

# INVESTIGASI EKSPERIMENTAL PERILAKU PROFIL BAJA RINGAN BERPENAMPANG PERSEGI AKIBAT INTERAKSI BEBAN TEKAN MEMUSAT DAN MOMEN LENTUR

Andi Muhdiar Kadir<sup>1)</sup>, Dedi Priadi<sup>1)</sup>, Eddy S. Siradj<sup>1)</sup>, Harkali Setiyono<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424

<sup>2)</sup>B2TKS- BPPT PUSPIPTEK

Tangerang Selatan-Banten, Indonesia 15314

E-mail : amkadir66@yahoo.com

Masuk tanggal : 25-02-2013, revisi tanggal : 07-03-2013, diterima untuk diterbitkan tanggal : 21-03-2013

## Intisari

**INVESTIGASI EKSPERIMENTAL PERILAKU PROFIL BAJA RINGAN BERPENAMPANG PERSEGI AKIBAT INTERAKSI BEBAN TEKAN MEMUSAT DAN MOMEN LENTUR.** Makalah ini merupakan bagian dari program penelitian yang di fokuskan pada pengembangan metode analisa kekuatan profil baja ber dinding tipis berbentuk pipa kotak (*Square Hollow Section/SHS*) akibat interaksi beban tekan memusat dan momen lentur yang didasarkan pada pendekatan teori mekanisme plastis dan elastis (*plastic mechanisms and elastic theories/cut-off strength*) dimana tingkat akurasinya akan diverifikasi menggunakan hasil pendekatan experimental. Pada tahap pertama penelitian ini, analisa kekuatan SHS didasarkan pada desain standar yang ada yaitu British Standard (BS 5950 Part 5 1987) yang menggunakan metode langsung (*direct method*) dan metode dua kanal (*double channels method*). Pada metode experimental dilakukan pengujian awal yaitu pengujian material dasar dari SHS dan pengujian utama yaitu pengujian kekuatan profil baja ber dinding tipis berbentuk pipa kotak akibat interaksi beban tekan memusat dan momen lentur. Data hasil uji material dasar digunakan sebagai data masukan pada analisis kekuatan profil baja ber dinding tipis berbentuk pipa kotak menggunakan British Standard sedangkan hasil uji kekuatan profil baja ber dinding tipis berbentuk pipa kotak dijadikan sebagai acuan dari metode analisis kekuatan yang digunakan. Hasil analisa kekuatan SHS menunjukkan bahwa hasil analisa kekuatan dengan metode *double channels* memberikan hasil yang mendekati hasil experimental (perbedaan sekitar 2 % sampai 7%) dibandingkan dengan metode langsung dan hal ini masih dalam batas-batas yang dapat diterima (*acceptable limits*)  $\pm 20$  %. Hasil pada tahap awal berupa hasil experimental dan hasil analisis kekuatan menggunakan standard desain cukup akurat dan akan digunakan sebagai pembandingan dengan hasil dari metode analisa kekuatan yang dikembangkan pada tahap penelitian selanjutnya.

*Kata kunci : Estimasi kekuatan, Profil pipa kotak, Kekuatan luluh, Lebar efektif, Kapasitas momen, Kekuatan lentur, Beban maksimum, Baja ber dinding tipis*

## Abstract

**BEHAVIOUR EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A THIN-WALLED STEEL SQUARE HOLLOW SECTION BEAM AFFECTED BY THE INTERACTION OF CONCENTRATED COMPRESSIVE LOAD AND BENDING MOMENT.** This paper is a part of research program that focused in developing a strength analytical method of a thin-walled steel square pipe (*Square Hollow Section/SHS*) affected by the interaction of concentrated-compressive load and bending moment that its based on plastic mechanisms and elastic theories (*cut-off strength*), and its accuracy will then be verified by data obtain from an experimental approach. In the first stage of this research program, the strength of SHS pipe is analyzed by using of existing code design namely British Standard (BS 5950 Part 5 1987) that is implemented according to a direct method and double channels one. In the experimental method is performing preliminary test that basic material identification and main test that strength measure of SHS under interaction of concentrated-compressive load and bending moment. The data test results of basic material is used as data input in strength analytical method of a thin-walled steel square pipe by British Standard meanwhile the test results of a thin-walled steel square pipe is use as reference of strength analysis method results. The results of SHS pipe strength show that the strength estimation using the double channels method has a close value to the experimental one (scattered in between 2% up to 7%) and this is within acceptable limits of  $\pm 20$  %. This first data results of experimental and strength analysis by design code are accurate enough and it will be compare with the result of developing a strength analytical method at the next step research.

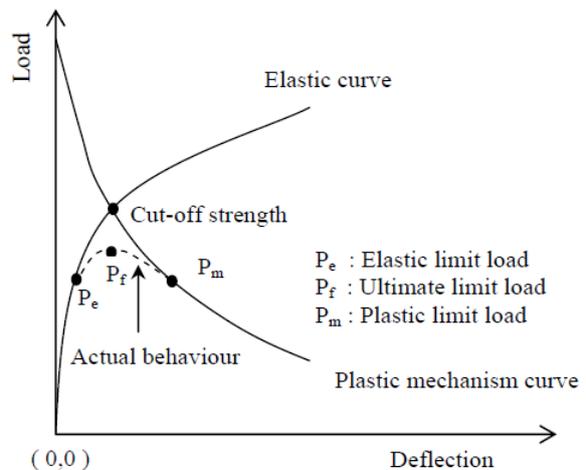
Keywords : Strength estimation, Square hollow section, Yield strength, Effective width, Moment capacity, Bending strength, Ultimate load, Cut-off strength, A thin-walled steel

## PENDAHULUAN

Profil pipa baja kotak berdinding tipis *square hollow section* (SHS) adalah salah satu tipe variasi dari profil baja berdinding tipis yang umum digunakan dalam struktur rangka (*structural framing*). Struktur baja ringan merupakan struktur baja yang ketebalannya relatif tipis yaitu sekitar 0,3 – 6,0 mm dengan rasio lebar terhadap tebal di setiap bagian struktur sangat besar. Struktur baja jenis ini dapat dibuat dari baja lembaran (*steel sheets*) melalui proses pengerjaan dingin (*cold forming*) seperti *press braking*, *bending braking* atau *cold rolling*. Penggunaan struktur baja ringan sangat luas dan banyak dijumpai pada desain konstruksi otomobil, gerbong kereta api, bangunan gedung dan industri, kapal, dan lain-lain. Karena rasio antara lebar dan tebal dari setiap elemen struktur sangat besar, maka tipe struktur ini cenderung mengalami lokal *buckling* akibat beban tekan. Proses kerusakan profil baja berdinding tipis yang mengalami beban tekan, umumnya diawali dengan pembentukan lokal *buckling* pada elemen tekan dan selanjutnya berkembang menjadi mekanisme kerusakan plastis lokal dan kemudian runtuh (*collapse*).

Di dalam metode konvensional, desain kekuatan struktur baja biasanya ditentukan berdasarkan faktor keamanan (*safety factor*) dimana besar kecilnya faktor keamanan yang digunakan dalam desain akan berpengaruh pada berat desain struktur baja yang dihasilkan. Untuk mengurangi berat desain struktur baja maka perlu dikaji dan dikembangkan suatu metode yang tidak terlalu tergantung pada penggunaan faktor keamanan dan metode ini akan dipelajari dan dikembangkan oleh penulis selama pelaksanaan program penelitian. Metode analisis desain yang dikembangkan didalam penelitian ini tidak akan menggunakan faktor keamanan di dalam analisis kekuatan sehingga dapat

digunakan untuk mendesain struktur baja yang mampu mendukung beban kerja dengan berat seringan mungkin. Jadi metode analisis yang dikembangkan disini diarahkan untuk menunjang desain struktur baja yang efektif dan efisien ditinjau dari segi teknis dan ekonomis.



Gambar 1. Metoda “cut-off strength”<sup>[1-2]</sup>

Penelitian ini diarahkan pada pengembangan metode analisis kekuatan dari profil baja ringan berbentuk pipa kotak SHS akibat interaksi beban memusat dan momen lentur (Gambar 1). Metode analisis ini didasarkan pada dua pendekatan yaitu pendekatan *plastic mechanisms* dan elastis. Metode ini disebut metode “cut-off strength” dan akurasiya akan diverifikasi dengan pendekatan eksperimental.

Pada tahap penelitian ini, dilakukan pengujian awal yaitu pengujian material dasar SHS untuk mengetahui karakteristik propertisnya dan pengujian utama yaitu pengujian kekuatan profil baja ringan berbentuk pipa kotak (parameter tunggal) dengan interaksi beban tekan memusat dan momen lentur. Analisis kekuatan awal yang akan dibandingkan dengan pengujian utama ini akan menggunakan kriteria desain berdasarkan British Standar (BS 5950 Part 5 1987). Standar ini merupakan salah satu

metode analisis prediksi kekuatan yang sudah ada dan umum dipakai. Selanjutnya bentuk kerusakan dari hasil pengujian utama uji ini akan digunakan untuk pemodelan pada pengembangan metode analisa prediksi kekuatan berdasarkan pada pendekatan teori *plastic mechanisms* dan elastis pada tahap berikutnya (eksperimen dengan banyak parameter).

## PROSEDUR PENELITIAN

### Pendekatan Analitis Berdasarkan British Standar (BS 5950 Part 5 1987)<sup>[3]</sup>

Kategori standar spesifikasi dari *web crushing/ web crippling* pada baja *cold-formed* dibagi menurut tipe dari bentuk (*beam*) dan beban yaitu:

- a. Tipe *beam*
  - Bentuk-bentuk yang mempunyai satu tebal web
  - I-beam dan bentuk-bentuk dengan penahan terhadap perputaran *web* (*web rotation*)
- b. Tipe dan posisi beban
  - Beban atau tumpuan tunggal yang dekat atau di ujung bebas.
  - Beban atau tumpuan tunggal yang jauh atau di ujung bebas.
  - Dua beban atau tumpuan berlawanan yang dekat atau di ujung bebas.
  - Dua beban atau tumpuan berlawanan yang jauh dari ujung bebas.

Beban-beban yang menyebabkan *local crushing* dari web-web beam pada titik tumpuan atau titik beban terkonsentrasi harus dievaluasi menggunakan persamaan yang diberikan dalam Tabel 1 dan 2.

Persamaan dalam tabel tersebut digunakan untuk kondisi sebagai berikut :  
 Beam dengan  $D/t \leq 200$  ,  $r/t \leq 6$   
 Decking dengan  $r/t \leq 7$  ,  $n/t \leq 210$  ,  $n/D \leq 3,5$

dimana :

D = tinggi keseluruhan *web* (mm)

t = tebal web (mm)

r = jari-jari bagian dalam dari belokan (mm)

n = panjang aktual dari *bearing load* (mm), dalam kasus yang sama dan beban-beban berlawanan terkonsentrasi tidak sama panjang nya maka dipilih yang mempunyai nilai n lebih kecil.

$P_w$  = ketahanan *web* tunggal terhadap beban terkonsentrasi (N)

c = Jarak ujung beam ke beban atau tumpuan (mm)

Konstanta c dari persamaan dalam Tabel 1 dan 2 mewakili nilai-nilai sebagai berikut :

$$c_1 = 1,22 - 0,22k$$

$$c_2 = 1,06 - 0,06(r/t) \leq 1,0 \text{ tapi tidak kurang dari } 0,50$$

$$c_3 = 1,33 - 0,33k$$

$$c_6 = 0,88 - 0,12m$$

$$c_{12} = 0,7 + 0,3(\Theta/90)^2$$

dimana

k =  $P_y/228$  dan  $P_y$  adalah kekuatan desain ( $N/mm^2$ )

m =  $t/1,9$

$\Theta$  = sudut (derajat) antara bidang *web* dan bidang *bearing surface* ( $45^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$ )

Beban terkonsentrasi ( $P_w$ ) dihitung dari persamaan dalam Tabel 1 dan 2 pada beam yang hanya mengalami *web crushing*, tetapi jika beam dibebani dengan kombinasi aksi bending dan *web crushing* maka pengaruh bending momen harus diperhitungkan. Untuk mempertimbangkan pengaruh bending, persamaan-persamaan berikut ini harus digunakan dalam mendesain beam yang mengalami kombinasi bending dan *web crushing*.

- a. *Beam-beam* atau bentuk-bentuk yang mempunyai satu tebal web

$$\frac{1.2F_w}{P_w} + \frac{M}{M_c} \leq 1.5 \quad ;$$

$$\frac{F_w}{P_w} \leq 1 \quad \frac{M}{M_c} \leq 1 \quad (1)$$

b. *I*-beam dan beam-beam dengan penahan terhadap perputaran *web* (*web rotation*)

$$\frac{1.1F_w}{P_w} + \frac{M}{M_c} \leq 1.5 \quad ;$$

$$\frac{F_w}{P_w} \leq 1 \quad \frac{M}{M_c} \leq 1 \quad (2)$$

dimana

$F_w$  = beban web memusat atau reaksi

$P_w$  = kemampuan beam memusat yang diperoleh berdasarkan Tabel 1 dan 2

$M$  = bending momen yang diaplikasikan pada titik dimana diaplikasikan beban

$F_w, M_c$  = kapasitas momen yang ditentukan berdasarkan suatu batasan tegangan tekan pada *web* dan lebar efektif dari elemen yang mengalami beban tekan. Standar BS 5950 Part 5 1987 utamanya digunakan untuk tebal profil sampai dengan 8 mm.

**Tabel 1.** Beam-beam atau bentuk-bentuk yang mempunyai satu tebal web<sup>[3]</sup>

Type and position of loadings	Total web resistance, $P_w$
<p>Single load or reaction</p> <p><math>c &lt; 1.5 D</math> Load or reaction near or at free end</p>	<p>Stiffened flanges</p> $P_w = t^2 k C_3 C_4 C_{12} (2060 - 3.8 (D/t)) \times (1 + 0.01 (W/t))$ <p>Unstiffened flanges</p> $P_w = t^2 k C_3 C_4 C_{12} (1350 - 1.73 (D/t)) \times (1 + 0.01 (W/t))$
<p>Single load or reaction</p> <p><math>c &gt; 1.5 D</math> Load or reaction far from free end</p>	<p>Stiffened and unstiffened flanges</p> $P_w = t^2 k C_1 C_2 C_{12} (3350 - 4.8 (D/t)) \times (1 + 0.007 (W/t))$
<p>Two opposite loads or reactions <math>e &lt; 1.5 D</math></p> <p><math>c &lt; 1.5 D</math> Loads or reactions near or at free end</p>	<p>Stiffened and unstiffened flanges</p> $P_w = t^2 k C_3 C_4 C_{12} (1520 - 3.57 (D/t)) \times (1 + 0.01 (W/t))$
<p>Two opposite loads or reactions <math>e &lt; 1.5 D</math></p> <p><math>c &gt; 1.5 D</math> Loads or reactions far from free end</p>	<p>Stiffened and unstiffened flanges</p> $P_w = t^2 k C_1 C_2 C_{12} (4800 - 14 (D/t)) \times (1 + 0.0013 (W/t))$

\*When  $W/t > 60$ , the factor  $(1 + 0.01 (W/t))$  may be increased to  $(0.71 + 0.015 (W/t))$ .  
 †When  $W/t > 60$ , the factor  $(1 + 0.007 (W/t))$  may be increased to  $(0.75 + 0.011 (W/t))$ .  
 NOTE. In this table  $P_w$  represents the total load or reaction for one solid web connecting top and bottom flanges. For beams with two or more such adjacent webs  $P_w$  should be determined for each individual web and the results added to obtain the total crushing load.

Profil baja *cold-formed* dapat berupa/berbentuk terbuka (baja berbentuk *channel*) atau tertutup (*square pipe*) dan harus dibuat sampai sambungannya rata atau dibending dengan sudut tidak lebih 135° dengan jari-jari internal tidak lebih dari 5t (t = tebal material).

Penentuan *moment capacity* didasarkan pada suatu batas tegangan tekan (*compression stress*) pada *webs* dan lebar efektif dari elemen-elemen tekan. Tebal benda uji juga dipertimbangkan dalam menghitung modulus penampang (*section properties*). Jika tebal material lebih kecil dari 3,2 mm, maka material dapat di asumsi terkonsentrasi pada garis tengah (*mid-line*) dari profil dan sekitar pojok-pojoknya diganti dengan titik pertemuan/*intersection* dari elemen-elemen datar (*flats element*). Karena tebal benda uji kurang dari 3,2 mm maka idealisasi luas penampang (*cross section*) dengan benda uji yang digunakan dalam analisis seperti pada Gambar 2.

**Tabel 2.** *I*-beam dan beam-beam dengan penahan terhadap perputaran *web*<sup>[3]</sup>

Type and position of loadings	Total web resistance, $P_w$
<p>Single load</p> <p><math>c &lt; 1.5 D</math> Load or reaction near or at free end</p>	<p>Stiffened and unstiffened flanges</p> $P_w = t^2 C_7 C_8 (8.8 + 1.11 (W/t))^{1/2}$
<p>Single load or reaction</p> <p><math>c &gt; 1.5 D</math> Load or reaction far from free end</p>	<p>Stiffened and unstiffened flanges</p> $P_w = t^2 C_3 C_4 C_8 (13.2 + 1.63 (W/t))^{1/2}$
<p>Two opposite loads or reactions <math>e &lt; 1.5 D</math></p> <p><math>c &lt; 1.5 D</math> Loads or reactions near or at free end</p>	<p>Stiffened and unstiffened flanges</p> $P_w = t^2 C_{10} C_{11} C_8 (8.8 + 1.11 (W/t))^{1/2}$
<p>Two opposite loads or reactions <math>e &lt; 1.5 D</math></p> <p><math>c &gt; 1.5 D</math> Loads or reactions far from free end</p>	<p>Stiffened and unstiffened flanges</p> $P_w = t^2 C_8 C_9 C_{11} (13.2 + 1.63 (W/t))^{1/2}$

NOTE. In this table  $P_w$  represents the total load or reaction for one solid web connecting top and bottom flanges. For beams with two or more such adjacent webs  $P_w$  should be determined for each individual web and the results added to obtain the total crushing load.

Sementara pada *web* akan mendukung distribusi tegangan lentur dan pada *bottom flange* akan mengalami tegangan tarik. Dengan memperhatikan lebar efektif pada *top flange*, maka distribusi tegangan yang dialami oleh benda uji seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Batas tegangan tekan pada *web* di hitung dengan formulasi:

$$P_o = [1,13 - 0,0019(D/t) (Y_s/280)^{0,5}] P_y \quad (3)$$

dimana :

$P_o$  = batas tegangan tekan/MPa

$D$  =  $h_w$  (tinggi web / mm),

$Y_s$  = tegangan yield material /MPa

$t$  = tebal web /mm

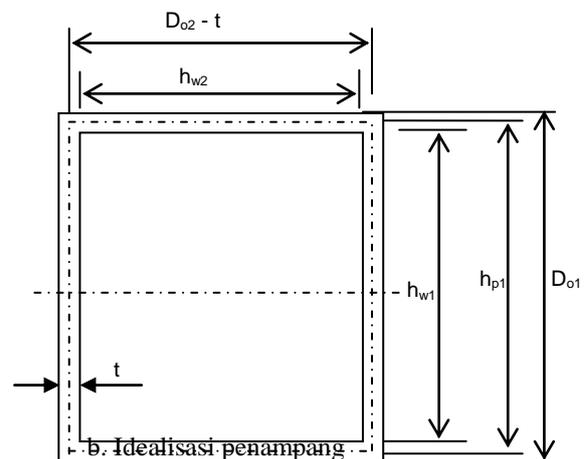
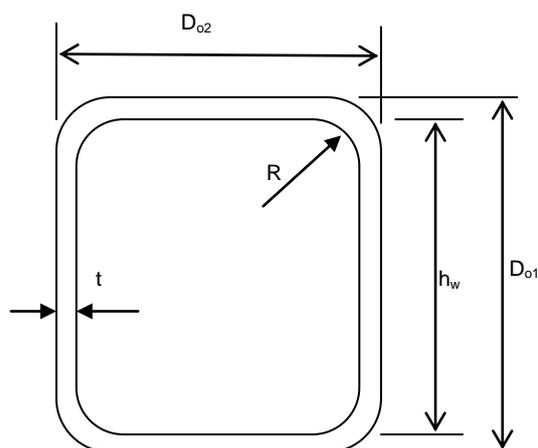
$P_y$  = tegangan desain /MPa =  $Y_s$

Perhitungan lebar efektif dari *top flange* dilakukan dengan menggunakan prosedur lebar efektif dari *stiffened element* dilihat tekanan merata. Aksi tegangan tekan pada elemen efektif ( $f_c$ ) sama dengan batas tegangan tekan pada *web* ( $P_o$ ).

Jika  $f_c/P_{cr} < 0,123$  maka  $b_{eff}/b_p = 1$

Jika  $f_c/P_{cr} > 0,123$  maka  $b_{eff}/b_p = [1 + 14 [(f_c/P_{cr})^{0,5} - 0,35]^4]^{-0,2}$  (4)

$f_c = P_o$ , dimana  $P_o$  sudah dihitung dengan



Gambar 2. Penampang dari Square Hollow Section/SHS<sup>[1]</sup>

Persamaan (3).

$P_{cr}$  = tegangan *local buckling* pada elemen.

$$P_{cr} = 185000 K(t/b)^2 \quad (5)$$

dimana:

$t$  = tebal *Top Flange* = tebal web

$b$  = lebar keseluruhan top flange =  $b_p$

$K$  = koefisien *local buckling* pada *stiffened element*

### Analisa Langsung

Koefisien lokal *buckling* dari elemen kaku *flange* atas (*the stiffened top flange element*) dihitung dari :

$$K = 7 - \frac{1,8h}{0,15 + h} - 0,091h^3; \quad h = h_p/b_p \quad (6)$$

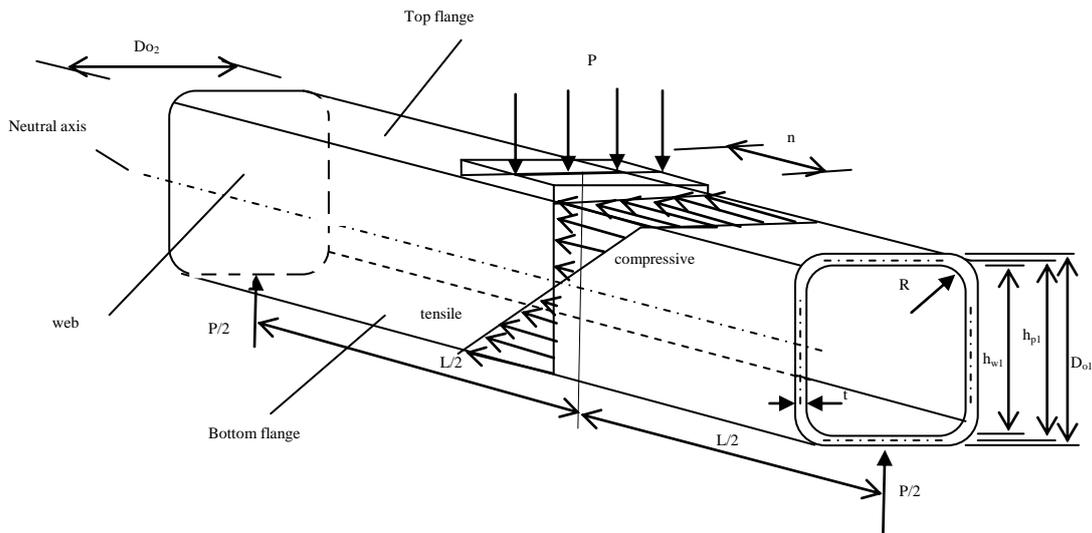
Posisi sumbu netral X-X dalam Gambar 4 dapat dihitung dengan persamaan

$$y_t = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

$$y_t = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3 + A_4 y_4 + A_5 y_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}$$

$$y_c = h_p - y_t$$

(7)



**Gambar 3.** Distribusi tegangan pada SHS akibat pembebanan ditengah bentangan<sup>[1]</sup>

Semua momen pada persamaan di atas dihitung dengan mengambil flange bawah (*the bottom flange*) sebagai *datum line*, dan momen kedua (*the secondary moment*) dari SHS ditentukan berdasarkan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} (I_{xx})_{SHS} &= \sum_i^n (I_{xx})_i \quad ; \\ (I_{xx})_i &= (I_c)_i + y_i^2 A_i \quad ; \\ (I_c)_i &= \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y^2 dA_i \end{aligned} \quad (8)$$

Karena itu maka momen kedua dari SHS terhadap garis pusat efektif (*the effective center line*) X-X adalah:

$$\begin{aligned} (I_{xx})_{SHS} &= \sum_i^5 (I_{xx})_i = \\ &t \left[ \left( \frac{b_p t^2 + 2h_w^3 + b_{eff} t^2}{12} \right) + (b_p y_t^2 + \right. \\ &\left. 2h_w \left( \frac{h_p}{2} - y_t \right)^2 + b_{eff} \cdot y_c^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Modulus elastis penampang (*the elastic section modulus*) adalah :

$$\text{Daerah Tekan: } (Z_c)_{SHS} = \frac{(I_{xx})_{SHS}}{y_c}$$

$$\text{Tarik: } (Z_t)_{SHS} = \frac{(I_{xx})_{SHS}}{y_t} \quad (10)$$

Berdasarkan Gambar 4 dan rumus di atas maka nilai dari  $(Z_c)_{SHS}$  menjadi lebih kecil dibandingkan dengan nilai dari  $(Z_t)_{SHS}$  sehingga kondisi luluh (*Yielding*) pertama kali terjadi pada daerah tekan. Kapasitas momen (*the moment of capacity*) dari SHS adalah sebagai berikut:

$$(M_c)_{SHS} = P_o \cdot (Z_c)_{SHS} \quad (11)$$

### Analisa Dengan *Double Channels*

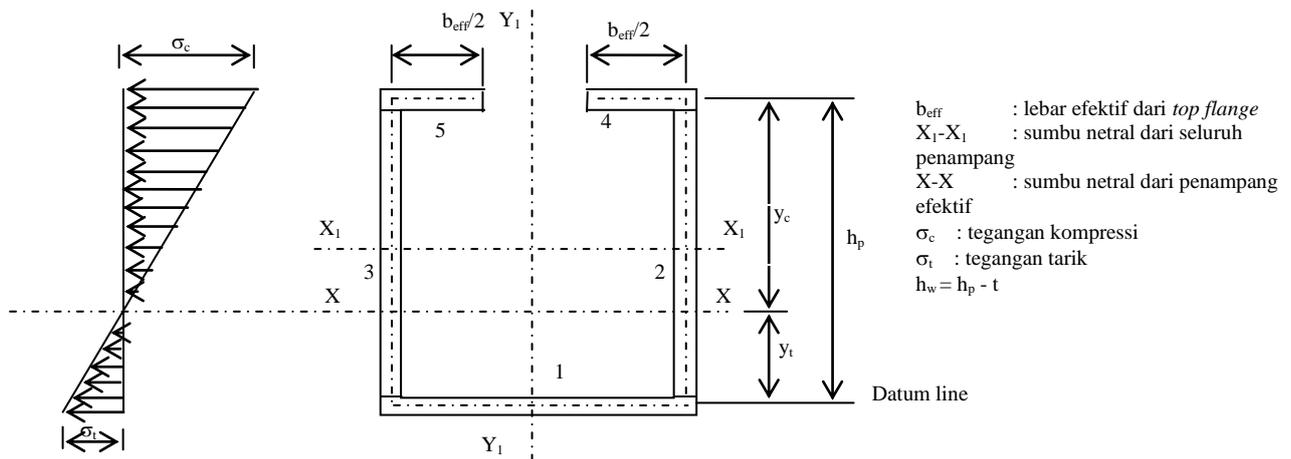
Dalam analisa ini, SHS diasumsi dibentuk dari dua profil kanal yang kedua ujung bebasnya (*free edges*) kedua flangennya digabungkan. Kekuataannya kemudian ditentukan menurut penjumlahan dari analisa kekuatan setiap kanal.

Koefisien lokal *buckling* dari elemen flange atas tidak kaku (*the unstiffened top flange element*) dihitung dari :

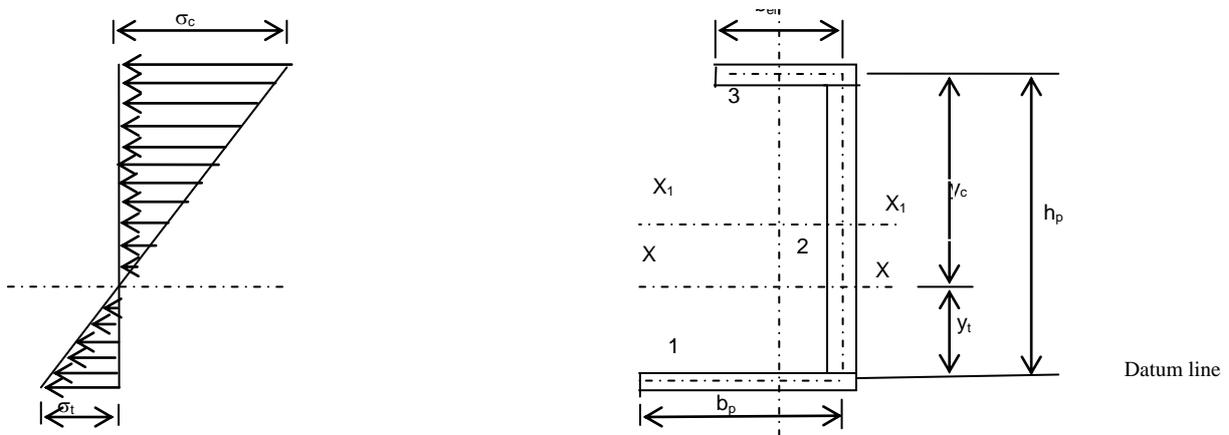
$$K = 1,28 - \frac{0,8h}{2+h} - 0,0025h^2 \quad ; \quad h = h_p/b_p \quad (12)$$

Dengan mengacu pada Gambar 4, posisi sumbu netral X-X dihitung yaitu :

$$y_t = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad ; \quad y_c = h_p - y_t \quad (13)$$



Gambar 4. Penampang efektif SHS (box section) dan distribusi stress pada webs<sup>[1]</sup>



Gambar 5. Penampang efektif dari profil kanal dan distribusi stress pada web-nya<sup>[1]</sup>

Momen kedua (*the secondary moment*) dari penampang efektif yang ditunjukkan dalam Gambar 5 dimana sumbu X-X ditentukan dengan cara yang sama dengan SHS dan diformulasikan seperti persamaan berikut:

$$(I_{xx})_{Ch} = \sum_i^3 (I_{xx})_i = t \left[ \left( \frac{b_p t^2 + h_w^3 + b_{eff} t^2}{12} \right) + (b_p y_t^2 + h_w \left( \frac{h_p}{2} - y_t \right)^2 + b_{eff} \cdot y_c^2) \right] \quad (14)$$

Tegangan bending yang dilakukan pada penampang kanal menunjukkan bahwa nilai maksimumnya terjadi pada daerah tekan. Karena itu, maka penampang kanal akan terjadi luluh (*yield*) pertama kali pada daerah tekannya sehingga kapasitas momennya  $(M_c)_{Ch}$  dihitung menggunakan modulus penampang elastis daerah tekan yaitu:

$$(M_c)_{SHS} = P_o \cdot (Z_c)_{Ch} \quad ;$$

$$(Z_c)_{Ch} = \frac{(I_{xx})_{Ch}}{y_c} \quad (15)$$

### Perhitungan Beban Crippling Maksimum dari Web

Pada penelitian ini, beban web crippling ( $F_{cb}$ ) diestimasi menurut persyaratan dari pembebanan *interior one-flange* (IOF) seperti ditunjukkan dalam Gambar 6. Beban *web crippling* ( $F_{cb}$ ) dihasilkan dari : Untuk beams atau shapes yang memiliki tebal web tunggal adalah :

$$\frac{1.2 F_w}{P_w} + \frac{M}{M_c} \leq 1.5 \quad ;$$

$$\frac{F_w}{P_w} \leq 1 \quad \frac{M}{M_c} \leq 1$$

dimana  $M = M_o = F_{cb} (L-n)/4$

sehingga 
$$\frac{1.2F_{cb}}{P_w} + \frac{F_{cb}(L-n)}{4M_c} \leq 1.5$$

atau 
$$F = F_{CB} = \frac{6P_w M_c}{4.8M_c + P_w(L-n)} \quad (16)$$

dimana untuk posisi pembebanan *interior one flange* (IOF) dengan  $e \geq 1,5D$ , maka beban maksimum *web crippling* untuk *beams* atau *shapes* yang memiliki tebal *web* tunggal adalah:

$$P_w = t^2 k c_1 c_2 c_{12} [3350 - 4,6(D/t)(1 + 0,007(n/t))] \quad (17)$$

eksperimental, uji tarik pertama kali dilakukan untuk mengkaji sifat-sifat mekanik dari material dasar yang digunakan untuk membuat *a thin-walled steel square pipe (square hollow section/SHS)*.

Pada analisa langsung, nilai dari  $M_c$  dalam persamaan (16) diganti dengan  $(M_c)_{SHS}$  dan menghasilkan  $F_{cb}$  yang lain yaitu kekuatan beam SHS di bawah pembebanan IOF. Dalam kasus analisa *double channels*, nilai dari  $(M_c)_{Ch}$  diganti untuk  $(M_c)$  dalam persamaan (16) dan kekuatan dari SHS dihitung dari :

$$(F_{cb})_{Ch} = 2 F_{cb} \quad (18)$$

dimana

$(F_{cb})_{Ch}$  = kekuatan SHS yang diestimasi menggunakan analisa *double channels*

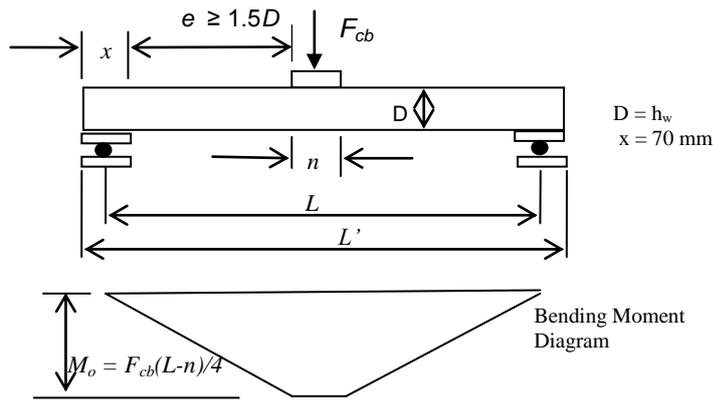
$F_{cb}$  = Kekuatan yang diperoleh dari setiap penampang canal

### Pendekatan Eksperimental

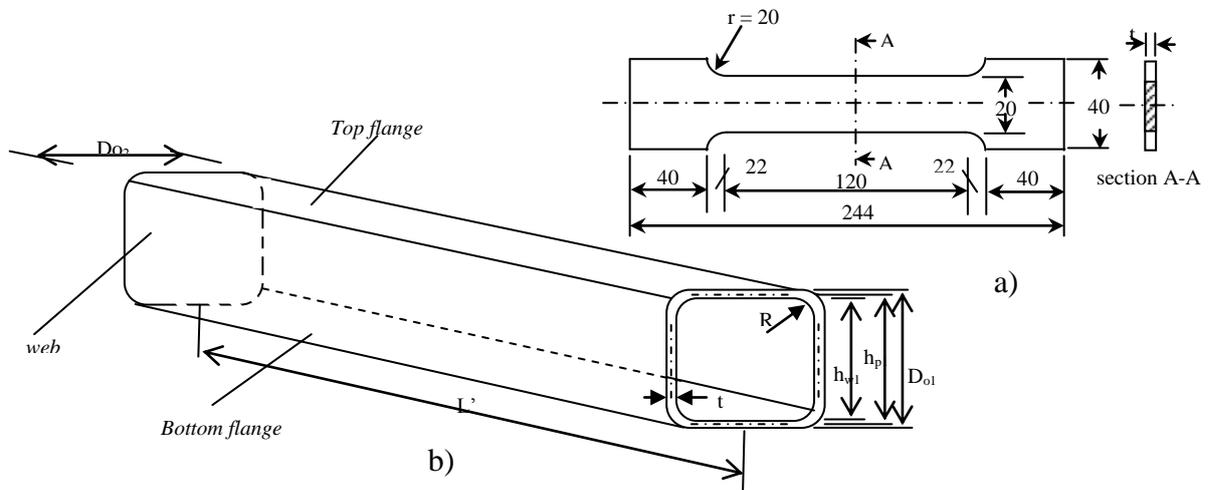
Pendekatan eksperimental dilakukan dalam dua tahap yaitu uji pendahuluan dan utama. Pada uji pendahuluan, sifat dari material dasar diidentifikasi melalui uji-uji tarik, kekerasan, metalografi, dan komposisi kimia. Dalam proses pendekatan

Material dasar adalah lembaran baja karbon (tanpa dilapisi Zn atau Zn/Al) dan benda uji didesain sesuai Standard JIS Z 2201 No. 13A (Lihat Gambar 7a). Uji tarik dilakukan pada suatu mesin uji RME 100 Schenck Trebel yang mempunyai kapasitas maksimum 100 kN. Benda uji tarik diuji pada temperatur ruang sampai putus dan selama pengujian, hubungan beban tarik statik dengan deformasi benda uji selalu dimonitor dengan alat *extensometer* yang dipasang pada panjang ukur awal (*gauge length*) 100 mm. Uji kekerasan dilakukan dengan metode Vickers (*micro hardness*) karena benda uji tipis. Sementara uji komposisi kimia dilakukan dengan mesin OES ARC-MET 930 SP (METOREX) dengan standar uji ASTM A751 (E 403 Method with OES system). Pemeriksaan metalografi menggunakan mikroskop optik.

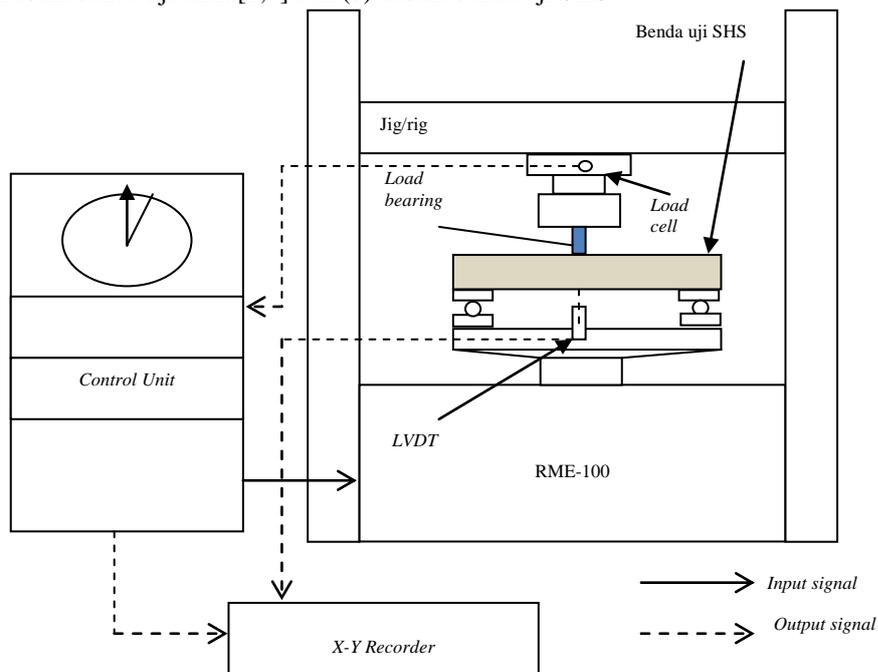
Tahap selanjutnya dari pendekatan eksperimental adalah pengujian dengan interaksi pembebanan tekan memusat dan momen lentur pada 24 benda uji. *Beam thin-walled steel square pipe (Square Hollow Section/SHS)*. Benda uji dibagi dalam dua parameter panjang balok penekan / *load bearing length* ( $n = 15$  mm dan 30 mm). Sementara, parameter lain yaitu tinggi *web*, lebar *flange*, dan arah pengerolan. Benda uji dibentuk dari baja karbon seperti disebutkan di atas dan desain detailnya dapat dilihat pada Gambar 7b. Uji interaksi beban tekan memusat dan momen lentur juga dilakukan pada temperatur ruang menggunakan mesin uji RME 100 Schenck Trebel dengan kapasitas maksimum 100 kN sampai benda uji SHS rusak



**Gambar 6.** (a) Persyaratan jarak antara titik pembebanan dan tumpuan untuk mendapatkan kekuatan akibat kombinasi *web crushing* dan *bending*, (b) Bending moment  $M_o$  diagram<sup>[1]</sup>



**Gambar 7.** (a) Desain benda uji tarik [1,4] dan (b) desain benda uji SHS<sup>[4]</sup>



**Gambar 8.** Test sistem dari interaksi beban tekan memusat dan momen lentur<sup>[1]</sup>

Test sistem ditunjukkan pada Gambar 8 dimana sensor defleksi (*Linear Variable Displacement Transducers/ LVDT*) digunakan untuk mengukur defleksi vertikal pada elemen *flange*. Perilaku aktual dari hubungan beban dengan defleksi selalu dimonitor selama pengujian dan diplot dengan *X-Y recorder*. Kekuatan interaksi beban tekan memusat dan momen lentur dari benda uji diukur melalui peralatan indikator beban dari mesin uji dan juga dari beban uji maksimum dari perilaku eksperimental beban-defleksi yang dihasilkan. Mode kerusakan dari setiap benda uji diobservasi dan pengulangan dalam bentuk mekanisme kerusakan plastik lokal (*local plastic failure mechanisms*) untuk pemodelan pada pengembangan metode analisis kekuatan selanjutnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil rata-rata uji tarik, uji kekerasan serta uji komposisi kimia material dasar seperti pada Tabel 3-5. Sementara hasil pemeriksaan metalography seperti pada Gambar 9. Hasil pendekatan analitis dan eksperimental dari interaksi beban tekan memusat dan momen lentur pada 24 benda uji pipa kotak baja berdingding tipis SHS ditunjukkan dalam Tabel 6. Foto pelaksanaan uji ini ditunjukkan pada Gambar 10. Dari Tabel 3 terlihat sifat-sifat mekanik dari material dasar SHS diidentifikasi yaitu kekuatan luluhnya dan modulus elastis cukup rendah (maksimum  $\sigma_y=173$  MPa dan  $E= 86500$  MPa).

**Tabel 5.** Pemeriksaan komposisi kimia dari material dasar SHS

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	W
(%)	0,027	0,03	0,22	0,021	0,17	0,0018	0,040	0,045	0,001	0,001

Kekuatan yield ( $\sigma_y$ ) dan modulus elastis (E) arah roll ( $0^\circ$ ) lebih tinggi dari yang tegak lurus dengan pengerolan ( $90^\circ$ ). Sedangkan dari Tabel 4 terlihat nilai kekerasannya cenderung sama. Dari Tabel 5 terlihat bahwa unsur karbon (C), mangan (Mn) dan nikel (Ni) nilainya cukup rendah. Dari Gambar 9 terlihat bahwa struktur mikronya terdiri dari ferit. Bentuk butiran yang searah dengan pengerolan cenderung sama (*uniform*) dan agak panjang-panjang. Sedangkan butiran yang tegak lurus arah pengerolan cenderung bulat.

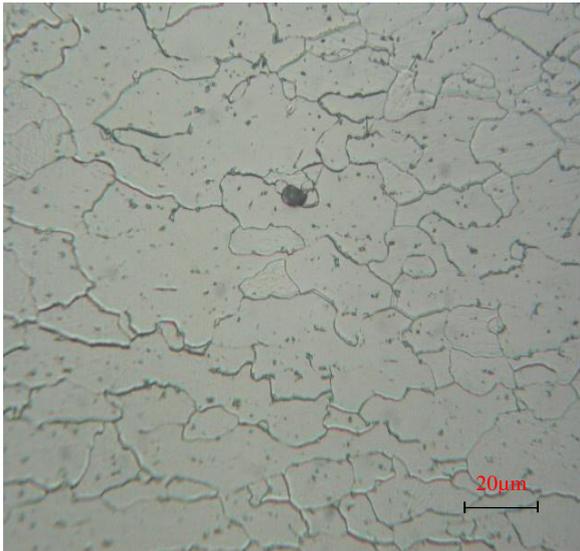
Dari semua hasil pemeriksaan material ini diketahui bahwa material dasar SHS ini adalah *sheet plate cold coil* (SPCC) yang memiliki keuletan yang berdingding tipis SHS akibat pembebanan IOF dengan British Standar (BS 5950 Part 5 1987).

**Tabel 3.** Hasil pengujian tarik pada material dasar SHS

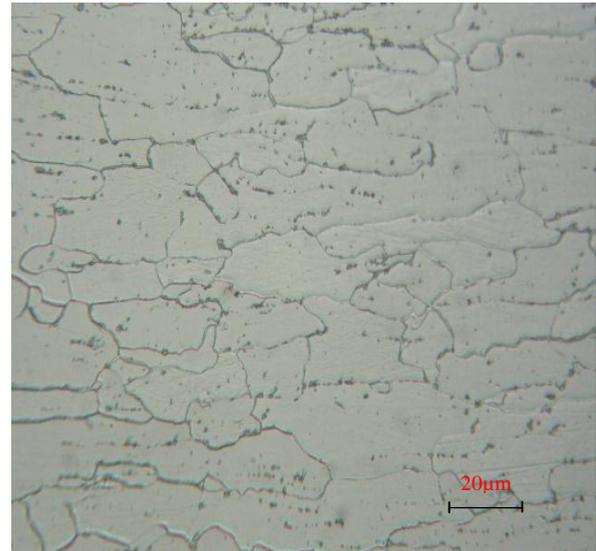
t (mm)	Arah roll ( $^\circ$ )	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{ult}$ (MPa)	E (MPa)
1,2	0	173	315	86500
	45	165	326	82500
	90	162	300	81000

**Tabel 4.** Hasil pengujian kekerasan pada material dasar SHS (Vickers micro hardness, F=3kg)

Tt (mm)	Arah roll ( $^\circ$ )	HV
1,2	0	84,2
	45	86,4
	90	84,8



(a)



(b)

**Gambar 9.** Hasil pengujian Metalografi (a)  $t = 1,2$  mm, melintang (tegak lurus pengerolan, 500x), (b)  $t = 1,2$  mm, memanjang (searah pengerolan, 500x)



**Gambar 10.** Foto set up/ sistem uji dan mekanisme kerusakan akibat interaksi beban uji tekan memusat dan momen lentur

Hasil perbandingan antara estimasi kekuatan SHS akibat interaksi beban tekan memusat dan momen lentur yang dihasilkan dari BS 5950 Part 5 1987 ( $F_{cb}$ ) dan eksperimental ( $F_{exp}$ ) ditunjukkan pada Gambar 11. Nilai  $F_{cb}$  dihasilkan dari persamaan 16 dan 17 (BS 5950 Part 5 1987) dimana ada dua metode analisa kekuatan SHS yaitu  $F_{cb}$  dari SHS *beam*

yang memiliki tebal web tunggal (analisa langsung menggunakan *box section*) dan  $F_{cb}$  dari 2x profil kanal yang memiliki tebal *web* tunggal (analisa menggunakan *double channels* yang disambung/ digabung menjadi *box section*). Sementara itu,  $F_{exp}$  adalah hasil eksperimental dari 24 benda uji *square hollow section/SHS*.

**Tabel 6.** Perbandingan hasil desain standar dan eksperimental (SHS-1,2-56-RK)

Id	t <sub>f</sub> (mm)	D <sub>o2</sub> (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	D <sub>o1</sub> (mm)	Desain standar BS 5950 Part 5 1987		Kekuatan SHS dengan Eksperimental F <sub>exp</sub> (kN)	$\frac{F_{cb}}{F_{exp}}$		Catatan
					F <sub>(cb)SHS</sub> (kN)	F <sub>(cb)Ch</sub> (kN)		$\frac{F_{(cb)SHS}}{F_{exp}}$	$\frac{F_{(cb)Ch}}{F_{exp}}$	
1-90-250-15-1,2	1,2	57,33	1,2	59,69	3,78	7,56	6,50	0,58	1,16	n = 15 mm L = 207 mm Arah roll : 90°
2-90-250-15-1,2	1,2	57,88	1,2	59,90	3,79	7,58	6,50	0,58	1,17	
3-90-250-15-1,2	1,2	58,75	1,2	58,97	3,78	7,56	6,51	0,58	1,16	
1-90-280-30-1,2	1,2	59,32	1,2	59,52	3,70	7,40	7,49	0,49	0,99	n = 30 mm L = 237 mm Arah roll : 90°
2-90-280-30-1,2	1,2	58,14	1,2	59,75	3,69	7,39	7,20	0,51	1,03	
3-90-280-30-1,2	1,2	61,58	1,2	58,62	3,70	7,40	7,45	0,50	0,99	
1-0-250-15-1,2	1,2	58,62	1,2	59,02	3,69	7,39	6,52	0,57	1,13	n = 15 mm L = 207 mm Arah roll : 0°
2-0-250-15-1,2	1,2	59,25	1,2	58,88	3,70	7,39	6,56	0,56	1,13	
3-0-250-15-1,2	1,2	59,07	1,2	57,70	3,67	7,35	6,51	0,56	1,13	
1-0-280-30-1,2	1,2	59,06	1,2	61,29	3,69	7,38	7,85	0,47	0,94	n = 30 mm L = 237 mm Arah roll : 0°
2-0-280-30-1,2	1,2	59,95	1,2	58,72	3,65	7,31	7,23	0,51	1,01	
3-0-280-30-1,2	1,2	60,59	1,2	58,25	3,65	7,30	7,49	0,49	0,97	
Pengukuran statistik							Nilai rata-rata	0,53	1,07	
							Standar deviasi	0,042	0,086	

**Tabel 7.** Perbandingan hasil desain standar dan eksperimental (SHS-1,2-106-RK)

Id	t <sub>f</sub> (mm)	D <sub>o2</sub> (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	D <sub>o1</sub> (mm)	Desain standar BS 5950 Part 5 1987		Kekuatan SHS dengan Eksperimental F <sub>exp</sub> (kN)	$\frac{F_{cb}}{F_{exp}}$		Catatan
					F <sub>(cb)SHS</sub> (kN)	F <sub>(cb)Ch</sub> (kN)		$\frac{F_{(cb)SHS}}{F_{exp}}$	$\frac{F_{(cb)Ch}}{F_{exp}}$	
1-90-400-15-1,2	1,2	109,58	1,2	110,36	4,85	9,71	8,95	0,54	1,08	n = 15 mm L = 357 mm Arah roll : 90°
2-90-400-15-1,2	1,2	108,86	1,2	110,56	4,85	9,70	9,53	0,51	1,02	
3-90-400-15-1,2	1,2	108,70	1,2	111,49	4,86	9,72	8,95	0,54	1,09	
1-90-430-30-1,2	1,2	108,72	1,2	109,81	4,75	9,50	9,40	0,51	1,01	n = 30 mm L = 387 mm Arah roll : 90°
2-90-430-30-1,2	1,2	109,43	1,2	110,94	4,76	9,52	10,32	0,46	0,92	
3-90-430-30-1,2	1,2	108,09	1,2	111,80	4,76	9,53	9,58	0,50	0,99	
1-0-400-15-1,2	1,2	105,74	1,2	110,78	4,67	9,34	8,36	0,56	1,12	n = 15 mm L = 357 mm Arah roll : 0°
2-0-400-15-1,2	1,2	108,86	1,2	110,20	4,68	9,35	9,48	0,49	0,99	
3-0-400-15-1,2	1,2	105,55	1,2	110,46	4,67	9,33	9,39	0,50	0,99	
1-0-430-30-1,2	1,2	105,90	1,2	110,29	4,71	9,42	9,18	0,51	1,03	n = 30 mm L = 387 mm Arah roll : 0°
2-0-430-30-1,2	1,2	106,85	1,2	111,17	4,72	9,44	9,68	0,49	0,98	
3-0-430-30-1,2	1,2	108,34	1,2	109,60	4,71	9,42	9,30	0,51	1,01	
Pengukuran statistik							Nilai rata-rata	0,51	1,02	
							Standar deviasi	0,027	0,054	

Catatan: F<sub>(cb)SHS</sub> : Analisa langsung dengan *box section*, F<sub>(cb)Ch</sub>: Analisa menggunakan double channels yang digabung menjadi *box section* ; L : jarak tumpuan, ; n : load bearing length

Gambar 11a dan 11b menunjukkan akurasi dari perbandingan kedua metode analisa kekuatan SHS dengan eksperimental (F<sub>exp</sub>) untuk tebal 1,2 mm. Berdasarkan analisa statistik menunjukkan bahwa data analisa langsung dengan tebal 1,2 mm dengan tinggi web 56 mm mempunyai perbedaan rata-rata -47% dengan data aktual dengan standar deviasi 0,042, sedangkan data analisa langsung dengan tebal 1,2 mm dengan tinggi web 106 mm mempunyai perbedaan rata-rata -49% dengan data aktual dengan standar deviasi 0,027. Hal ini sudah di luar scatter

batas penerimaan (*acceptable limits*) ± 20 %. Selanjutnya data analisa *double channels* dengan tebal 1,2 mm dan tinggi web 56 mm mempunyai perbedaan rata-rata +2% dengan data aktual dengan standar deviasi 0,086, sedangkan data analisa *double channels* dengan tebal 1,2 mm dan tinggi web 106 mm mempunyai perbedaan rata-rata +7% dengan data aktual dengan standar deviasi 0,054. Kondisi ini masih dalam scatter batas penerimaan (*acceptable limits*) ± 20 %.

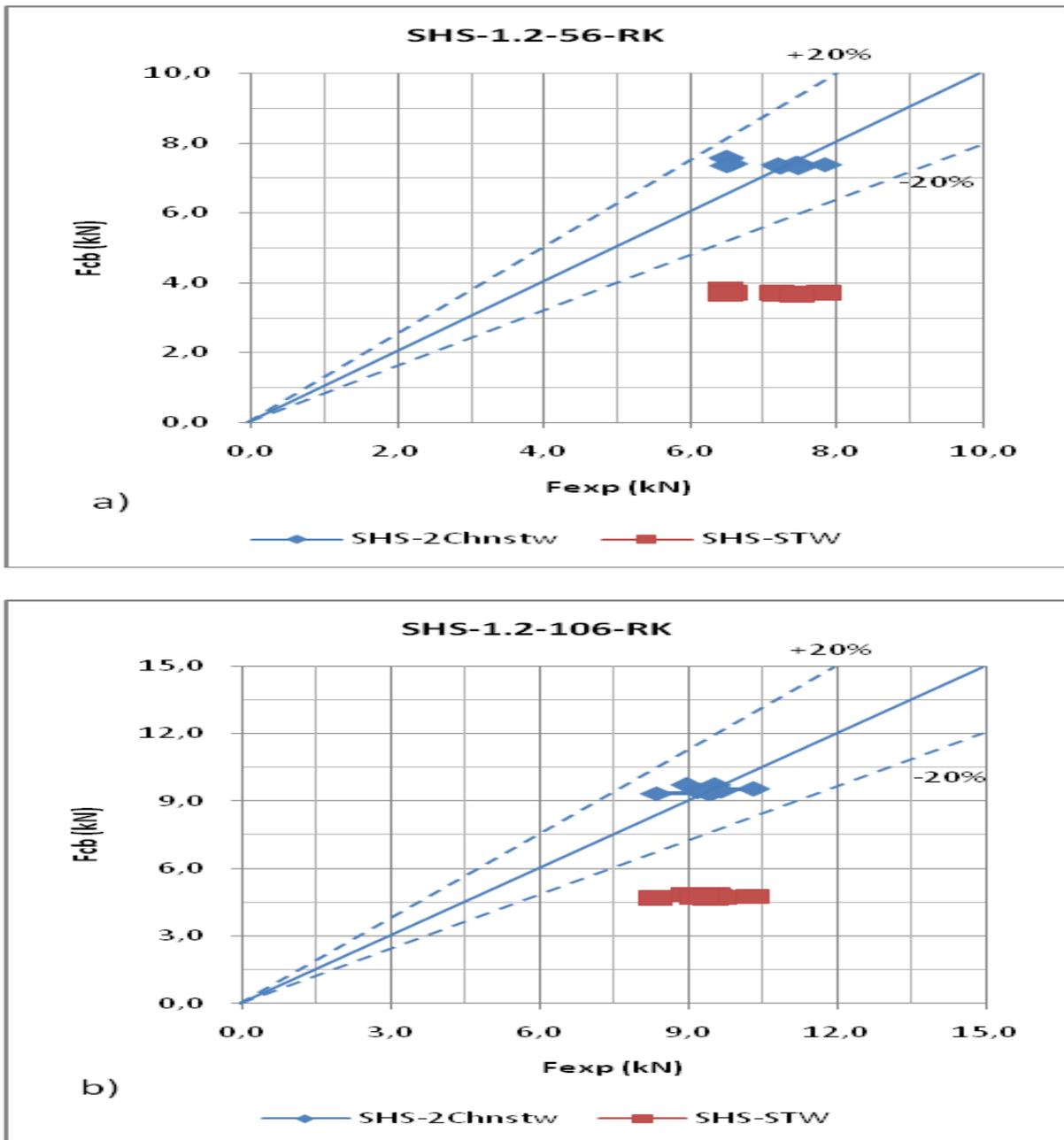
Dalam kasus analisa langsung, akurasi dari data analisa yang dihasilkan berbeda

dan jauh dari batasan penerimaan (*acceptable limits*)  $\pm 20\%$ . Sementara itu, data analisa yang dihasilkan dari analisa *double channels* dalam *scatter* batasan penerimaan  $\pm 20\%$  dan cenderung berada pada daerah konservatif.

Akurasi dari desain standar BS 5950 Part 5 1987 juga diplot pada Analisa statistik ditunjukkan dalam Tabel 6 dan 7 dimana data analisis cenderung *over estimate* dengan eksperimental yang lain sebesar  $+7\%$  dan  $+2\%$  dengan standar deviasi 0,086

dan 0,054. Sementara itu, data estimasi hasil analisa langsung sangat konservatif sebesar  $-47\%$  dan  $-49\%$  dengan standar deviasi 0,042 dan 0,027.

Berdasarkan pembahasan di atas terlihat bahwa analisa kekuatan dengan menggunakan *double channels* lebih baik dibandingkan analisa langsung dalam mengestimasi kekuatan SHS akibat kombinasi beban tekan memusat dan momen lentur.



**Gambar 11.** Perbandingan  $F_{cb}$  dan  $F_{exp}$  dari profil SHS dengan tebal 1,2 mm

## KESIMPULAN

Makalah ini menyajikan studi lanjutan dari program penelitian dimana pada tahap ini difokuskan pada aplikasi desain standar BS 5950 Part 5 1987 untuk menganalisa kekuatan *square hollow section/ SHS beams* akibat pembebanan *interior one-flange loading (IOF)*. Ada dua pendekatan yang berbeda dalam menerapkan desain standar BS 5950 Part 5 1987, yaitu analisa langsung dan *double channels*.

1. Hasil pengujian pendahuluan (eksperimen awal) berupa pengujian material dasar menunjukkan bahwa material dasar SHS adalah material baja lembaran rol dingin (*sheet plate cold coil/SPCC*) yang mempunyai kekuatan luluh dan kekerasan yang rendah. Kekuatan luluh 173 MPa arah pengerolan dan 165 MPa arah tegak lurus pengerolan (material ini memiliki keuletan yang tinggi). Nilai tegangan luluh inilah yang dipakai dalam analisa kekuatan menggunakan desain standar BS 5950 Part 5 1987 dimana hasilnya dibandingkan atau diverifikasi dengan hasil pengujian utama.
2. Pada analisa awal, desain standar langsung digunakan untuk mengestimasi kekuatan beam yang diteliti, sementara analisa yang terakhir, beam yang diinvestigasi diasumsi dibentuk dari *double channels* dengan mengabung ujung-ujung bebas (*free edges*) pada kedua *flange*-nya. Hasil kedua metode analisa diverifikasi menggunakan hasil pengujian utama (eksperimental utama) yaitu hasil pengukuran aktual pada sejumlah pengujian kekuatan *SHS beams* dengan desain yang sama dengan *SHS beam* yang diinvestigasi akibat pembebanan IOF sampai rusak. Verifikasi menunjukkan bahwa data estimasi dari

analisa *double channels* sangat dekat dengan hasil eksperimental dibandingkan dengan data analisa langsung.

3. Akurasi dari desain standar BS 5950 Part 5 1987 melalui analisa statistik menunjukkan data analisis dengan *double channel* cenderung *overestimate* dengan eksperimental sebesar +7 % dan +2 % dengan standar deviasi 0,086 dan 0,054. Sementara itu, data estimasi hasil analisa langsung sangat konservatif sebesar -47 % dan -49 % dengan standar deviasi 0,042 dan 0,027. Dengan demikian maka analisa kekuatan dengan menggunakan *double channels* lebih baik dibandingkan analisa langsung dalam mengestimasi kekuatan SHS akibat kombinasi beban tekan memusat dan momen lentur.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Laporan penelitian ini dibiayai oleh pemerintah Indonesia melalui proyek program doktor di Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). Saya mengucapkan banyak terima kasih atas bantuan yang tak ternilai yang diberikan oleh para insinyur dan teknisi dari Balai besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) khususnya saat investigasi secara eksperimental. Penulis pertama juga mengucapkan terima kasih kepada Universitas Indonesia yang telah memberikan kesempatan untuk mengambil program doktor di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kadir M. Andi, et al. 2011. *Strength Analysis of a Thin-Walled Steel Square Hollow Section Beam Affected by the Interaction of Concentrated-Compressive Load and Bending Moment*, Quality in

Research (QIR), University of Indonesia.

- [2] Harkali Setiyono. 1994. *Web crippling of cold-formed plain channel steel section beams*, PhD Thesis, University of Strathclyde, UK.
- [3] British Standard Institution. 1987. *Structural Use of Steelwork in Building – Code of Practice for Design of Cold-formed Sections*, BS 5950, Part 5.
- [4] Japanese Standards Association. 2009. *JIS Handbook – ferrous materials & metallurgy I*. pp. 34.

## **RIWAYAT PENULIS**

**Andi M. Kadir**, lahir 23 Juni 1966 di Bulukumba - Sulawesi Selatan. Lulus S<sub>1</sub> teknik mesin (konstruksi) tahun 1990 dan lulus S<sub>2</sub> teknik mesin (konstruksi) tahun 2001 di Universitas Hasanuddin Makassar. Tahun 2009 melanjutkan program doktor/S3 pada jurusan teknik metalurgi dan material di Universitas Indonesia. Sejak Maret 1992 bekerja di B2TKS BPP-Teknologi pada bidang kajian struktur dan jabatan fungsional sekarang sebagai Peneliti Utama (IV.d) pada bidang teknik struktur dengan sejumlah publikasi ilmiah nasional dan internasional.

