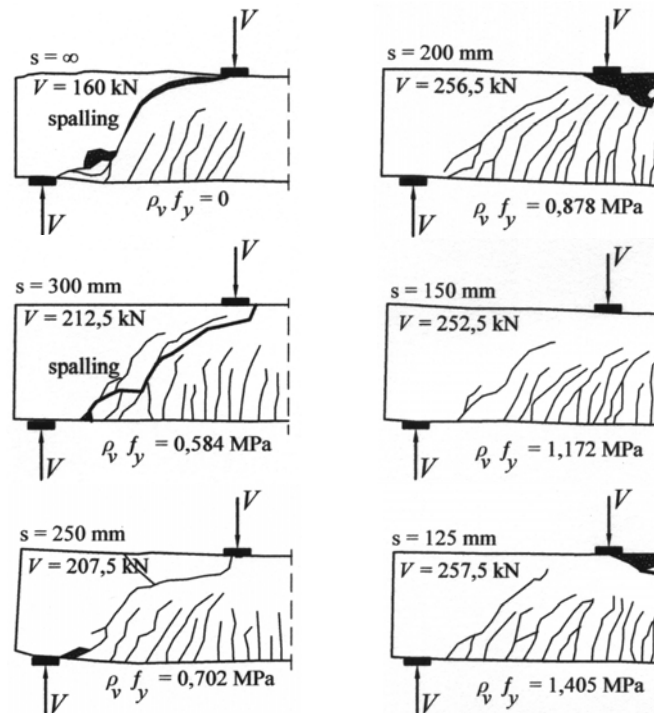
Hasil pengujian dalam Gambar 4 menunjukkan bahwa semua tipe balok mengalami keruntuhan getas, kecuali balok dengan spasi sengkang 125 dan 150 mm mengalami keruntuhan daktail yang diawali dengan pelelehan tulangan lentur. Keruntuhan jenis ini akan memberikan peringatan yang cukup sebelum balok mengalami keruntuhan yang ditandai oleh peningkatan lendutan yang berlebihan (22 sampai 67 mm).

Pada dasarnya keretakan semua balok dalam eksperimen ini diawali dengan terjadinya retak vertikal di daerah tarik pada bagian bawah balok yang dikenal sebagai retak lentur. Akan tetapi, perubahan pola retak terjadi setelah pembebanan meningkat. Salah satu perubahan pola retak tersebut adalah dengan terjadinya retak geser-lentur. Balok-balok yang mengalami retak geser-lentur adalah balok dengan spasi sengkang $0,5d$; $0,6d$, dan $0,8d$. Semua balok ini mengalami *spalling* di daerah bentang lentur setelah mencapai beban ultimatnya.

Selama ini anggapan umum yang dianut ialah bahwa sengkang akan mulai memikul geser jika retak miring sudah mendekati setengah tinggi penampang beton yang ditandai dengan terjadinya retak diagonal. Akan tetapi, dari hasil penelitian ini tampak bahwa sebenarnya sengkang sudah mulai bekerja, yang ditandai dengan adanya reaksi pada saat dimulainya pembebanan; atau dengan kata lain sengkang sudah mulai efektif bekerja memikul geser, meskipun retak miring belum terjadi pada setengah tinggi penampang beton. Hal ini mirip dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Pendyala dan Mendis.¹³ Balok-balok yang mengalami retak tarik diagonal adalah balok dengan spasi sengkang sebesar d dan $1,2d$.

Gambar 4 memperlihatkan mekanisme keruntuhan geser yang terjadi untuk semua balok uji. Pola retak geser yang ditunjukkan pada gambar di atas, hanya pada setengah

bentang balok di bagian sisi kanan saja. Hal ini dikarenakan bentang balok sisi kirinya mempunyai mekanisme keruntuhan yang mirip dengan sisi kanan balok serta untuk memudahkan pembacaan gambar.



Gambar 4. Mekanisme keruntuhan geser pada balok uji setelah beban ultimat

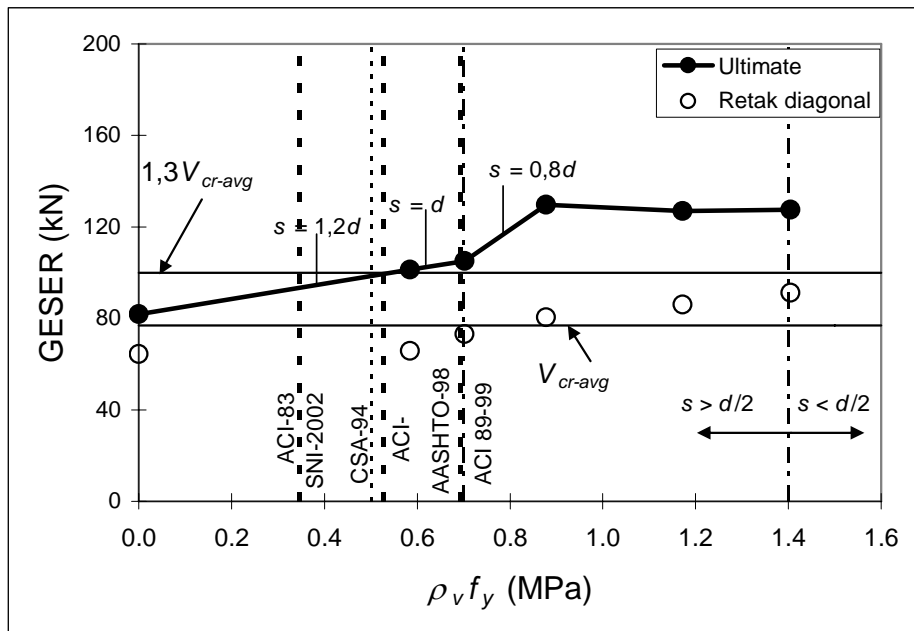
Benda uji dengan rasio tulangan geser yang tinggi (misalnya balok dengan spasi $0,5d$, $0,6d$ dan $0,8d$) tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap pola retak miring yang terjadi ($\rho_v f_y = 1,41 \text{ MPa}$; $1,17 \text{ MPa}$; dan $0,88 \text{ MPa}$), namun hanya menunjukkan peningkatan retak-retak rambut sepanjang bentang geser. Hal ini dikarenakan rasio tulangan longitudinal yang digunakan cukup tinggi ($\rho_l = 3,68\%$). Sementara itu, balok dengan spasi d dan $1,2d$ menunjukkan pola retak miring diagonal yang memotong setengah tinggi balok. Hal ini menggambarkan pola keruntuhan yang mirip dengan balok tanpa tulangan geser.

5.3. Kuat Cadangan Setelah Retak

Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara gaya geser ultimat dan gaya geser diagonal beton hasil pengujian terhadap jumlah tulangan geser nominal, $\rho_v f_y$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan spasi sengkang lebih besar dari $d/2$ mengakibatkan peningkatan kuat geser ultimat yang cukup signifikan, berkisar 24% sampai 58%. Akan tetapi, peningkatan kuat geser ultimat tersebut tidak konsisten, karena pada balok dengan spasi sengkang 200 mm lebih efektif dari pada balok dengan spasi 150 dan 125 mm. Hal ini sama dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Rahal dan Shaleh (2002, 2004), bahwa balok dengan spasi sengkang lebih besar dari $d/2$ menunjukkan peningkatan kuat geser ultimat tidak konsisten dan sebaliknya.

Berbeda halnya dengan gaya geser pada saat retak tarik diagonal, V_{cr} menunjukkan peningkatan kuat geser yang konsisten untuk semua balok dengan spasi sengkang lebih besar dari $d/2$. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kuat geser beton seiring dengan peningkatan rasio tulangan geser atau pengurangan spasi sengkang.

Dari Gambar 1 terlihat bahwa tata cara ACI 2002 dan CSA 1994 memberikan prediksi yang paling baik dibandingkan dengan tata cara lainnya ataupun perumusan oleh para peneliti yang ditinjau, disamping cukup konservatif pada beberapa tipe balok yang ditinjau. Tabel 3 menunjukkan perbandingan antara kuat geser hasil pengujian dengan kuat geser hasil prediksi perumusan ACI 2002 dan CSA A23.3-94.



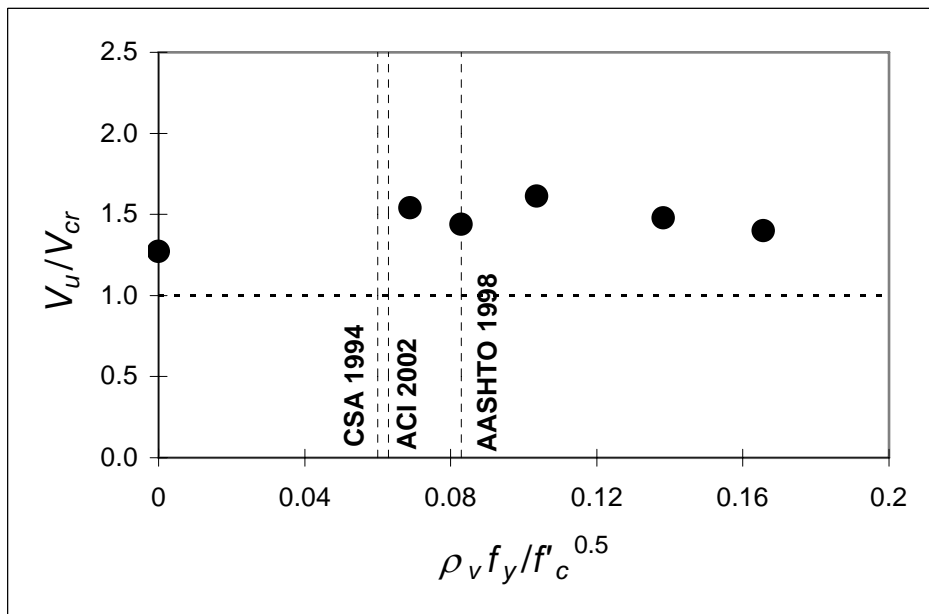
Gambar 5. Kuat cadangan balok beton setelah retak

Tabel 3. Perbandingan kuat geser hasil pengujian terhadap kuat geser perumusan ACI 2002 dan CSA A23.3-94

Tipe Balok	Eksperimental			Perbandingan									
				ACI 2002					CSA 1994				
	V_{cr}	V_u	V_u/V_{cr}	V_c	V_n	V_{cr}/V_c	V_u/V_c	V_u/V_n	V_c	V_n	V_{cr}/V_c	V_u/V_c	V_u/V_n
TS	64.40	81.90	1.27	56.90	56.90	1.13	1.44	1.44	51.50	51.50	1.25	1.59	1.59
S-300	65.80	101.30	1.54	56.90	78.90	1.16	1.78	1.28	51.50	79.90	1.28	1.97	1.27
S-250	73.05	105.05	1.44	56.90	83.40	1.28	1.85	1.26	51.50	85.50	1.42	2.04	1.23
S-200	80.45	129.65	1.61	56.90	90.00	1.41	2.28	1.44	51.50	94.00	1.56	2.52	1.38
S-150	85.90	126.90	1.48	56.90	101.00	1.51	2.23	1.26	51.50	108.20	1.67	2.46	1.17
S-125	91.20	127.55	1.40	56.90	109.80	1.60	2.24	1.16	51.50	119.50	1.77	2.48	1.07

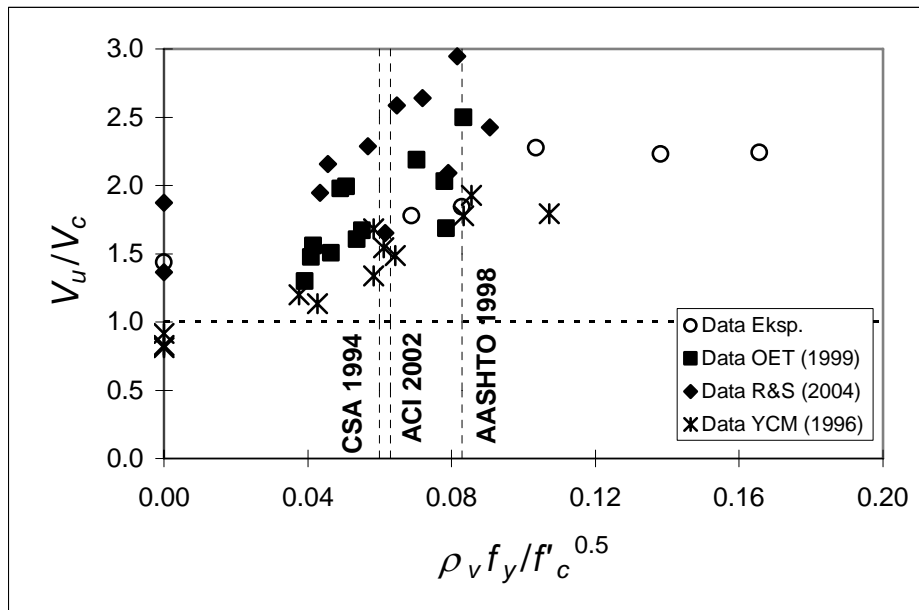
Rasio kuat geser ultimat terhadap kuat geser diagonal hasil pengujian ditunjukkan dalam Tabel 3. Rasio ini dapat digunakan untuk mengukur kuat cadangan setelah melewati retak diagonal pertama. Seperti yang dilihat dalam Tabel 3 tersebut, bahwa hampir seluruh balok yang didisain dengan spasi tulangan geser lebih besar dari $d/2$, melebihi persyaratan yang ditetapkan oleh SNI 2002; ACI 1989-1999; dan ACI 2002 memiliki kuat cadangan geser sebesar 40% atau lebih.

Gambar 6 menunjukkan hubungan V_u/V_{cr} dengan Indeks Tulangan Geser, $R = \rho_v f_y / \sqrt{f'_c}$. Dari gambar tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa hasil pengujian kuat cadangan geser tidak signifikan dipengaruhi oleh peningkatan R , karena dari gambar tersebut jelas menunjukkan bahwa pada saat R meningkat, nilai V_u/V_{cr} tidak menunjukkan peningkatan yang konsisten. Sebaliknya perbandingan kapasitas geser ultimat hasil eksperimen (termasuk hasil pengujian beberapa peneliti terdahulu) dengan kuat geser beton berdasarkan peraturan ACI 318-2002, menunjukkan bahwa adanya peningkatan kuat cadangan, V_u/V_c seiring dengan peningkatan Indeks Tulangan Geser (R). Hal ini berarti bahwa persamaan kapasitas geser beton menurut ACI 318-2002 masih konservatif dalam perancangan geser balok beton mutu tinggi dengan tulangan geser.



Gambar 6. Hubungan V_u/V_{cr} dengan R

Hasil prediksi kuat geser menurut tata cara ACI dan CSA dalam Tabel 3 cukup konservatif untuk semua balok uji yang ditinjau. Untuk tata cara ACI, rasio yang tertinggi mencapai 2,28 untuk balok S-200, sedangkan untuk tata cara CSA mencapai 2,52 pada balok yang sama. Sedangkan, rasio minimum kuat geser hasil pengujian terhadap kuat geser tata cara adalah masing-masing 1,78 untuk ACI 2002, dan 1,97 untuk CSA A23.3-94, diperlihatkan pada gambar 7.



Keterangan :

- YCM = Yoon, Cook dan Mitchell
- OET = Ozcebe, Ersoy dan Tankut
- R&S = Rahal dan Shaleh

Gambar 7. Hubungan V_u/V_c dengan R .

6. KESIMPULAN

Studi ini dilakukan untuk mengkaji persyaratan-persyaratan tata cara yang ada untuk tulangan geser minimum pada balok beton mutu tinggi dengan kuat tekan 70 MPa. Perbandingan dengan hasil pengujian eksperimen memberikan kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Persamaan kuat geser dalam tata cara ACI dan CSA saat ini konservatif;
- 2) Balok-balok uji yang dirancang memenuhi rasio tulangan geser minimum tata cara tidak menunjukkan terjadinya retak diagonal pada saat beban layan;
- 3) Tidak ada bukti yang menunjukkan bahwa balok yang dirancang dengan spasi sengkang maksimum sebesar $d/2$ (ACI) berperilaku lebih baik secara geser dibandingkan dengan balok yang dirancang dengan spasi sengkang maksimum sebesar $0,7d$ (CSA);
- 4) Pengujian lebih lanjut diperlukan untuk memastikan batasan tata cara ACI dan CSA yang rendah tersebut apakah masih cukup konservatif untuk balok-balok yang dikenai momen lentur yang besar.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318, 1999, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318M-99), American Concrete Institute, Detroit.
- ACI Committee 318, 2002, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318M-02), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

- American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications and Commentary*, SI Units, First Edition, Washington D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, 1998, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications and Commentary*, SI Units, Second Edition, Washington D.C.
- Collins, M. P.; Mitchell, D.; dan MacGregor, J. G., 1993, Structural Design Consideration for High Strength Concrete, *Concrete International*, V. 15, No. 5, Mei, hal. 27-34.
- CSA Standard A23.3-94, 1994, *Design of Concrete Structures*, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada.
- Johnson, M. K.; dan Ramirez, J. A., 1989, Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, V. 86, No. 4, Juli-Agu., hal. 376-382.
- Krauthammer, T., 1999, Minimum Shear Reinforcement Based on Interface Shear Transfer, *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 1, Jan.-Peb., hal. 99-105.
- Ozcebe, G.; Ersoy, U.; dan Tankut, T., 1999, Evaluation of Minimum Shear Reinforcement Requirements for Higher Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 3, Mei-Juni, hal. 361-368.
- Pendyala, R.S. dan Mendis, P., 2000, Experimental Study on Shear Strength of High Strength Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, V. 97, No. 4, Juli - Agu., hal. 564-571.
- Rahal, K.N. dan Al-Shaleh, K.S., 2002, Shear Test on High Strength Concrete Beams with Low Transverse Reinforcement, *Proceedings of the International Conference on Advancement in Design, Construction, Construction Management and Maintenance of Building Structures*, Bali, Indonesia, 27-28 Maret, hal. I.234-I.240.
- Rahal, K.N. dan Al-Shaleh, K.S., 2004, Minimum Transverse Reinforcement in 65 MPa Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 6, Nop. - Des., hal. 872-878.
- SNI 03-2847-02, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Standar Nasional Indonesia, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, 278 hal.
- Wang, C. K.; dan Salmon, C. G., 1998, *Reinforced Concrete Design*, Addison Wesley, edisi ke-6.
- Yoon, Y.S.; Cook, W.D.; dan Mitchell, D., 1996, Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium, and High-Strength concrete Beams, *ACI Structural journal*, V. 93, No. 5, Sept.-Oct., hal. 576-584.