

## PREDIKSI KEKUATAN GESER BETON PADA BALOK BETON BERTULANG TANPA TULANGAN GESER

Luciana Buarlele, Benny Kusuma, dan Jonie Tanijaya

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus

Jl. Perintis Kemerdekaan KM-13, Daya - Makassar

e-mail: luciana.buarlele@gmail.com, kusumab06@yahoo.com, jonie.tanijaya@gmail.com

**Abstrak:** Keruntuhan geser pada balok beton bertulang tanpa tulangan geser merupakan keruntuhan yang sangat getas. Sejumlah besar penelitian eksperimental mengenai keruntuhan geser balok beton bertulang menunjukkan fakta bahwa kegagalan geser balok merupakan proses yang kompleks dan adalah efek dari berbagai parameter yang memberikan pengaruh signifikan, diantaranya kuat tekan beton ( $f'_c$ ), rasio bentang geser-tinggi efektif ( $a/d$ ), rasio tulangan longitudinal ( $\rho$ ), dan tinggi efektif penampang ( $d$ ). Oleh karena itu, upaya untuk memperoleh model prediksi yang mampu memberikan hasil yang paling mendekati mekanisme geser menjadi daya tarik kuat bagi para peneliti. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan enam perumusan geser berdasarkan ACI 318, EC2, CSA A23.3, BS 8110, NZS 3101, dan CEB-FIP dengan data eksperimen kuat geser beton yang diperoleh dari literatur; mengusulkan suatu persamaan desain untuk memprediksi kekuatan geser beton ( $V_c$ ) balok beton bertulang tanpa tulangan geser; serta merekomendasikan model usulan sebagai salah satu alternatif perhitungan geser bagi praktisi desain selain perumusan geser berdasarkan standar. Persamaan yang diusulkan berasal dari hasil analisis regresi dengan menggunakan 276 data hasil uji geser balok yang dikumpulkan dari 20 sumber dengan berbagai variabel yang mempengaruhi kekuatan geser. Kekuatan geser beton hasil eksperimen sebelumnya dibandingkan dengan model usulan dan ke-enam perumusan geser beton tersebut diatas. Hasil evaluasi ke-enam standar menunjukkan bahwa standar beton menurut CEB-FIP dan BS 8110 menunjukkan hasil prediksi yang lebih baik dan konservatif terhadap hasil tes daripada standar ACI 318-14, NZS 3101, CSA A23.3, dan EC2. Perumusan geser berdasarkan ACI 318-14, CEB-FIP dan BS 8110 menghasilkan prediksi kekuatan geser beton cenderung aman dibandingkan ke-tiga standar beton lainnya (NZS 3101, CSA A23.3, dan EC2). Dari hasil analisis, diusulkan dua persamaan kekuatan geser beton balok bentang pendek dan panjang tanpa tulangan geser yang dibatasi dengan rasio kelangsingan balok,  $a/d \geq 2,5$  dan  $1,5 \leq a/d < 2,5$ . Model usulan cukup akurat (*applicable*) memprediksi gaya geser beton  $V_c$  balok beton bertulang bentang pendek maupun panjang tanpa tulangan geser pada rentang variabel yang dipertimbangkan dalam penelitian ini.

**Kata kunci:** ACI 318; EC2; CSA A23.3; BS 8110; NZS 3101; CEB-FIP; kekuatan geser beton

### PENDAHULUAN

Perilaku geser pada balok beton bertulang sangat kompleks, dimana mekanisme yang betul dari pembentukan retak miring akibat geser yang tinggi sangat sukar untuk ditetapkan. Hal ini dikarenakan banyak faktor atau parameter yang mempengaruhi kekuatan geser (ACI-ASCE-445, 1999). Untuk balok persegi tanpa penulangan geser, setelah terbentuknya retak miring, transfer dari geser merupakan kombinasi dari berbagai mekanisme sebagai berikut : perlawanan geser daerah tekan dari beton yang belum retak, gaya ikat (*interlock*) antara agregat atau transfer geser antara permukaan, aksi pasak (*dowel action*) sebagai perlawanan dari penulangan longitudinal terhadap gaya transversal, dan aksi pelengkung (*arch action*) pada balok yang relatif tinggi

(Hassoun dan Al-Manaseer, 2015). Beberapa studi teoritis dan eksperimental (Bresler dan Scordelis, 1963; Zsutty, 1968; Angelakos dkk., 2001) telah dilakukan untuk menganalisis fenomena keruntuhan geser balok beton bertulang. Kegagalan geser balok beton bertulang adalah karena aksi gabungan dari geser dan lentur. Karena adanya geser, kekuatan lentur balok mungkin sangat berkurang sehubungan dengan kasus lentur murni, sehingga kegagalan geser yang bersifat getas (*brittle*) tidak dapat dihindari. Karena sifat keruntuhan yang getas tidak memberikan tanda-tanda atau peringatan awal misalnya lendutan (Fenwick dan Paulay, 1968).

Balok beton bertulang bentang geser pendek (*short shear spans*) dapat didefinisikan sebagai balok dengan rasio bentang geser-tinggi efektif

( $a/d$ ) dari 1 hingga 2,5, sedangkan balok beton bertulang bentang geser panjang (*slender shear spans*) didefinisikan sebagai balok dengan rasio  $a/d$  sama dengan atau lebih besar dari 2,5 (Wight, 2016). Pada saat ini perhitungan geser yang terdapat pada hampir semua peraturan beton lebih banyak memakai perumusan yang diturunkan secara empiris. Perumusan empiris yang digunakan oleh masing-masing peraturan beton berbeda antara satu dengan yang lainnya. Masing-masing peraturan beton mengadopsi parameter-parameter yang mempengaruhi kekuatan geser beton yang sangat terbatas, berbeda satu sama lainnya. Sebagai akibatnya timbul ketidak-seragaman dalam memprediksi kapasitas geser (Reineck dkk., 2003, 2014; Elsanadedy, 2016).

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi dan membandingkan keenam perumusan geser berdasarkan ACI 318, EC2, CSA A23.3, BS 8110, NZS 3101, dan CEB-FIP dengan data eksperimen sebelumnya yang berasal dari 20 sumber yang diperoleh dari literatur; dan mengusulkan suatu persamaan desain untuk memprediksi kekuatan geser beton ( $V_c$ ) balok beton bertulang tanpa tulangan geser; serta merekomendasikan model usulan sebagai salah satu alternatif perhitungan geser bagi praktisi desain selain perumusan geser berdasarkan standar/code. Model usulan diturunkan berdasarkan pendekatan analisis regresi terhadap 276 data hasil eksperimen balok persegi tanpa tulangan geser yang mengalami runtuh geser. Persamaan usulan memperhitungkan kekuatan tekan beton sampai dengan 194 MPa, rasio tulangan longitudinal antara 0,1 dan 6,6%, rasio bentang geser-tinggi efektif antara 1,5 dan 7, dan tinggi efektif penampang hingga 1067 mm. Untuk menguji kinerja dari persamaan yang diusulkan, model usulan dibandingkan dengan ke-enam perumusan geser beton tersebut diatas dengan pendekatan analisis statistik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model usulan mempunyai kemampuan prediksi kuat geser beton cukup baik bila dibandingkan dengan ke-enam perumusan geser beton berdasarkan standar.

## PERUMUSAN GESER BERDASARKAN STANDAR BETON

Tabel 1 disajikan perumusan geser berdasarkan ACI 318-14, EC2, CSA A23.3, BS 8110, NZS

3101, dan CEB-FIP yang telah diseleksi. Untuk keperluan perbandingan, semua faktor keamanan (faktor reduksi penampang dan faktor beban) diambil sama dengan 1,0. Perhatikan Tabel 1, dimana persamaan desain yang disediakan oleh peraturan beton saat ini menunjukkan bahwa setiap perumusan geser mengadopsi parameter yang berbeda secara signifikan dengan keterbatasannya. Tepatnya, peraturan CSA mempertimbangkan pengaruh kekuatan tekan beton saja untuk tinggi efektif,  $d \leq 300$  mm. Sedangkan untuk  $d > 300$  mm, CSA mengadopsi efek ukuran penampang. Sebaliknya peraturan ACI 318-14 dan NZS 3101 mengabaikan pengaruh tinggi efektif penampang. Namun, persamaan yang disediakan oleh EC2 mempertimbangkan pengaruh kekuatan tekan beton, rasio tulangan lentur, dan tinggi efektif penampang. Sementara, peraturan NZS, CSA, EC2, dan BS untuk  $a/d > 2,0$  mengabaikan pengaruh rasio bentang geser-tinggi efektif. Standar beton CEB-FIP90 menyediakan perumusan geser yang paling lengkap, yaitu mempertimbangkan semua parameter yang berpengaruh terhadap kekuatan geser beton, seperti kekuatan tekan beton, rasio tulangan longitudinal, rasio bentang geser-tinggi efektif, dan tinggi efektif penampang.

Perbedaan dalam mempertimbangkan parameter-parameter yang mempengaruhi pada masing-masing peraturan beton diatas, mungkin akan menyebabkan ketidak-seragaman dalam memprediksi kekuatan geser beton. Selain itu, dengan pembatasan yang diberlakukan pada parameter yang mempengaruhi menunjukkan bahwa persamaan desain berdasarkan standar beton yang diturunkan juga berasal dari hasil pengujian dengan kisaran variabel yang terbatas. Sebenarnya kekuatan geser beton nominal,  $V_c$ , menurut ACI 318-14 sering dihitung berdasarkan persamaan sederhana, yaitu  $V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c}b_wd$  (Pers. 22.5.5.1) bukan persamaan yang lebih rinci pada Tabel 1. Hanya dalam penelitian ini digunakan persamaan yang lebih rinci dikarenakan dengan pertimbangan parameter yang diadopsi peraturan tersebut seperti kekuatan tekan beton, rasio tulangan longitudinal, dan rasio  $a/d$  lebih tepat mewakili perilaku geser pada balok tanpa tulangan geser sesuai dengan data eksperimen sebelumnya. Kedua persamaan kuat geser beton nominal

ACI 318-14 tersebut diturunkan berdasarkan hasil pengujian balok beton mutu normal tanpa tulangan geser dengan bentang geser  $a/d \geq 2,5$  yang dikategorikan sebagai balok panjang.

Perumusan kekuatan geser beton nominal menurut standar NZS terbatas pada balok beton dengan rasio  $a/d \geq 2,0$ . Sedangkan perumusan geser berdasarkan BS 8110 menyediakan dua persamaan kuat geser beton dengan batasan rasio  $a/d > 2,0$  dan  $a/d \leq 2,0$ , akan tetapi rasio tulangan tarik dibatasi hanya  $\rho \leq 3,0\%$  saja dan mutu beton  $f'_c \leq 40$  Mpa (lihat Tabel 1). Sementara, EC2 juga membatasi parameter rasio tulangan tarik sebesar  $\rho \leq 2,0\%$ . Sebaliknya perumusan geser berdasarkan CSA tidak mempertimbangkan rasio  $a/d$ , akan tetapi persamaan CSA menyajikan dua persamaan dengan tinggi efektif penampang yang berbeda, yaitu  $d \leq 300$  mm dan  $d > 300$  mm, seperti yang disajikan pada Tabel 1. Peraturan ACI 318-14, NZS 3101, dan CSA A23.3 saat ini

mengasumsikan bahwa kapasitas geser beton nominal pada dasarnya proporsional dengan  $f'_c{}^{0,5}$ , sementara peraturan EC2, BS 8110, dan CEB-FIP90 menyimpulkan bahwa kapasitas geser beton nominal sebanding dengan  $f'_c{}^{1/3}$ .

Persamaan desain dari keenam standar beton tersebut seperti yang dirangkum pada Tabel 1 akan dievaluasi kinerjanya masing-masing terhadap hasil eksperimen balok tanpa tulangan geser dari literatur. Hasil perbandingan tersebut akan diperoleh perumusan geser menurut standar beton yang paling tepat mendekati hasil pengujian sebelumnya. Di samping itu, dari salah satu perumusan geser yang paling diandalkan tersebut akan dijadikan pertimbangan dalam mengusulkan perumusan geser yang lebih mewakili perilaku dari keruntuhan geser dengan bentang geser-tinggi efektif,  $a/d$ , antara 1,5 hingga 7,0.

**Tabel 1.** Persamaan kekuatan retak geser beton nominal berdasarkan standar beton

Standar Beton	Kekuatan Retak Geser Diagonal Beton ( $v_c = V_c/b_wd$ )
ACI 318-14 (2014)	$v_c = \left( 0,16\sqrt{f'_c} + 17\rho \frac{V_u d}{M_u} \right) \leq 0,29\sqrt{f'_c}$
NZS 3101-95 (2005)	$v_c = (0,07 + 10\rho)\sqrt{f'_c} \quad \frac{a}{d} \geq 2,0$
CSA A23.3 (2004)	$v_c = 0,2\sqrt{f'_c} \quad d \leq 300 \text{ mm}$
	$v_c = \left( \frac{260}{1000 + d} \right) \sqrt{f'_c} \geq 0,1\sqrt{f'_c} \quad d > 300 \text{ mm}$
Eurocode 2 (EC2) EN 1992-1-1 (2004)	$v_c = 0,18k(100\rho f'_c)^{1/3} \geq 0,035k^{3/2}\sqrt{f'_c}$ $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0 \quad \rho = A_s/(b_w d) \leq 0,02$
BS 8110 (1997)	$v_c = 0,79(100\rho)^{1/3} \left( \frac{400}{d} \right)^{1/4} \left( \frac{f'_c}{25} \right)^{1/3} \quad \frac{a}{d} > 2,0$
	$v_c = 0,79(100\rho)^{1/3} \left( \frac{400}{d} \right)^{1/4} \left( \frac{f'_c}{25} \right)^{1/3} \left( 2 \frac{d}{a} \right) \quad \frac{a}{d} \leq 2,0$
	$100\rho \leq 3,0\%; \quad \left( \frac{400}{d} \right)^{1/4} \geq 0,67; \quad f'_c \leq 40 \text{ MPa}$
CEB-FIP90 (1993)	$v_c = 0,15 \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100\rho f'_c)^{1/3} \left( \frac{3}{a/d} \right)^{1/3}$

## PERSAMAAN EMPIRIS USULAN

Sebanyak 276 data hasil eksperimen balok beton bertulang tanpa penulangan geser dipilih dari 20 sumber penelitian yang telah dilakukan oleh para ahli yang ada di literatur sebagai berikut: Bresler dan Scordelis (1963); Batchelor dan Kwun (1981); Mphonde dan Frantz (1984); Ahmad dan Lue (1987); Xie dkk. (1994); Yoon dkk. (1996); Pendyala dan Mendis (2000); Kusuma (2001); Rahal dan El-Hawary (2002); Hassan dkk. (2008); Tang dkk. (2009); Tavo (2009); Sudheer dkk. (2010); Munikrishna dkk. (2011); Safan (2012); Shah dan Ahmad (2012); Perera dan Mutsuyoshi (2013); El-Sayed dan Shuraim (2016); Deng dkk. (2017); dan Daluga dkk. (2018), digunakan untuk menurunkan persamaan geser baru, dengan mempertimbangkan variabel-variabel yang bervariasi untuk kuat tekan beton silinder ( $18,6 \leq f'_c \leq 194$  MPa); rasio bentang geser-tinggi efektif ( $1,5 \leq a/d \leq 7$ ); rasio tulangan tarik/lentur ( $0,17 \leq \rho \leq 6,64\%$ ); dan tinggi efektif balok ( $135 \leq d \leq 1067$  mm). Semua benda uji balok hasil eksperimen dari para peneliti tersebut dipilih yang mengalami keruntuhan geser saja.

Persamaan geser usulan Zsutty (1968) hanya berlaku untuk kekuatan geser ultimit dan tidak valid untuk memprediksi kekuatan retak geser beton. Sebaliknya perumusan menurut peraturan ACI 318, hanya berlaku untuk perhitungan kekuatan retak geser beton dan

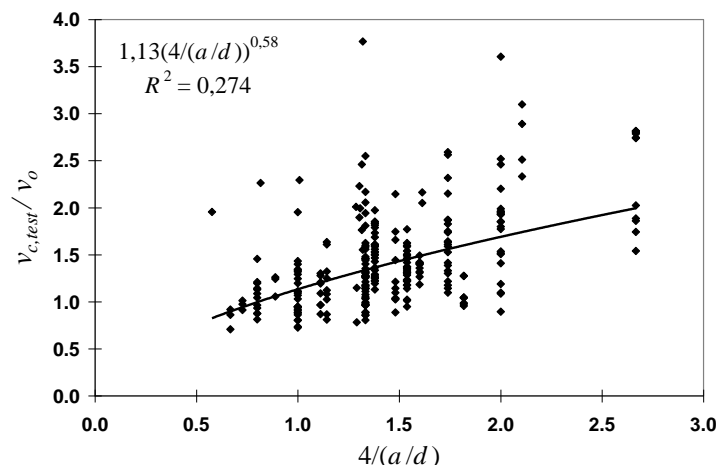
tidak valid untuk kekuatan geser ultimit. Atas dasar pertimbangan tersebut di atas, dan dengan melakukan modifikasi terhadap perumusan geser peraturan BS 8110 dan model prediksi usulan Zsutty (1968), terutama pada faktor rasio kelangsingan  $k(a/d)$  dan faktor efek ukuran  $k(1/d)$ . Sehingga kekuatan retak diagonal yang menyebabkan keruntuhan geser tarik dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$v_c = v_o k(a/d) k(1/d) \quad (1)$$

dengan  $v_o$  = kekuatan geser utama (*principal shear strength*),  $k(a/d)$  = koefisien rasio kelangsingan,  $k(1/d)$  = koefisien tinggi efektif balok. Analisis regresi dilakukan pada 276 data eksperimen sebelumnya untuk mengidentifikasi pengaruh rasio  $4/(a/d)$  dengan kekuatan retak diagonal geser balok beton bentang panjang tanpa tulangan geser seperti yang dikemukakan oleh Arslan (2012). Dari hasil regresi diperoleh hubungan rasio  $v_{c,test}/v_o$  dengan variasi level kelangsingan  $[4/(a/d)]^{0,58}$  yang diilustrasikan dalam Gambar 1. Variasi rasio kekuatan geser retak eksperimental ( $v_{c,test}$ ) dengan kekuatan geser utama  $v_o$  dari balok panjang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{v_{c,test}}{v_o} = \left( \frac{4}{a/d} \right)^{0,58} \quad (2)$$

Persamaan desain baru diusulkan untuk kekuatan retak diagonal berdasarkan kekuatan geser utama untuk balok panjang dengan mempertimbangkan efek kelangsingan.



**Gambar 1.** Pengaruh rasio kelangsingan  $a/d$  terhadap kekuatan retak diagonal

Secara umum, efek ukuran balok ( $d$ ) sangat signifikan berpengaruh terhadap retak miring diagonal, hal ini ditunjukkan dengan koefisien

$k(1/d)$  yang telah diadopsi dalam beberapa formula desain beberapa negara seperti CSA (2004), EC2 (2004), CEB-FIP90 (1993), dan

BS 8110 (1997). Persyaratan CSA (2004) memperhitungkan efek tinggi efektif balok dalam persamaan desain geser sederhana, akan tetapi tidak memperhitungkan rasio tulangan lentur,  $\rho$ . Persyaratan CSA ini terdiri dari dua persamaan yang sederhana dengan batasan tinggi efektif balok  $d \leq 300$  mm dan  $d > 300$  mm. Sedangkan standar BS 8110 (1997) mengusulkan persamaan retak geser dengan memperhitungkan pengaruh tinggi efektif balok. Persyaratan ini membatasi tinggi efektif penampang balok sebesar 400 mm, dengan proporsi  $(400/d)^{1/4} \geq 0,67$ , rasio tulangan memanjang dibatasi sebesar  $\rho \leq 3\%$ , dan kuat tekan beton  $f'_c \leq 40$  MPa.

Berdasarkan hasil analisis regresi terhadap data hasil eksperimen pada parameter tinggi efektif,  $d$ , menunjukkan bahwa efek ukuran sangat signifikan mempengaruhi kuat geser beton  $v_c$  dimana proporsi dengan nilai  $(1067/d)^{1/4}$ , mirip dengan standar beton BS 8110. Hanya dalam model usulan ini, tinggi efektif balok diambil maksimum yakni  $d \leq 1067$  mm (42 in.). Kemudian analisis regresi dilakukan dengan memperhitungkan kuat tekan beton, rasio kelangsingan  $a/d$ , rasio tulangan anja, dan tinggi efektif balok. Dari hasil analisis, diusulkan dua persamaan kekuatan geser beton balok bentang pendek dan anjang tanpa tulangan geser yang dibatasi dengan rasio kelangsingan balok,  $a/d \geq 2,5$  (Persamaan 3) dan  $1,5 \leq a/d < 2,5$  (Persamaan 4) (Buarlele, 2019) sebagai berikut:

$$v_c = 2,93 \left( \sqrt[3]{f'_c \rho} \right)^{0,36} \left( \frac{4}{a/d} \right)^{0,2} \left( \sqrt[4]{\frac{1067}{d}} \right)^{0,36} \quad a/d \geq 2,5 \quad (3)$$

$$v_c = 2,79 \left( \sqrt[3]{f'_c \frac{\rho^{0,5}}{a/d}} \right)^{0,56} \left( \sqrt[4]{\frac{1067}{d}} \right)^{0,56} \left( \frac{2,5}{a/d} \right)^{0,56} \quad a/d < 2,5 \quad (4)$$

dengan  $v_c$  = kekuatan retak geser diagonal ( $V_c/b_w d$ ),  $V_c$  = gaya geser beton,  $f'_c$  = kuat tekan beton silinder,  $\rho$  = rasio tulangan longitudinal,  $a/d$  = rasio bentang geser – tinggi efektif balok, dan  $d$  = tinggi efektif penampang balok.

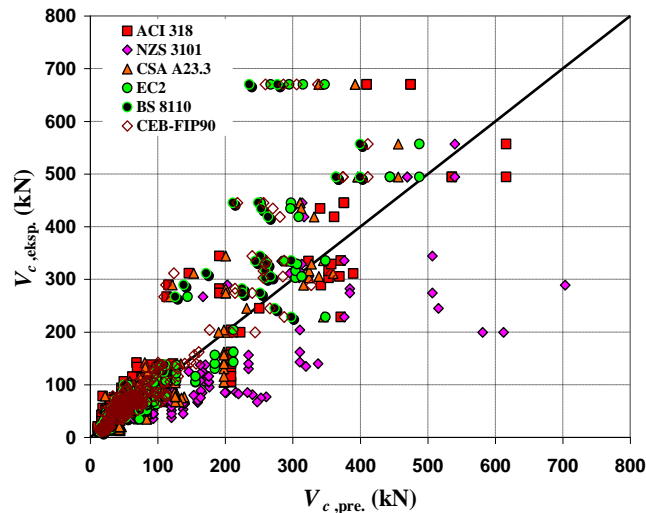
Usulan persamaan ini dapat memprediksi kekuatan geser beton mutu tinggi hingga 194

MPa. Koefisien korelasi (COR) kedua persamaan empiris yang diusulkan untuk memprediksi kekuatan geser diagonal balok beton bertulang tanpa tulangan geser adalah masing-masing sebesar 0,56 dan 0,63.

## EVALUASI PERSAMAAN DESAIN

Persamaan geser pada Tabel 1 menunjukkan persamaan empiris berbagai peraturan desain dengan berbagai batasan penerapannya yang digunakan untuk memprediksi kapasitas geser balok pendek dan panjang beton bertulang tanpa tulangan geser. Untuk studi keakuratan prediksi masing-masing standar beton tersebut, digunakan 276 data eksperimen balok pendek dan panjang yang telah dilakukan sebelumnya oleh para ahli dari literatur. Dapat dilihat bahwa untuk mencerminkan kekuatan tekan beton  $f'_c$  pada kapasitas geser balok beton bertulang, ketentuan Amerika ACI 318, Kanada CSA, dan Selandia Baru NZS menggunakan fungsi  $(f'_c)^{1/2}$ . Sedangkan standar Eropa EC2, model CEB-FIP dan standar Inggris BS 8110 menggunakan fungsi  $(f'_c)^{1/3}$ . Pengaruh efek ukuran pada kapasitas geser tidak terakomodir dalam persamaan geser ACI 318 dan NZS 3101, sedangkan persamaan geser standar lainnya mengakomodasi pengaruh efek ukuran.

Gambar 2 menunjukkan korelasi gaya geser beton  $V_c$  antara hasil eksperimen ( $V_{c, \text{eksp}}$ ) terhadap hasil prediksi ( $V_{c, \text{pre}}$ ) dengan garis ambang batas (*threshold line*) yang menunjukkan nilai  $V_{c, \text{eksp}}/V_{c, \text{pre}} = 1$  untuk keenam standar beton. Dari Gambar 2, memperlihatkan nilai ( $V_{c, \text{eksp}}/V_{c, \text{pre}}$ ) standar BS 8110 (1997) dan CEB-FIP90 (1993) jauh lebih besar dari 1, hal ini menunjukkan bahwa hasil prediksi kapasitas geser balok beton pendek maupun panjang kedua peraturan desain tersebut secara signifikan aman (*underestimate*), dibandingkan dengan peraturan ACI 318 (2014), NZS 3101 (2005), CSA A23.3 (2004), dan EC2 (2004). Hasil prediksi  $V_c$  berdasarkan standar NZS 3101 (2005) menunjukkan tidak aman (*overestimate*), sedangkan hasil prediksi standar beton lainnya menunjukkan hasil yang konsisten terhadap hasil eksperimen.



**Gambar 2.** Perbandingan prediksi persamaan standar beton dengan hasil eksperimen

### KEANDALAN MODEL PREDIKSI

Pengaruh dari kuat tekan beton, rasio tulangan longitudinal, rasio bentang geser-tinggi efektif, dan efek ukuran pada kekuatan geser beton yang diusulkan dan keenam standar beton akan divalidasi dengan hasil pengujian balok beton bertulang tanpa tulangan geser. Validasi dilakukan untuk mengetahui akurasi masing-masing persamaan dalam memprediksi kekuatan geser beton berdasarkan hasil eksperimen 276 balok beton bentang pendek dan panjang dari literatur. Tabel 2 menyajikan hasil evaluasi nilai rata-rata (AVG), standar deviasi (STD), dan koefisien variasi (COV) rasio kekuatan geser beton hasil eksperimen dengan hasil prediksi berdasarkan model usulan dan keenam standar beton. Hasil validasi keenam peraturan menunjukkan nilai COV di atas 30%. Peraturan ACI 318, CEB-FIP90, dan BS 8110 mempunyai nilai rata-rata (AVG) > 1,1. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil prediksi ketiga standar tersebut sangat konservatif (*underestimate*). Sebaliknya, peraturan NZS 3101 mempunyai nilai COV paling besar yaitu 43% dan nilai rata-rata (AVG) sebesar 0,89. Hal

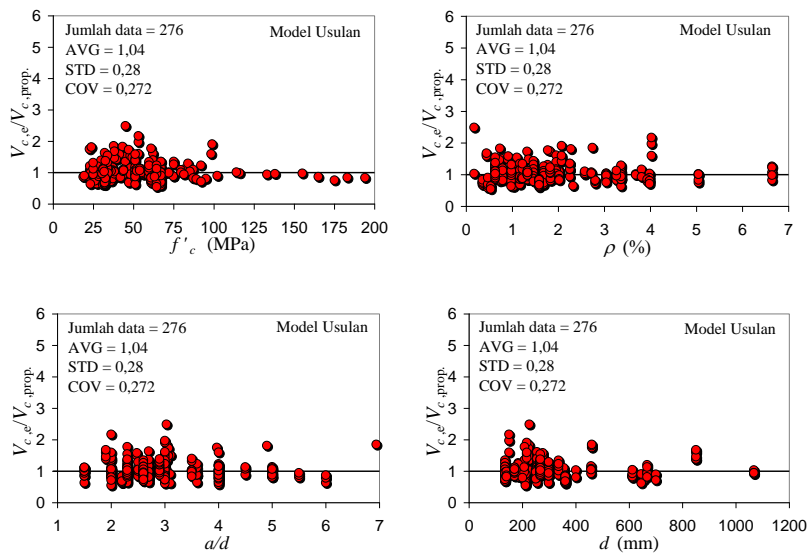
ini menunjukkan bahwa hasil prediksi NZS tidak aman (*overestimate*). Dari Tabel 2 juga menunjukkan bahwa tidak semua peraturan dapat memprediksi kuat geser beton terhadap 276 data benda uji berdasarkan keempat parameter dengan rentang variabel yang digunakan dalam analisis, seperti yang ditunjukkan oleh peraturan NZS 3101, EC2, dan BS 8110. Hal ini dikarenakan standar NZS membatasi variabel rasio  $a/d \geq 2,0$  sehingga data benda uji yang dapat dianalisis hanya 261 balok saja. Standar EC2 membatasi rasio tulangan longitudinal dalam persamaan gesernya, yaitu  $\rho \leq 2,0\%$  saja, sehingga hanya 194 benda uji balok yang dianalisis. Sedangkan persamaan desain berdasarkan BS 8110 hanya berlaku untuk balok beton mutu normal saja, yaitu kuat tekan beton  $f'_c$  di bawah 40 MPa saja, sehingga hanya 107 spesimen yang dapat dianalisis. Model usulan masih cukup akurat (*applicable*) dalam memprediksi kuat geser beton balok beton mutu normal maupun mutu tinggi dibandingkan dengan keenam persamaan desain berdasarkan standar beton, hal ini ditunjukkan dengan nilai COV < 30% dan standar deviasi 0,28.

**Tabel 2.** Perbandingan model usulan dan enam standar beton

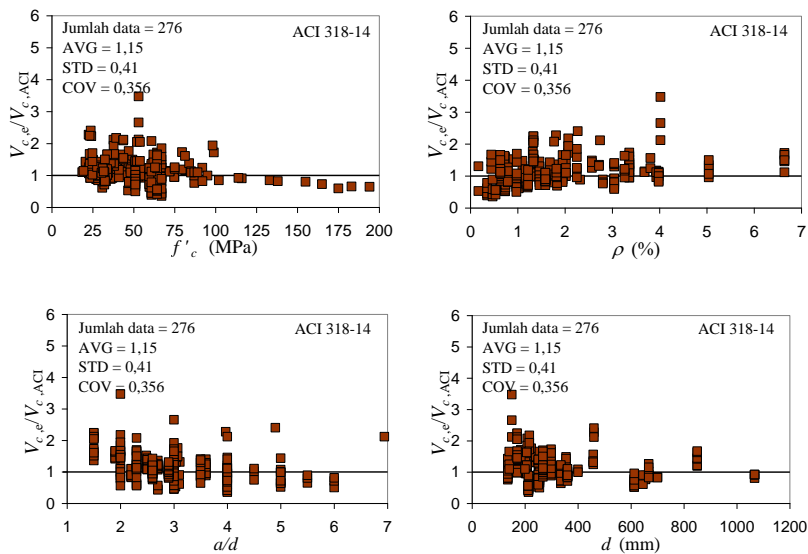
	$V_{c,e}/V_{c,ACI}$	$V_{c,e}/V_{c,NZS}$	$V_{c,e}/V_{c,CSA}$	$V_{c,e}/V_{c,EC}$	$V_{c,e}/V_{c,BS}$	$V_{c,e}/V_{c,CEB}$	$V_{c,e}/V_{c,prop}$
Rata-rata (AVG)	1,15	0,89	1,07	1,02	1,22	1,16	1,04
Standar deviasi (STD)	0,41	0,38	0,42	0,35	0,37	0,36	0,28
Koefisien variasi (COV)	0,36	0,43	0,39	0,35	0,30	0,31	0,27

Gambar 3 menyajikan hasil analisis parametrik menggunakan model usulan, ACI 318-14 (2014), NZS 3101 (2005), CSA A23.3 (2004), EC2 (2004), BS 8110 (1997), dan CEB-FIP90 (1993). Kuat tekan beton, rasio tulangan longitudinal, rasio bentang geser-tinggi efektif, dan tinggi efektif digunakan sebagai variabel dalam analisis. Hasil analisis menunjukkan bahwa model usulan memberikan hasil prediksi yang relatif konsisten mendekati hasil eksperimen dan wajar (*reasonable*) untuk keempat parameter tersebut, dibandingkan dengan keenam standar beton yang ada. Hasil perbandingan model usulan dengan model standar beton yang ada seperti yang disajikan

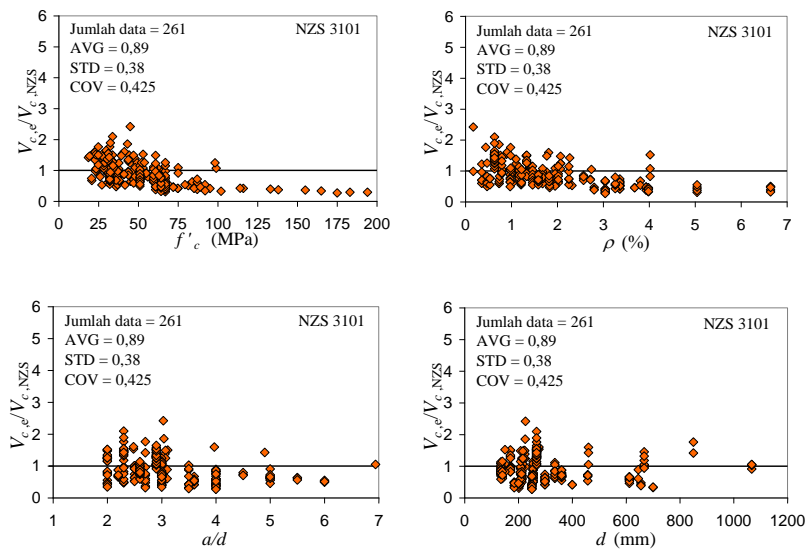
pada Gambar 3, menunjukkan bahwa ACI 318-14, BS 8110, dan CEB-FIP90 cenderung *underestimate* terhadap hasil eksperimen berkisar 15% hingga 20%. Prediksi berdasarkan NZS 3101 tidak dapat diandalkan (*unreliable*) untuk kuat tekan beton  $f'_c > 60$  MPa, rasio tulangan longitudinal  $\rho > 2,0\%$ , dan tinggi efektif  $d > 300$  mm. Hasil prediksi standar NZS untuk keempat parameter cenderung *overestimate*. Sedangkan EC2 memberikan hasil prediksi yang konsisten mendekati eksperimen untuk keempat parameter, tetapi terbatas hanya pada 194 spesimen yang dianalisis dan rasio tulangan longitudinal yang digunakan hanya sampai 2% saja.



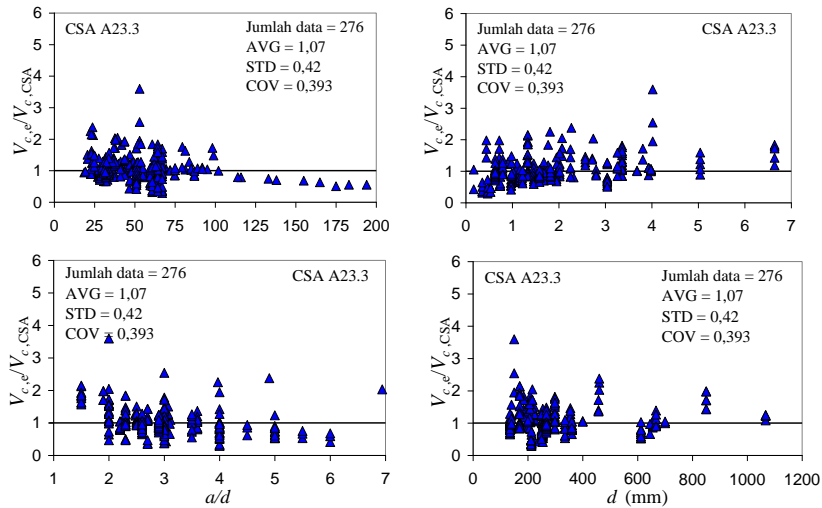
(a) Model usulan



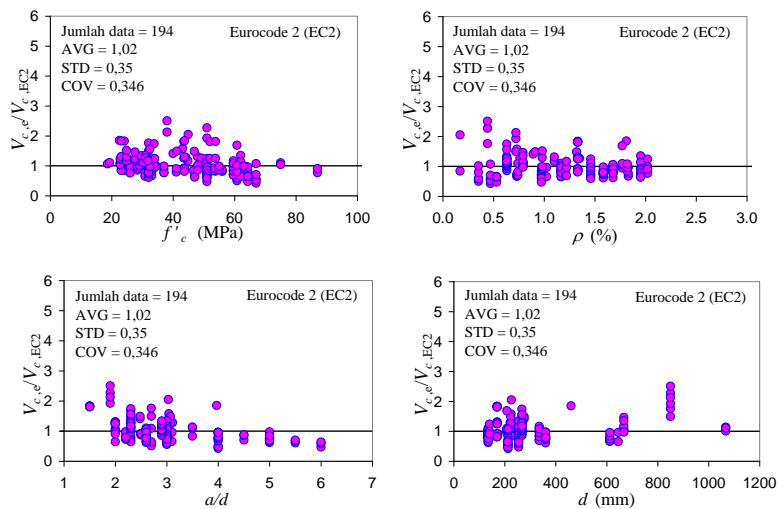
(b) ACI 318-14 (2014)



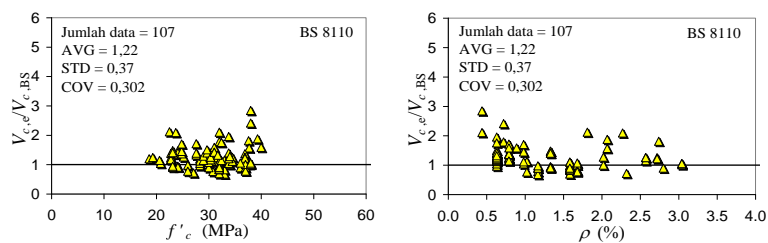
(c) NZS 3101 (2005)



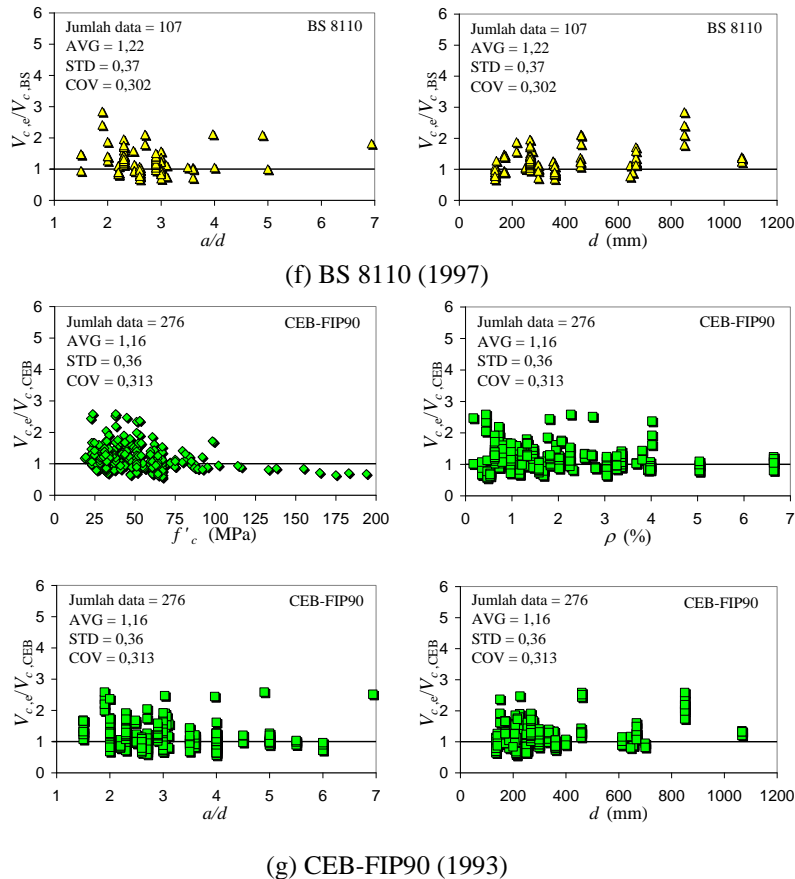
(d) CSA A23.3 (2004)



(e) EC2 (2004)







**Gambar 3.** Hasil analisis parametrik rasio kuat geser beton eksperimen – prediksi ( $V_{c,e}/V_{c,pred.}$ ) dengan kuat tekan beton, rasio tulangan longitudinal, rasio bentang geser-tinggi efektif, dan tinggi efektif sebagai variabel: (a) model usulan, (b) ACI 318-14 (2014), (c) NZS 3101 (2005), (d) CSA A23.3 (2004), (e) EC2 (2004), (f) BS 8110 (1997), dan (g) CEB-FIP90 (1993)

## STUDI PARAMETRIK

Studi parametrik dilakukan untuk mempelajari pengaruh parameter desain yaitu  $f'_c$ ,  $\square$ ,  $a/d$ , dan  $d$  pada kekuatan geser balok beton bertulang tanpa tulangan geser yang diprediksi oleh keenam standar beton dan model usulan dengan mempertimbangkan masing-masing parameter tersebut dari beberapa balok uji yang dipilih seperti hasil eksperimen Kani dkk. (1979), Mphonde dan Frantz (1984), Fujita dkk. (2002), dan Tang dkk. (2009). Detail benda uji balok dan hasil tes kuat geser beton yang dipertimbangkan untuk studi parametrik ditabulasikan dalam Tabel 3. Perbandingan hasil prediksi geser beton oleh keenam standar beton dan model usulan dengan hasil tes, untuk

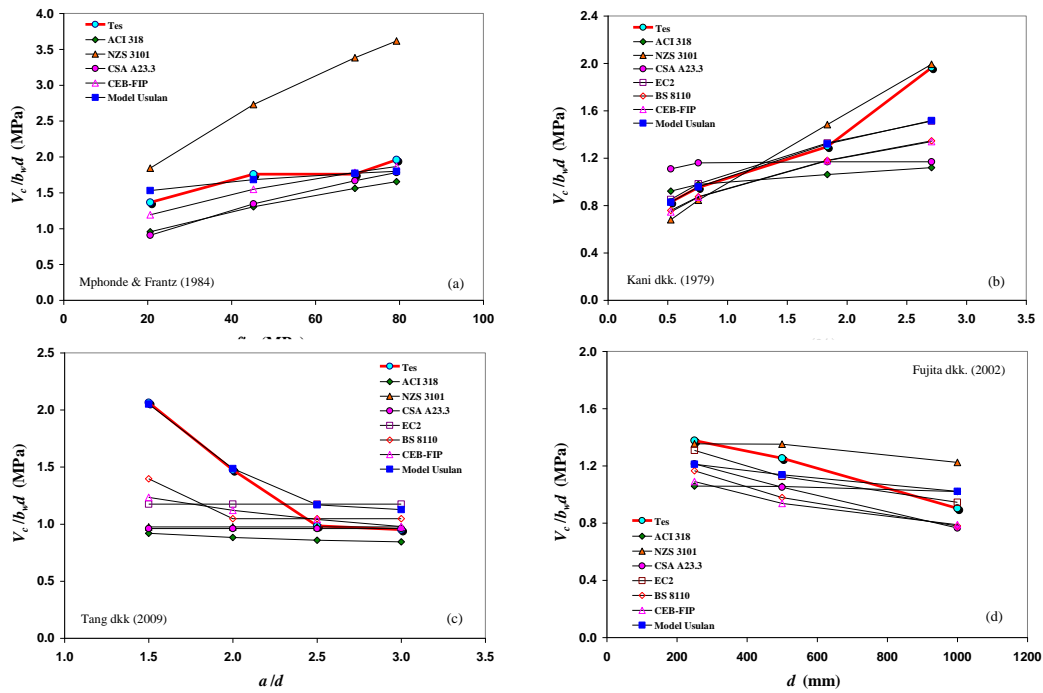
keempat parameter desain tersebut diatas, ditunjukkan pada Gambar 4. Pada gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa standar beton menurut CEB-FIP (1993) dan BS 8110 (1997) menunjukkan hasil prediksi yang lebih baik dan konservatif terhadap hasil tes daripada standar beton lainnya. Sedangkan model usulan menunjukkan hasil prediksi geser yang lebih mendekati hasil tes dari keempat parameter desain dibandingkan dengan keenam standar beton. Sebaliknya, peraturan Selandia Baru (NZS 3101) menunjukkan hasil prediksi geser yang *overestimate* (tidak aman) pada variabel mutu beton  $f'_c$  dan efek ukuran  $d$  diatas 300 mm. Untuk pengaruh rasio  $a/d$ , standar ACI 318 (2014) menunjukkan hasil prediksi kekuatan geser beton yang sangat aman (sangat

konservatif) dibandingkan peraturan lainnya signifikan pada bentang rasio  $1,5 \leq a/d \leq 3,0$ .  
dan tidak menunjukkan pengaruh yang

**Tabel 3.** Detail balok beton bertulang untuk studi parameter desain

No.	Nomenklatur spesimen	$b_w$ (mm)	$d$ (mm)	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$a/d$	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\square$ (%)	$V_c$ (kN)	$V_c/b_w d$ (N/mm <sup>2</sup> )
Mphonde & Frantz (1984) – Pengaruh $f_c$									
1	AO-3-2	152	298	20,6	2,5	414	3,36	61,9	1,37
2	AO-7-2	152	298	45,2	2,5	414	3,36	79,7	1,76
3	AO-15-2b	152	298	69,4	2,5	414	3,36	79,7	1,76
4	AO-11-2	152	298	79,3	2,5	414	3,36	88,7	1,96
Kani dkk. (1979) – Pengaruh $\square$									
5	179	153,2	264,2	30,73	2,57	400	0,526	33,6	0,83
6	163	156,0	272,5	33,61	2,49	378	0,756	40,5	0,95
7	197	150,4	273,6	34,20	2,48	376	1,836	53,4	1,30
8	214	153,4	271,8	34,20	2,50	412	2,708	81,8	1,96
Tang dkk (2009) – Pengaruh $a/d$									
9	NN4	120	170	23,1	3,0	283	1,33	19,4	0,95
10	NN3	120	170	23,1	2,5	283	1,33	20,1	0,99
11	NN2	120	170	23,1	2,0	283	1,33	30,1	1,48
12	NN1	120	170	23,1	1,5	283	1,33	42,1	2,06
Fujita dkk (2002) – Pengaruh $d$									
13	L-25-3*	150	250	36,9	3,0	388	1,531	51,6	1,38
14	L-50-3*	150	500	36,7	3,0	388	1,531	94,0	1,25
15	L-100-3*	350	1000	34,7	3,0	388	1,378	316,2	0,90

\* Masing-masing kasus terdiri dari tiga spesimen yang dirata-rata.



**Gambar 4.** Perbandingan kuat geser beton yang diprediksi berdasarkan standar beton dan model usulan dengan hasil tes Mphonde dan Frantz (1984), Kani dkk. (1979), Tang dkk. (2009), dan Fujita dkk. (2002)

**KESIMPULAN**

Dari hasil evaluasi persamaan yang diusulkan dapat disimpulkan:

1. Standar beton menurut CEB-FIP dan BS 8110 menunjukkan hasil prediksi yang lebih baik dan konservatif terhadap hasil tes daripada standar ACI 318-14, NZS 3101, CSA A23.3, dan EC2. Perumusan geser berdasarkan ACI 318-14, CEB-FIP dan BS 8110 menghasilkan prediksi kekuatan geser beton cenderung aman dibandingkan ketiga standar beton lainnya (NZS 3101, CSA A23.3, dan EC2).
2. Dari hasil analisis, diusulkan dua persamaan kekuatan geser beton balok bentang pendek dan panjang tanpa tulangan geser yang dibatasi dengan rasio kelangsingan balok,  $a/d \geq 2,5$  dan  $1,5 \leq a/d < 2,5$  (persamaan 3 dan 4).
3. Model usulan cukup akurat (*applicable*) memprediksi gaya geser beton  $V_c$  balok beton bertulang bentang pendek maupun panjang tanpa tulangan geser pada rentang variabel yang dipertimbangkan dalam penelitian ini.

**DAFTAR PUSTAKA**

ACI Committee 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318M-14)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 519 pp.

Ahmad, S. H. and Lue, D. M. (1987). "Flexure-Shear Interaction of Reinforced High-Strength Concrete Beams". *ACI Structural Journal*, 84(4), 330-341.

Angelakos, D., Bentz, E. C., and Collins, M. P. (2001). "Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large Members". *ACI Structural Journal*, 98(3), 290-300.

Arslan, G. (2012). "Diagonal Tension Failure of RC Beams Without Stirrups". *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(2), 217-226.

Batchelor, B. D. and Kwun, M. (1981). "Shear in RC Beams Without Web Reinforcement". *ASCE Journal Proceedings*, 107(5), 907-921.

Bresler, B. and Scordelis, A. C. (1963). "Shear Strength of Reinforced Concrete Beam". *ACI Journal Proceedings*, 60(1), 51-74.

BS8110-1:1997. (1997). *Structural Use of Concrete – Part 1 : Code of Practice for Design and Construction*. British Standards Institution, London, UK, 120 pp.

Buarlele, L. (2019). *Analisis Perilaku Kekuatan Geser Beton pada Balok Beton Bertulang Tanpa Tulangan Geser*. Tesis, UKI Paulus, Makassar.

CEB-FIP Model Code 1990. (1993). *Comite Euro-International du Beton (CEB)*. London: Thomas Telford Services.

CSA Committee A23.3. (2004). *Design of Concrete Structures*. Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada, 214 pp.

- Daluga, D., McCain, K., Murray, M., and Pujol, S. (2018). "Effect of Geometric Scalling on Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Without Stirrups". *ACI Structural Journal*, 115(1), 5-14.
- Deng, Q., Jian Yi, W., and Jian Tang, F. (2017). "Effect of Coarse Aggregate Size on Shear Behavior of Beams Without Shear Reinforcement". *ACI Structural Journal*, 114(5), 1131-1142
- Elsanadedy, H. M., Abbas, H., Al-Salloum, Y. A., and Almusallam, T. H. (2016). "Shear Strength Prediction of HSC Slender Beams Without Web Reinforcement". *Materials and Structures*, 49(9), 3749-3772.
- El-Sayed, A. K. and Shuraim, A. B. (2016). "Experimental Verification of Resistance-Demand Approach for Shear of HSC Beams". *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(4), 513-525.
- EN 1992-1-1. (2004). *Eurocode 2 – Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 225 pp.
- Fenwick, R. C. and Paulay, T. (1968). "Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams". *Journal of the Structural Division*, ASCE, 94(10), 2328-2336.
- Fujita, M., Sato, R., Matsumoto, K., and Takaki, Y. (2002). "Size Effect on Shear Strength of RC Beams Using HSC Without Shear Reinforcement". Translation from Proceedings of JSCE, 711/V-56, August 2002, 113-128
- Hassan, T. K., Seliem, H. M., Dwairi, H., Rizkalla, S. H., and Zia, P. (2008). "Shear Behavior of Large Concrete Beams Reinforced with High-Strength Steel". *ACI Structural Journal*, 105(2), 173-179.
- Hassoun, M. N. and Al-Manaseer, A. (2015). *Structural Concrete: Theory and Design*. 6<sup>th</sup> ed., John Wiley and Sons.
- Joint ACI-ASCE Committee 445. (1999). *Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete : ACI Manual of Concrete Practice (ACI 445R-99) (Reapproved 2009)*. ACI, Farmington Hills, MI, USA, 55 pp.
- Kani, M. W., Huggins, M. W., and Wittkopp, R. R. (1979). *Kani on Shear in Reinforced Concrete*. University of Toronto Press, Toronto, Canada.
- Kusuma, B. (2001). *Pengaruh Rasio Tulangan Geser Terhadap Penambahan Kekuatan Geser Beton pada Balok Beton Bertulang dengan Beton Mutu Tinggi*. Tesis, ITS, Surabaya.
- Mphonde, A. G. and Frantz, G. C. (1984). "Shear Tests of High- and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups". *ACI Journal Proceedings*, 81(4), 350-357.
- Munikrishna, A., Hosny, A., Rizkalla, S., and Zia, P. (2011). "Behavior of Concrete Beams Reinforced with ASTM A1035 Grade 100 Stirrups under Shear". *ACI Structural Journal*, 108(4), 34-41.
- NZS 3101-1995. (2005). *New Zealand Standard Code of Practice for the Design of Concrete Structures*. Standard Association of New Zealand (NZS), Wellington, New Zealand, 33 pp.
- Pendyala, R. S. and Mendis, P. (2000). "Experimental Study on Shear Strength of High-Strength Concrete Beams". *ACI Structural Journal*, 97(4), 564-571.
- Perera, S. V. T. J. and Mutsuyoshi, H. (2013). "Shear Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Beams". *ACI Journal*, 110(5), 43-52.
- Rahal, K. N. and El-Hawary, M. (2002). "Shear Tests of Epoxy-Modified Reinforced Concrete Beams". *ACI Structural Journal*, 99(6), 811-818.
- Reineck, K. H., Bentz, E., Fitik, B., Kuchma, D. A., and Bayrak, O. (2014). "ACI-DAfStb Databases for Shear Tests on Slender Reinforced Concrete Beams with Stirrups". *ACI Structural Journal*, 111(5), 867-875.
- Reineck, K. H., Kuchma, D. A., Kim, K. S., and Sina, M. (2003). "Shear Database for Reinforced Concrete Members Without Shear Reinforcement". *ACI Structural Journal*, 100(2), 240-249.
- Safan, M. A. (2012). "Shear Strength of Concrete Beams Cast with Self Compacting Concrete Containing Different Fillers and Coarse Aggregates". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39, 760-770.
- Shah, A. and Ahmad, S. (2012). "Experimental Verification of Current Shear Design Equations for HSRC Beams". *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 31(3), 409-420.
- Sudheer, R. L., Ramana, R. N. V., and Gunneswara Rao, T. D. (2010). "Shear Resistance of High Strength Concrete Beams Without Shear Reinforcement". *International Journal of Civil & Struct. Engineering*, 1(1), 101-113.
- Tang, C. W., Yen, T., and Chen, H. J. (2009). "Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Made with Sedimentary Lightweight Aggregate Without Shear Reinforcement". *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 21(12), 730-739.
- Tavio (2009). "Experimental Investigation on Size Effect in Shear of High-Strength Concrete Beams". *The Journal for Technology and Science*, IPTEK, 20(1), 11-23.
- Wight, J. K. (2016). *Reinforced Concrete : Mechanics and Design*. 7<sup>th</sup> ed., Global Edition, Pearson Education Limited.

- Xie, Y., Ahmad, S. H., Yu, T., Hino, S., and Chung, W. (1994). "Shear Ductility of Reinforced Concrete Beams of Normal and High-Strength Concrete". *ACI Structural Journal*, 91(2), 140-149.
- Yoon, Y. S., Cook, W. D., and Mitchell, D. (1996). "Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium, and High-Strength Concrete Beams". *ACI Structural Journal*, 93(5), 576-584.
- Zsutty, T. C. (1968). "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data". *ACI Journal*, 65(11), 943-951.