

PREDIKSI KUAT GESER BALOK - TINGGI BETON BERTULANG BERDASARKAN *STRUT AND TIE MODEL*

I K. Sudarsana¹

Abstrak: Balok tinggi beton bertulang merupakan salah satu contoh daerah terganggu (Disturb Region) pada elemen struktur. Pada D-region, teori balok (beam teori) tidak tepat diterapkan oleh karena itu diperlukan suatu metode yang rasional untuk diterapkan pada daerah-daerah tersebut. *Strut and Tie Model* (STM) merupakan pengembangan dari analogi rangka, telah diakui cukup baik diterapkan pada daerah-daerah tersebut. Pada tulisan ini diuraikan keakuratan dari metode STM dalam memprediksi kuat geser dari balok tinggi beton bertulang.

Sebanyak 151 buah balok tinggi beton bertulang hasil eksperimen dengan rasio $a_v/d \leq 2.5$ dikumpulkan dari literatur, dianalisis sesuai dengan pengklasifikasian data berdasarkan kriteria: keberadaan tulangan badan (balok - tinggi dengan tulangan badan dan balok - tinggi tanpa tulangan badan), kuat tekan beton (beton normal dan beton mutu tinggi). Kuat geser hasil eksperimen dibandingkan dengan kuat geser hasil analisis berdasarkan metode STM. Analisa statistik sederhana terhadap rasio perbandingan (V_{TEST}/V_{STM}) ini dilakukan untuk mengetahui rata-rata (AVR), standar deviasi (STD) dan koefisien variasi (COV).

Hasil analisis menunjukkan bahwa Metode STM dengan mengambil bentuk strut prismatis dan kekuatan elemen-elemennya mengikuti ACI 318-2002 Apendik A, mampu memprediksi kuat geser balok tinggi beton normal dengan tulangan badan secara aman dengan nilai AVR_{total} dari V_{TEST} / V_{STM} sebesar 1,154 dengan STD dan COV masing-masing 20.9% dan 18.9%. Namun metode STM menjadi tidak konservatif lagi bila mutu beton ditingkatkan $f'_c > 41$ MPa. Untuk balok tinggi beton bertulang tanpa adanya tulangan badan baik beton bermutu normal maupun beton mutu tinggi, prediksi kuat geser metode STM secara umum tidak konservatif.

Kata kunci: balok tinggi, kuat geser, *strut and tie model*, beton bertulang.

SHEAR STRENGTH PREDICTION OF RC DEEP BEAM USING STRUT AND TIE MODEL (STM)

Abstract : Reinforced concrete deep beam is an example of disturbed region (D-region) in structural elements. In D-regions, beam theory is not applicable; therefore, rational methods are required in those areas. Strut and Tie Model (STM) was developed on the basis of truss analogy, has been agreed to be suitable method for such regions. In this paper, the accuracy of STM method in predicting shear strength of reinforced concrete deep beam is discussed.

As many as 151 experimental results of reinforced concrete deep beam having $a_v/d < 2.5$ were collected from literature, analyzed according to data classification of the criteria: the existence of web reinforcement (deep beams with and without web reinforcement) and concrete compressive strength (normal strength concrete and high strength concrete). Shear strength of experimental results were compared with that of predicted using STM method. A simple statistic analysis was conducted on the ratio of V_{test}/V_{stm} to determine average (AVR), deviation standard (STD) and coefficient of variation (COV).

The analytical results show that the STM method, developed using prismatic strut shapes and the strength of each elements follows ACI 318-2002 Appendix A, can

¹ Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Denpasar.

predict conservatively the shear strength of deep beams having web reinforcement with normal strength concrete. This is indicated by the value of AVR , STD and COV of V_{test}/V_{stm} of 1.154, 20,9% and 18,9%, respectively. However, the method become unconservative when the concrete strength greater than 41 MPa. For deep beams without web reinforcement using both normal strength and high strength concrete, the shear strength prediction of the STM method, in general, is overestimate.

Keywords: deep beam, shear strength, strut and tie model, reinforced concrete.

PENDAHULUAN

Mekanisme geser pada elemen struktur merupakan hal yang sangat penting diperhatikan terlebih lagi pada komponen struktur yang rentan terhadap gaya geser seperti pada balok tinggi beton bertulang. Gaya geser umumnya tidak bekerja sendiri, tetapi berkombinasi dengan lentur, torsi, atau gaya normal. Perilaku keruntuhan geser pada balok beton bertulang sangat berbeda dengan keruntuhan karena lentur. Keruntuhan geser bersifat getas (brittle) tanpa adanya peringatan berupa lendutan yang berarti.

Pada balok tinggi keruntuhan yang terjadi dominan diakibatkan oleh gaya geser. Gaya geser akan mengakibatkan terjadinya retak miring pada balok, dan setelah retak ini terjadi, mekanisme transfer gaya geser akan disumbangkan oleh aksi pelengkung (*arching action*). Aksi ini dapat memberikan cadangan kapasitas yang cukup besar pada balok dalam memikul beban.

Ada beberapa metode yang dapat dipakai untuk menganalisa kuat geser pada balok tinggi beton bertulang baik metode empiris maupun analitis. Salah satu metode analitis yang telah diakui cukup rasional adalah metode *Strut and Tie Model* (STM). Metode *Strut and Tie Model* merupakan pengembangan dari analogi rangka batang. Metode STM dapat dipergunakan pada daerah-daerah dimana teori balok tidak tepat diterapkan. Daerah-daerah seperti ini sering disebut daerah terganggu (D-regions). Dengan metode STM, analisa D-region pada elemen struktur dapat lebih mudah dilakukan dimana keadaan tegangan yang terjadi diidealisasikan sebagai *strut* dari beton, *tie*

dari baja dan daerah nodal (Lumantarna, 2002). Dengan adanya aksi dari *strut and tie* tersebut, penambahan kekuatan pada struktur balok tinggi beton bertulang dapat terjadinya (Nilson dan Winter, 1991).

TINJAUAN PUSTAKA

Balok Tinggi Beton Bertulang

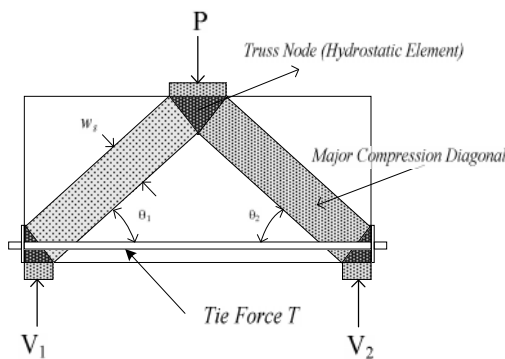
Menurut ACI Committee 318, balok tinggi didefinisikan sebagai komponen struktur dengan beban bekerja pada salah satu sisinya dan perletakan pada sisi lainnya sehingga strut tekan dapat terbentuk diantara beban dan perletakan. Balok tinggi juga didefinisikan sebagai balok dengan bentangan bersih L_n tidak lebih dari empat kali tinggi balok (h) untuk pembebanan merata atau dua kali tinggi efektif balok ($2d$) dari muka perletakan untuk balok dengan pembebanan terpusat.

Balok tinggi biasanya digunakan sebagai balok transfer (*transfer girder*) baik hanya satu bentang maupun balok menerus. Pada transfer girder, beban dari sebuah kolom atau lebih disalurkan secara horizontal menuju kolom lainnya. Balok tinggi juga ditemui pada dinding struktur berpasangan (*coupling structural wall*) dan kepala pondasi tiang pancang (*pile cap*).

Metode *Strut and Tie Model* (STM)

Komponen struktur beton bertulang yang mengalami retak, pada dasarnya gaya yang bekerja akan dipikul oleh tegangan tekan dari beton utuh dan tegangan tarik dari baja tulangan. Penggambaran medan tegangan utama (trayektori tegangan utama) pada elemen struktur beton dapat dilakukan berdasar-

kan analisis elastis. Trayektori tegangan utama tersebut mempunyai tendensi untuk menjadi lurus setelah terjadi retakan yang cukup banyak, sehingga dapat diidealisasikan sebagai *strut*. Berdasarkan perilaku inilah kemudian *strut and tie model* dikembangkan sehingga suatu daerah terganggu (D-region) dapat diidealisasikan terdiri atas: *strut* dari beton, *tie* dari baja tulangan dan *nodal zone* (daerah nodal) yang merupakan pertemuan dari *strut* dan *tie*. Seperti halnya pada rangka batang, ada tiga elemen pokok dalam pembentukan keseimbangan dalam model *strut and tie*, yaitu batang tekan (penunjang atau *strut*), batang tarik (pengikat atau *tie*) dan titik simpul (*joints* atau *nodes*). Nodal pada STM sering juga disebut “*hydrostatic element*”. Gambaran dari ketiga tipe elemen pembentuk STM dapat dilihat pada Gambar 1.



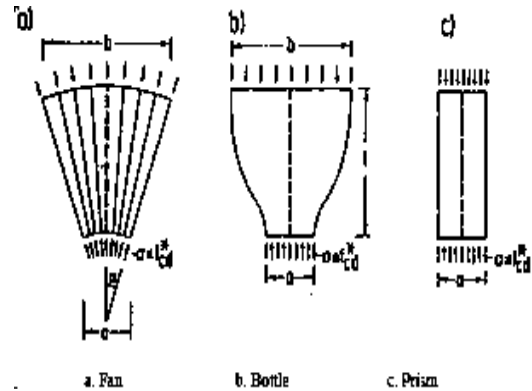
Gambar 1. Elemen-elemen dalam Strut and Tie Model

Dimensi yang proporsional dari elemen *strut*, *tie* dan nodal zone didapat berdasarkan kondisi batas tegangan yang sudah jelas. Kondisi ini benar-benar berdasarkan atas *lower bound* pada analisa plastis karena pada kenyataannya semuanya diasumsikan berdasarkan atas distribusi tegangan yang pasti dan aliran gaya, yang pada akhirnya akan menyebabkan keseimbangan dan kondisi tegangan yang maksimum (Lumantarna, 2002).

Elemen Strut

Elemen *strut* dalam STM merupakan idealisasi dari medan tegangan tekan

beton dimana arah dari strut searah dengan tegangan tekan beton. *Strut* dapat dimodelkan berbentuk prismatis, botol dan kipas (ACI 318-2002, Schlaich et al., 1987) seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Idealisasi bentuk-bentuk strut

Strut yang berbentuk kipas (*fan shape*) mengabaikan kurvatur, dalam hal ini tegangan transversal yang terjadi. Bila medan tegangan mengalami pengelembungan di bagian tengah sehingga tegangan tarik transversal yang besar terjadi maka medan tegangan ini dapat diidealisasikan sebagai strut berbentuk botol (*bottle shape*). Tegangan tarik ini dapat mengawali terjadinya retak pada *strut*, untuk itu diperlukan tulangan tarik untuk memikul tegangan yang terjadi tersebut. Bentuk strut prismatis merupakan bentuk medan tegangan yang spesial dari kedua medan tegangan sebelumnya. Pemodelan medan tegangan ini mengabaikan tegangan tarik transversal dan kurvatur yang terjadi.

Kekuatan dari strut ditentukan oleh kuat hancur beton pada *strut*. Kuat hancur beton ini tidak sama dengan kuat hancur beton hasil pengujian silinder. ACI 318-2002 memperhitungkan kekuatan hancur strut beton sebagai kekuatan efektif (*effective strength*), yang dihitung berdasarkan persamaan:

$$f_{cu} = 0,85\beta f'_c \tag{1}$$

Dimana :

- a. $s = 1,0$ untuk *strut* prismatis di daerah tekanan yang tidak mengalami retak atau untuk *strut* yang mempunyai wilayah menyilang yang sama panjang tanpa kontrol retak pada daerah penulangan.
- b. $s = 0,75$ untuk *strut* yang berbentuk botol dan terdapat kontrol retak pada daerah penulangan.
- c. $s = 0,60$ untuk *strut* yang berbentuk botol dan tidak terdapat tanpa tulangan, dimana adalah suatu faktor koreksi.
- d. $s = 0,40$ untuk *strut* di dalam komponen tarik
- e. $s = 0,60$ untuk kasus-kasus yang lain

Pada model *strut and tie*, gaya tekan dari *strut* kemudian dapat dihitung dengan menggunakan kuat tekan nominal dari *strut*, yaitu:

$$F_{ns} = f_{cu} A_c \dots\dots\dots(2)$$

Dimana A_c diambil berdasarkan persamaan:

$$A_c = b_w w_s \dots\dots\dots(3)$$

Elemen Tie

Komponen terpenting kedua dari model *strut and tie* adalah komponen tarik (*tie*). Gaya tarik dari *ties*, dapat mengakibatkan keruntuhan pada daerah penjangkaran (*nodal zone*). Pengangkeran *ties* di daerah *nodal* merupakan hal sangat penting untuk meyakinkan *ties* mencapai kekuatan lelehnya. Kekuatan nominal dari *ties*, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$F_{nt} = A_s f_y \dots\dots\dots(4)$$

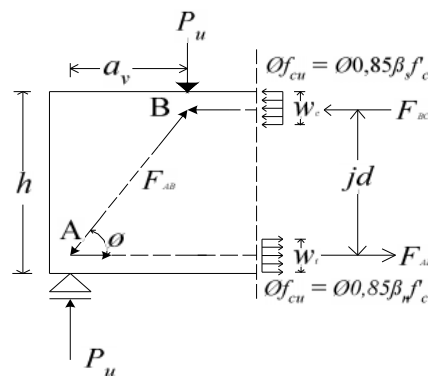
Pada metode STM, baja tulangan sebagai elemen pemikul tarik dianggap bekerja dalam sebuah grup sehingga komponen *ties* memiliki suatu lebar efektif (w_t). Lebar w_t memiliki nilai terbatas dan tergantung dari pendistribusian tulangan tarik balok. Pembatasan nilai w_t ini berdasarkan atas beban luar

dan reaksi-reaksi tumpuan serta semua titik simpul berada dalam kesetimbangan ($V = 0; H = 0; M = 0$). Pada perhitungan nilai w_t , faktor yang harus diperhatikan adalah kekuatan dari *tie* itu sendiri ($F_{nt} = A_s f_y$) dan kekuatan dari nodal zone akibat penjangkaran tulangan ($F_{nn} = 0,85 n f'_c b w_t$). Agar komponen ties dapat mencapai leleh, maka keseimbangan kedua gaya tersebut dapat dipakai dasar untuk menghitung lebar efektif elemen *tie* seperti pada Gambar 3.

$$F_{nt} = F_{nn} \dots\dots\dots(5)$$

$$A_s f_y = 0,85 n f'_c b w_t$$

$$w_t = \frac{A_s f_y}{0,85 \beta_n f'_c b} \dots\dots\dots(6)$$



Gambar 3. Model rangka batang yang ditinjau setengah bentang (Sumber : ACI 318-02 Appendix A, 2002)

Dari Gambar 3 dapat dilihat, dengan mengambil kesetimbangan momen di titik A ($M_A = 0$) akan didapat suatu persamaan:

$$w_t = 1,25 w_c \dots\dots\dots(7)$$

$$jd = h - \frac{w_c}{2} - \frac{w_t}{2} \dots\dots\dots(8)$$

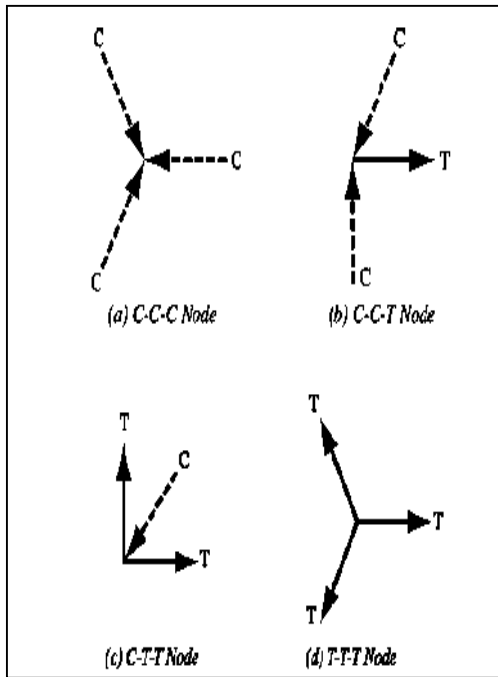
Elemen Nodal

Suatu titik dimana gaya-gaya pada strut dan tie dari suatu model strut-and-tie bertemu. Secara konsep dalam rangka batang, titik-titik ini diidealisasikan sebagai sendi. Beton yang berada pada titik pertemuan dan sekelilingnya disebut

nodal zone. Gaya-gaya yang bekerja pada daerah nodal harus memenuhi kesetimbangan:

$$\sum F_x = 0 ; \sum F_y = 0 ; \text{ dan } \sum M = 0 \quad (9)$$

Kondisi $\sum M = 0$ menunjukkan bahwa garis aksi dari semua gaya yang bekerja harus melalui suatu titik umum (*common point*).



Gambar 4. Tipe-tipe nodal dalam metode STM

Nodal zone dapat dikelompokkan berdasarkan gaya-gaya dalam yang bertemu pada daerah tersebut:

- a) C-C-C : bila tiga buah gaya tekan bertemu pada titik nodal
- b) C-C-T : bila satu dari ketiga gaya yang bertemu adalah gaya tarik
- c) C-T-T : bila salah satu dari ketiga gaya yang bertemu adalah gaya tekan
- d) T-T-T : bila ketiga gaya yang bertemu adalah gaya tarik

Kekuatan tekan pada daerah *nodal* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$F_{nn} = f_{cu} A_n \quad \dots\dots\dots(10)$$

Dimana :

Untuk daerah tekan :

$$A_n = b_w w_c \quad \dots\dots\dots(11)$$

Untuk daerah tarik :

$$A_n = b_w w_t \quad \dots\dots\dots(12)$$

Nilai tegangan efektif beton pada nodal ditentukan seperti halnya pada elemen strut yaitu:

$$f_{cu} = 0,85 n f'_c \quad \dots\dots\dots(13)$$

Ada beberapa nilai n yang telah diusulkan untuk menghitung tegangan-tegangan yang terjadi pada daerah *nodal*. Menurut ACI 318 – 02 Appendix A, nilai β_n ditentukan sebagai berikut:

- a. $n = 1,0$ pada daerah *nodal* yang terjadi oleh tekanan *struts* dan daerah landasan (*CCC nodes*).
- b. $n = 0,8$ pada daerah *nodal* dimana terdapat penjangkaran oleh tarikan *tie* hanya pada satu arah (*CCT nodes*).
- c. $n = 0,6$ pada daerah *nodal* dimana terdapat penjangkaran oleh tarikan *tie* dalam banyak arah (*CTT* atau *TTT nodes*).

METODOLOGI

Data Eksperimen

Prediksi kuat geser balok tinggi beton bertulang berdasarkan metode STM dibandingkan dengan data hasil penelitian yang dilakukan oleh de Paiva and Siess (1965), Kong et.al (1970), Oh and Shin (2001), Smith and Vantsiotis (1982), Tan et.al (1995 dan 1997). Sebanyak 151 buah data yang berhasil dikumpulkan dan diklasifikasikan berdasarkan kriteria: keberadaan tulangan badan (balok - tinggi dengan dan tanpa tulangan badan), dan kuat tekan beton (beton mutu tinggi dan beton normal). Semua data yang diperhitungkan dalam analisis ini adalah balok dengan rasio perbandingan $a_v/d \leq 2.5$.

Untuk kriteria mutu beton, beton yang dimasukkan sebagai beton mutu normal, memiliki nilai f'_c 41 MPa sedangkan beton mutu tinggi memiliki kuat tekan f'_c

> 41 MPa berdasarkan hasil uji tekan silinder beton. Dari 151 data, 140 buah merupakan balok dengan tulangan badan dengan kuat tekan beton normal sebanyak 69 buah (Oh and Shin, 2001; Smith and Vantsiotis, 1982; Kong et.al, 1970; de Paiva and Siess, 1965) dan 71 buah dengan kuat tekan beton mutu tinggi (Tan et.al, 1995; Oh and Shin, 2001; Tan et.al, 1997). Sedangkan data eksperimen untuk jenis balok tinggi tanpa tulangan badan berjumlah 11 buah terdiri dari 6 buah balok beton normal (Smith and Vantsiotis, 1982 dan de Paiva and Siess, 1965) dan 5 balok beton mutu tinggi (Oh and Shin, 2001 dan Tan et.al, 1997).

Prosedur Analisis dengan metode STM

Desain dan analisis dengan metode STM merupakan analisis iterasi yang meliputi:

- Pemilihan asumsi model strut dan tie
- Penentuan dimensi elemen strut, ties dan nodal.
- Pemeriksaan dimensi elemen strut, ties dan nodal untuk meyakinkan asumsi model strut dan tie adalah valid.
- Lakukan iterasi bila diperlukan, dengan kembali ke langkah awal.

Dalam penelitian ini analisis kuat geser balok tinggi dengan metode STM dilakukan sebagai berikut:

1. Menetapkan parameter-parameter yang diperlukan untuk mengklasifikasikan balok sesuai dengan criteria pada sub-bab 3.1.
2. Menentukan model strut dan tie yang akan dipergunakan dengan mempergunakan model rangka batang sederhana. Hal ini cocok untuk balok tinggi sederhana di atas perletakan sederhana.
3. Menghitung kuat tekan beton efektif pada strut dan daerah nodal.
4. Menentukan lebar strut (w_c), ties (w_t) dan besarnya lengan momen (jd). Dimensi dari strut dan tie ini didapat dengan mengasumsikan bahwa keruntutan dari balok diawali dengan lelehnya baja tarik.

5. Menghitung besarnya gaya pada elemen struts dan ties.

6. Hitung gaya geser nominal total (V_{STM}) dengan persamaan kesetimbangan.

Hasil analisis dengan STM pada langkah ke-6 kemudian dibandingkan dengan kuat geser hasil eksperimen (V_{TEST}/V_{STM}). Analisa statistik sederhana dilakukan untuk menghitung nilai rata-rata (AVR), standar deviasi (STD) dan koefisien variasinya (COV) dari nilai perbandingan V_{test}/V_{STM} . Prediksi suatu metode akan semakin mendekati kenyataan bila nilai perbandingan antara kuat geser eksperimen terhadap kuat geser analisis (V_{TEST}/V_{STM}), mendekati nilai satu, dan prediksi suatu metode dapat dikatakan aman apabila kuat geser ekeperimen lebih besar dari kuat geser analisis berdasarkan metode tersebut. Nilai koefisien variasi dipakai untuk menentukan tingkat sebaran data hasil analisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Balok Tinggi dengan Tulangan Badan

Hasil analisis untuk balok tinggi beton normal dengan tulangan badan tercantum pada Tabel 1. Secara umum prediksi kekuatan geser menurut STM cukup *conservative* dengan nilai rata-rata V_{test}/V_{stm} sebesar 1.154 dengan STD dan COV masing-masing sebesar 20,9% dan 18,1%. Namun, untuk 6 buah data dari Oh and Shin (2001), metode STM *over-estimate* hasil eksperimen. Hal ini mungkin dipengaruhi oleh rasio a_v/d . Nilai ini menentukan besarnya sudut kemiringan strut terhadap garis horizontal.

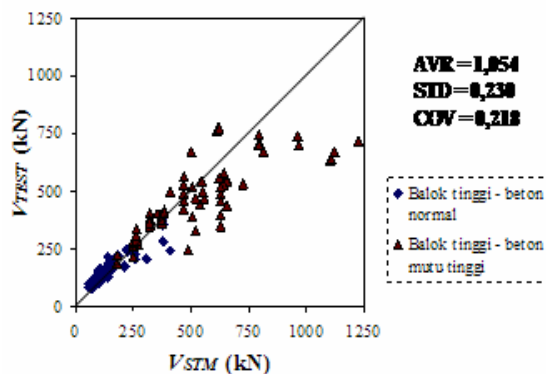
Tabel 1. Balok tinggi beton normal dengan tulangan badan

| No | Referensi | Tahun | Jumlah benda | V_{exp}/V_{stm} | | |
|----------------------------|----------------------|-------|--------------|-------------------|-------|-------|
| | | | | AVR | STD | COV |
| 1 | Oh and Shin | 2001 | 6 | 0.903 | 0.102 | 0.112 |
| 2 | Smith and Vantsiotis | 1982 | 46 | 1.172 | 0.140 | 0.119 |
| 3 | Kong et. al | 1970 | 15 | 1.179 | 0.335 | 0.284 |
| 4 | de Paiva and Seiss | 1965 | 2 | 1.289 | 0.200 | 0.155 |
| Jumlah dan rata-rata total | | | 69 | 1.154 | 0.209 | 0.181 |

Prediksi metode STM terhadap kekuatan geser balok tinggi beton mutu tinggi sedikit *overestimate* seperti terlihat pada Tabel 2. Nilai rata-rata rasio V_{test}/V_{stm} terhadap 71 buah data adalah sebesar 0.958 dengan nilai standar deviasi dan sebaran datanya berturut-turut sebesar 20.8% dan 21.7%. Prediksi geser STM akan *overestimate* apabila sudut kemiringan strut terhadap arah horizontal lebih dari 58° .

Table 2. Balok tinggi beton mutu tinggi dengan tulangan badan.

| No | Referensi | Tahun | Jumlah benda uji | V_{exp}/V_{stm} | | |
|----------------------------|-------------|-------|------------------|-------------------|-------|-------|
| | | | | AVR | STD | COV |
| 1 | Ch and Shin | 2001 | 37 | 0.993 | 0.185 | 0.186 |
| 2 | Tan et. al | 1997 | 20 | 0.913 | 0.241 | 0.264 |
| 3 | Tan et. al | 1995 | 14 | 0.927 | 0.213 | 0.230 |
| Jumlah dan rata-rata total | | | 71 | 0.958 | 0.208 | 0.217 |



Gambar 5. Perbandingan antara V_{test} dan V_{stm} untuk seluruh balok tinggi dengan tulangan badan

Secara keseluruhan, bila data untuk beton normal (Tabel 1) digabungkan dengan beton mutu tinggi (Tabel 2) dan diplot dalam sebuah grafik seperti terlihat pada Gambar 5, prediksi kuat geser metode STM mendekati nilai test. Meskipun ada beberapa data yang memberikan rasio V_{TEST}/V_{STM} lebih kecil dari satu.

Balok Tinggi Tanpa tulangan badan

Data dari balok tinggi tanpa tulangan badan yang didapat sangat terbatas sehingga secara statistik jumlahnya kurang memadai. Namun untuk menge-

tahui kecenderungan dari data yang ada dan kelengkapan analisis, uji statistik tetap dilakukan.

Prediksi kuat geser metode STM untuk balok tinggi tanpa tulangan badan lebih besar dari hasil eksperimen baik untuk balok dengan beton normal maupun mutu tinggi seperti terlihat pada Tabel 4 dan 5, kecuali eksperimen yang dilakukan oleh de Paiva and Seiss (1965). Untuk beton normal didapat nilai rata-rata V_{exp}/V_{stm} sebesar 1.055 dengan STD dan COV masing-masing sebesar 24.6% dan 23.4%. Sedangkan untuk balok tinggi dengan beton mutu tinggi, nilai rata-rata, STD dan COV berturut-turut sebesar 0.810, 18.9% dan 24.6%.

Tabel 3. Balok tinggi beton normal tanpa tulangan badan

| No | Referensi | Tahun | Jumlah benda uji | V_{exp}/V_{stm} | | |
|----------------------------|----------------------|-------|------------------|-------------------|-------|-------|
| | | | | AVR | STD | COV |
| 1 | Smith and Vantsiotis | 1982 | 4 | 0.907 | 0.076 | 0.084 |
| 2 | de Paiva and Seiss | 1965 | 2 | 1.351 | 0.154 | 0.114 |
| Jumlah dan rata-rata total | | | 6 | 1.055 | 0.246 | 0.234 |

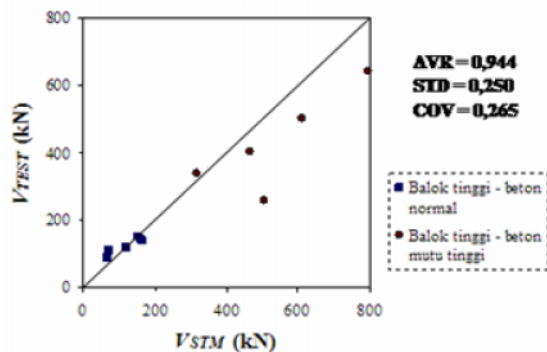
Tabel 4. Balok tinggi beton mutu tinggi tanpa tulangan badan

| No | Referensi | Tahun | Jumlah benda uji | V_{exp}/V_{stm} | | |
|----------------------------|-------------|-------|------------------|-------------------|-------|-------|
| | | | | AVR | STD | COV |
| 1 | Ch and Shin | 2001 | 3 | 0.910 | 0.134 | 0.148 |
| 2 | Tan et. al | 1997 | 2 | 0.661 | 0.221 | 0.334 |
| Jumlah dan rata-rata total | | | 5 | 0.810 | 0.199 | 0.246 |

Ketidakamanan dari metode STM dalam memprediksi kekuatan geser dari balok tinggi tanpa tulangan badan mungkin disebabkan karena kekuatan beton (f'_c) yang dipergunakan sesuai dengan ACI 318-2002 Apendik A, terlalu tinggi. Efek pengekanan yang disediakan oleh tulangan badan terhadap beton di daerah strut tidak ada sehingga kekuatannya menjadi lebih kecil.

Dengan data yang sangat terbatas ini, belum cukup dipakai sebagai pedoman untuk menentukan tingkat keakuratan metode STM oleh karena itu masih perlu dilakukan pengumpulan data yang lebih banyak sehingga secara statistik memenuhi.

Untuk mengetahui sebaran dari keseluruhan data yang ada untuk balok tinggi tanpa tulangan badan, maka plot antara V_{exp} dan V_{stm} dibuat seperti terlihat pada Gambar 6. Disini terlihat jelas bahwa data dari balok tinggi tanpa tulangan badan dengan beton mutu tinggi memiliki sebaran yang cukup besar dan 80% prediksi STM tidak aman. Sedangkan untuk balok dengan beton normal, sebaran datanya cukup dekat.



Gambar 6. Perbandingan antara V_{test} dan V_{stm} untuk seluruh balok tinggi tanpa tulangan badan

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Dari hasil analisis terhadap 151 buah balok tinggi dengan metode STM dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Metode STM dengan mengambil bentuk strut prismatis dan kekuatan elemen-elemennya mengikuti ACI 318-2002 Apendik A, mampu memprediksi kuat geser balok tinggi beton normal dengan tulangan badan secara aman dengan nilai AVR_{total} dari V_{TEST} / V_{STM} sebesar 1,154 dengan STD dan COV masing-masing 20.9% dan 18.9%. Namun metode STM menjadi tidak konservatif lagi bila mutu beton ditingkatkan $f'_c > 41$ MPa seperti ditunjukkan dari nilai AVR_{total} perbandingan kuat geser eksperimen terhadap kuat geser hasil analisis V_{TEST} / V_{STM} sebesar 0,958.

2. Pada balok tinggi beton bertulang tanpa adanya tulangan badan baik beton bermutu normal maupun beton mutu tinggi, prediksi kuat geser metode STM tidak konservatif walaupun terdapat dua buah data yang nilai perbandingan V_{TEST} / V_{STM} lebih dari 1,0.

Saran

Analisa yang telah dilakukan untuk balok tinggi tanpa tulangan badan menggunakan data yang sangat terbatas sehingga untuk dapat menarik kesimpulan yang lebih jelas diperlukan data hasil eksperimen yang lebih banyak. Disamping itu perlu juga dicoba untuk menggunakan betuk strut yang lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Putu Doddy atas bantuannya dalam pengumpulan dan menganalisa data eksperimen. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sehingga tulisan ini dapat dimuat pada jurnal.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2002. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute 318 – 02, Detroit.
- Ardana, P.D.H. 2003. *Perbandingan Kuat Geser balok Tinggi Beton Bertulang Berdasarkan Strut and Tie Model dan Metode SK SNI T15-1991-03 Terhadap Data Eksperimen*, Tugas Akhir, Program S1 Teknik Sipil, FT, Unud.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1991. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SK SNI T-15-1991-03)*, Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung.
- de Paiva, H.A.R., and Siess, C.P. 1965. *Strength and Behavior of Deep Beams in Shear*, *Proceedings*, ASCE, V.91, ST5, Oct., pp. 19-41.

- Kong, F.K., Robins, P.J., and Cole, D.F. 1970. *Web Reinforcement Effects on Deep Beams*, *ACI Structural Journal, Proceedings*, V.67, No.12, Dec., pp. 1010-1017.
- Lumantarna, B. 2002. *Merencanakan Beton Bertulang Secara Rasional, Dari Strut and Tie Sampai Modified Compression Field (Materi Kuliah Tamu di Program Teknik Sipil Unud)*, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- MacGregor, J.G. 1997. *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 3rd edition, Prentice-Hall, New Jersey.
- Nawy, E.G. 1998. *Beton Bertulang: Suatu Pendekatan Dasar*, Refika Aditama, Bandung.
- Oh, J.K. and Shin, S.W. 2001. *Shear Strength of Reinforced High Strength Concrete Deep Beams*, *ACI Structural Journal*, V.98, No.2, March-April, pp. 164-173.
- Smith, K.N. and Vantsiotis, A.S. 1982. *Shear Strength of Deep Beams*, *ACI Structural Journal, Proceedings*, V.79, No.3, May-June, pp. 201-213.
- Tan, K.H., Kong, F.K., Teng, S. and Guan, L. 1995. *High Strength Concrete Deep Beams with Effective Span and Shear Span Variations*, *ACI Structural Journal*, V.92, No.4, July-August, pp. 395-405.
- Tan, K.H., Teng, S., Kong, F.K. and Lu, H.Y. 1997. *Main Tension Steel in High Strength Concrete Deep and Short Beams*, *ACI Structural Journal*, V.94, No.6, November-Desember, pp. 752-768.
- Wang, C.K. and Salmon, C.G. 1985. *Design of Concrete Structure*, Harper and Row Inc.