

## **PENGEMBANGAN METODE EVALUASI KEKUATAN PROFIL BAJA PERSEGI MENGGUNAKAN PEMANFAATAN GABUNGAN TEORI MEKANISME PLASTIS DAN ELASTIS**

### **DEVELOPMENT OF STRENGTH EVALUATION METHOD OF A SQUARE HOLLOW STEEL SECTION USING THE APPLIACATION OF COMBINED THEORIES OF PLASTIC MECHANISMS AND ELASTIC APPROACH**

**Andi M. Kadir<sup>a</sup>, Dedi Priadi<sup>b</sup>, Eddy S. Siradj<sup>b</sup>, Harkali S<sup>a</sup>.**

<sup>a</sup>B2TKS-Deputi Bidang TIRBR-BPPT

<sup>b</sup>Dosen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik-UI, Depok  
e-mail : amkadir66@yahoo.com

#### **Abstrak**

Metode analisis disain yang dikembangkan didalam penelitian ini tidak menggunakan faktor keamanan sehingga dapat digunakan untuk mendisain struktur baja yang mampu mendukung beban kerja dengan berat yang ringan mungkin sehingga diperoleh struktur yang efektif dan efisien dari segi teknis dan ekonomi. Dalam penelitian ini, suatu metode cut-off strength digunakan sebagai dasar untuk memprediksi kekuatan profil baja ringan berpenampang persegi (SHS) akibat interaksi beban tekan memusat dan momen lentur. Metode cut-off strength diilustrasikan dalam bentuk dua kurva beban-defleksi plastis dan elastis, dimana nilai beban diperpotongan kedua kurva tersebut diasumsikan sebagai kekuatan teoritis profil baja SHS terhadap interaksi tekan memusat dan momen lentur. Kurva plastis dibentuk berdasarkan persamaan beban-defleksi yang dikembangkan melalui analisis kesetimbangan energi model mekanisme kerusakan plastis profil baja SHS. Sementara itu, kurva elastis dibentuk berdasarkan persamaan beban-defleksi yang dikembangkan melalui analisis non-linear elastic profil baja SHS dengan mempertimbangkan efek local buckling pada penampang profil yang tertekan. Metode analisis ini diimplementasikan dengan menggunakan perangkat lunak (software) komputer. Untuk mengukur ketelitian model analisis disain yang dikembangkan dalam penelitian ini, hasil prediksi kekuatan profil baja SHS diverifikasi menggunakan data kekuatan aktual yang dihasilkan melalui pengujian sejumlah profil baja SHS akibat interaksi beban tekan memusat dan momen lentur sampai rusak. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa rasio data prediksi analitis dan eksperimental masih tersebar dalam batas-batas toleransi yang umum digunakan yaitu  $\pm 20\%$ .

Kata kunci : mekanisme plastis, elastis non-linear, penampang persegi berlubang, sendi plastis, prediksi beban teoritis, kekuatan putus

#### **Abstract**

Design analysis method developed in this study did not use a safety factor that can be used for the design of steel structures that are capable of supporting heavy working load with the weight as light as possible in order to obtain an effective and efficient structure in terms of technical and economic. In this research program, a method of cut-off strength is used as a basis of predicting the strength of a square hollow steel section affected by the interaction of concentrated-compressive load and bending moment. The method cut-off strength is illustrated in the form of two plastic and elastic curves of load-deflection, where the value of load at an intersection of these curves is assumed to be the theoretical strength of the steel section with respect to the interaction of concentrated-compressive load and bending moment. The plastic curve is established according to a load-deflection equation that is developed through the

analysis of energy equilibrium on the plastic failure mechanisms model of the steel section. Meanwhile, the elastic one is established according to another load-deflection curve that is developed through the analysis of non linear elastic concept of the steel structure. This analytical method is implemented by using computer software. In order to measure the accuracy of the design of this analytical model developed in this program, its predicted results are verified using actual strength data obtained from a number of tests on the square hollow steel sections subjected to the interaction of concentrated-compressive load and bending moment to failure. Verification results indicate that the ratio of the analytical-predicted data and experimental one is still scattered within tolerable limits of  $\pm 20\%$ .

Keywords : plastic mechanisms, non-linear elastic, square hollow section, plastic hinge, prediction of theoretical load, cut-off strength.

Diterima (*received*) : 09 Februari 2015, Direvisi (*reviewed*) : 25 Februari 2015, Disetujui (*accepted*) : 16 Maret 2015

## PENDAHULUAN

Salah satu kondisi yang dipersyaratkan untuk biaya murah dalam membangun suatu struktur yaitu strukturnya seringan mungkin dimana hal ini identik dengan kondisi struktur yang paling efisien (*high strenght to weight ratio*). Dalam banyak hal, tujuan umum harus selalu memanfaatkan potensi kekuatan material secara keseluruhan dimana dapat digunakan dalam proses manufaktur dengan mendesain kerangka detail dari penampang untuk struktur yang mempunyai efisiensi maksimum. Fleksibilitas proses pembentukan dingin (*cold-forming process*) untuk menghasilkan bermacam variasi bentuk penampang adalah ideal untuk tujuan ini<sup>1,3,5,6)</sup>. Pengaruh bentuk geometri penampang sangat besar pengaruhnya terhadap perilaku dan kekuatannya dalam memikul beban. Adanya perubahan bentuk yang sedikit saja dari penampangnya maka kekuatan elemen struktur tersebut akan berbeda sama sekali termasuk juga perilaku tekuknya. Pemberian sedikit tekukan pada profil sehingga menjadi penampang *corrugated* maka kinerjanya mengalami peningkatan yang signifikan dibanding perilaku penampang pelat datar<sup>1,3)</sup>.

Berdasarkan kenyataan di lapangan, teknologi struktur ber dinding tipis ini banyak digunakan, seperti pada desain konstruksi automotif, pesawat terbang, kapal laut, gerbong kereta api, bangunan gedung dan industri. Pada struktur baja kelompok ini sering disebut *group cold-formed steel section* dengan keuntungan yaitu rancangan lebih ekonomis, pengurangan berat struktur, serta dapat digunakan langsung sebagai lantai, atap, konstruksi dinding, dank anal (*conduit*). Dalam aplikasinya struktur profil baja ringan sering mengalami pembebanan

kombinasi tekan memusat dan momen lentur melebihi kekuatannya sehingga mengalami kerusakan berupa tekuk setempat (*local buckling*) selanjutnya akan berkembang menjadi mekanisme kegagalan sendi plastis setempat (*local plastic hinge failure mechanisms*). Model kerusakan ini dijadikan obyek penelitian dalam upaya mengembangkan teori analitis untuk memprediksi kekuatan profil baja *square hollow section (SHS)* akibat interaksi tekan memusat dan momen lentur dengan memanfaatkan teori gabungan mekanisme plastis dan elastis.

Secara teknis pengembangan model analisis kekuatan struktur baja ringan ini dapat diarahkan untuk memperkecil kelemahan disain metode konvensional. Pada struktur baja metode konvensional, rancangan kekuatan struktur baja biasanya ditentukan dengan memanfaatkan faktor keamanan (*safety factor*) sehingga besar kecilnya faktor keamanan yang digunakan dalam rancangan akan berpengaruh pada berat rancangan struktur baja yang dihasilkan. Untuk mengurangi ketergantungan penggunaan faktor keamanan dalam rancangan, maka perlu dikaji dan dikembangkan suatu metode evaluasi kekuatan yang tidak tergantung pada penggunaan faktor keamanan. Metode analisis rancangan yang dikembangkan didalam penelitian ini tidak menggunakan faktor keamanan sehingga dapat digunakan untuk merancang struktur baja yang mampu mendukung beban kerja dengan berat yang seringan mungkin sehingga diperoleh struktur yang efektif dan efisien dari segi teknis dan ekonomi. Metode prediksi kekuatan ini banyak bermanfaat bagi industri konstruksi pada khususnya dan industri sejenis pada umumnya. Metode ini akan

menemukan sesuatu atau suatu formula baru untuk memprediksi kekuatan profil baja SHS akibat interaksi tekan memusat dan momen lentur yang mengalami kerusakan.

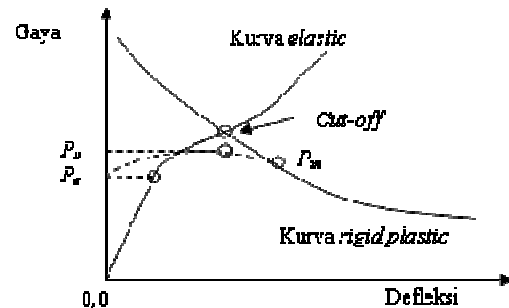
## BAHAN DAN METODE

### Tinjauan Pustaka

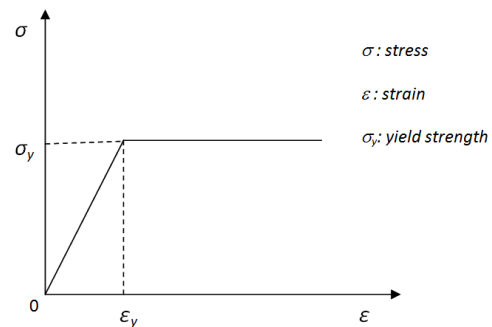
Jika suatu struktur baja berdinging tipis mengalami pembebanan bertahap/meningkat (*incremental load*) maka pertama-tama struktur akan mengalami kondisi elastis tekuk setempat (*local elastic buckling*) yang terdiri dari suatu deformasi pada penampang dan selanjutnya berubah menjadi mekanisme plastis setempat (*local plastic mechanisms*) atau rusak (*collapse*). Sedangkan pada struktur baja berdinging tebal pertama-tama cenderung mengalami tekuk secara global tanpa mengalami suatu deformasi pada penampang dan selanjutnya mengalami suatu sendi plastis (*plastic hinge*) sederhana di tengah panjangnya dimana terjadi kerusakan<sup>6,7,8,10,12</sup>. Hasil penelitian Murray<sup>4</sup> tahun 1989 tentang mekanisme kerusakan plastis pada struktur baja berdinging tipis menunjukkan bahwa sendi plastis dapat terjadi dalam suatu cara simetris sebab mekanisme-mekanisme tersebut membuat sejumlah bentuk yang disebut mekanisme plastis dasar (*basic plastic mechanisms*) dimana antara satu dengan lainnya sesuai (*compatible*). Mekanisme kerusakan plastis dapat digunakan untuk menganalisa perilaku *post-yield* atau *post-collapse* dari struktur baja berdinging tipis. Perilaku *post-collapse* ini sangat penting dalam analisis mekanisme plastis sebab dapat digunakan untuk memperkirakan beban rusak struktur. Perilaku secara lengkap suatu struktur baja berdinging tipis dapat digambarkan secara prediksi dengan 2 (dua) model teoritis yang berbeda yaitu suatu model elastis linier ideal (*an ideal linear-elastic model*) yang mana menjelaskan perilaku elastisnya (*elastic behavior*) dan model plastis kaku ideal (*an ideal rigid-plastic model*) yang menjelaskan perilaku kerusakan (*post-collapse*). Kedua model teori ini akan membentuk suatu diagram *load-deflection* teoritis dari suatu struktur baja berdinging tipis seperti pada Gambar 1.a. Suatu beban rusak (*ultimate load*) struktur dapat diestimasi dari diagram *load-deflection* teoritis dengan cara menentukan titik perpotongan antara kurva elastis dan plastis kaku dan metode ini disebut "**cut-off strength**".

Kurva garis putus-putus pada Gambar 1.a mewakili kurva aktual *load-deflection* struktur. Kurva ini mulai terdeviasi dari kurva

elastis sebagai awal terjadinya kondisi *yield*, kemudian berimpit dengan dengan kurva plastis kaku sesudah berkembang menjadi mekanisme plastis. Diagram *load-deflection* menunjukkan 3 batasan beban yang berbeda yaitu:



(a)



(b)

Gambar 1.

Diagram umum *load-deflection* struktur baja berdinging tipis<sup>6,8,15</sup> (a), Perilaku *elastic-perfectly-plastic*<sup>3,6,8,15</sup> (b)

- $P_e$ : Batas beban elastis, awal terjadinya *yield* dari struktur;
- $P_u$ : Batas beban batas, beban maksimum yang dapat ditahan oleh struktur.
- $P_m$ : Batas beban plastis, beban dimana mekanisme kerusakan plastis sudah mulai terjadi pada struktur.

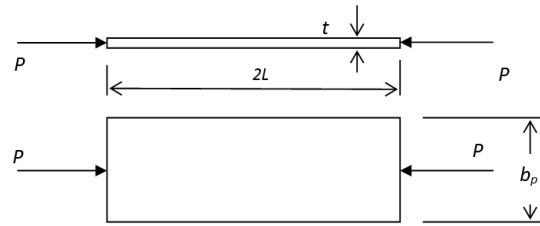
Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa sebelum struktur baja berdinging tipis mengalami keruntuhan, maka pertama-tama akan berkembang mekanisme plastis secara lokal. Studi tentang keruntuhan secara umum memfokuskan secara komprehensif untuk mengetahui apa-apa yang terjadi saat beban pada struktur mendekati beban maksimum. Kapasitas beban maksimum suatu struktur sering digunakan sebagai pola penyelesaian dasar untuk rancangan<sup>2,17,19</sup>. Beban maksimum dapat diperkirakan dengan menggunakan teori plastis kaku (*a rigid-plastic theory*).

Dalam teori plastis kaku, suatu material diasumsikan bahwa material tersebut mempunyai perilaku hubungan

*elastic-perfectly-plastic stress strain* seperti pada Gambar 1.b. Asumsi ini berarti bahwa efek dari *strain-hardening* diabaikan sebab hal tersebut cenderung membuat sendi plastis yang terjadi menjadi menyebar dibandingkan dengan yang diizinkan untuk berkembang pada sepanjang sendi plastis sesuai yang diasumsikan dalam teori ini. Sepanjang penyebaran sendi plastis tidak terlalu luas dibandingkan dengan panjang pelat yang tidak mengalami *yield* disekitar sendi plastis, maka efek *strain-hardening* secara umumnya tidak signifikan. Lebih dari itu biasanya yang menarik adalah memfokuskan perhatian pada perilaku struktur pada bagian-bagian kritis saat mengalami kerusakan atau sesaat sebelum rusak.

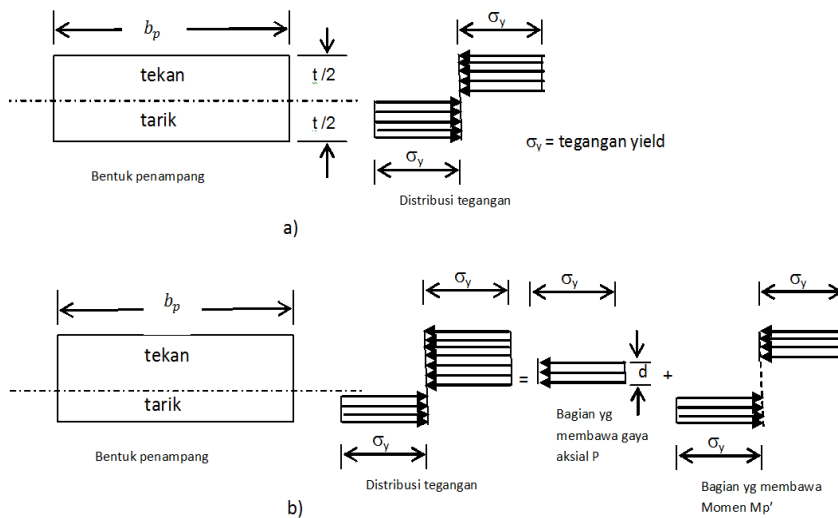
Suatu contoh sederhana yang digunakan dalam teori plastis kaku adalah analisis dari suatu batang baja lunak (*mild steel*). Seluruh penampangnya adalah persegi empat dan batang tersebut dibuat tumpuan pin pada sumbu minor utamanya dari setiap ujungnya. Dimensi dari batang baja lunak tersebut seperti

ditunjukkan dalam Gambar 2 dimana  $b_p \gg t$  sehingga tidak ada gangguan terjadi ketika batang dibebani dengan beban aksial  $P$ .



Gambar 2. Dimensi dari ujung pin batang

Batang tersebut akan rusak akibat bending pada sumbu minornya. Jika beban aksial  $P$  tidak dipertimbangkan, maka distribusi tegangan dalam suatu kondisi plastis penuh pada penampang segi empat dari batang tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 3.a dimana jika beban aksial  $P$  pada penampang, maka distribusi tegangan akan ditunjukkan seperti pada Gambar 3.b.



Gambar 3. Distribusi tegangan pada suatu penampang persegi empat

Kondisi plastis penuh ditunjukkan pada Gambar 3a, dan Gambar 3b menunjukkan kondisi *reduced-plastic moment capacity*<sup>18,19</sup>. Berdasarkan disdistribusi tegangan yang ditunjukkan dalam Gambar 3a tersebut, suatu kondisi *fully plastic moment* dari penampang dapat diformulasikan sebagai berikut

$$M_p = \frac{\sigma_y b_p t^2}{4} \quad (1)$$

Jika beban aksial  $P$  juga diperhitungkan dalam penampang itu, maka tegangan lentur plastisnya harus dikurangi dengan tegangan akibat beban aksial sehingga menghasilkan reduksi momen

plastis dengan simbol  $M_p'$ . Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 3b, dimana  $d$  merupakan tebal yang mengandung beban aksial dan beban ini dapat dirumuskan sebagai berikut

$$P = \sigma_y b_p d \quad (2)$$

Bagian luar dari pembawanya mengurangi momen plastis  $M_p'$  dimana

$$M_p' = \frac{\sigma_y b_p (t^2 - d^2)}{4} \quad (3)$$

Dari Persamaan (2) dan (3), variabel  $d$  dapat dihilangkan menjadi persamaan

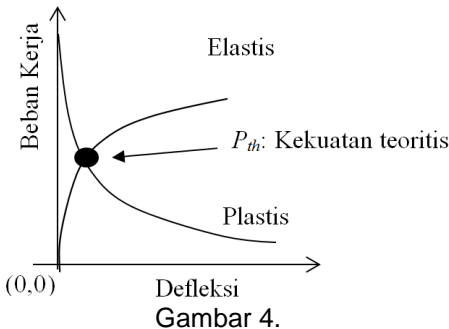
$$M_p' = \frac{\sigma_y b_p t^2}{4} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_c} \right)^2 \right] = M_p \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_c} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Pada persamaan ini  $P_s$  merupakan suatu *squash load* dan nilainya sama dengan  $\sigma_y b_p t$ .

### Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *cut-off strength* seperti pada Gambar 4. Metode ini dilaksanakan berdasarkan analisis mekanisme plastis dan elastis non-linear. Analisis mekanisme plastis dilaksanakan dengan memanfaatkan teori kesetimbangan energi yang dihasilkan oleh beban kerja dan energi yang hilang diserap oleh mekanisme sendi plastis selama deformasi. Sedangkan analisis elastis non-linear dilaksanakan berdasarkan teori material non-linear dari Osgood-Ramberg<sup>16)</sup>.

Evaluasi ketelitian metode analisis yang dikembangkan ini dilaksanakan dengan menggunakan program komputer untuk iterasi perilaku mekanisme plastis dan elastis sampai kedua perilaku tersebut berpotongan di satu titik perpotongan. Titik ini diasumsikan sebagai prediksi kekuatan profil baja ringan SHS teoritis ( $P_{th}$ ).



Gambar 4. Metode penentuan kapasitas dukung profil berdasarkan metode *cut-off strength*<sup>11,13)</sup>

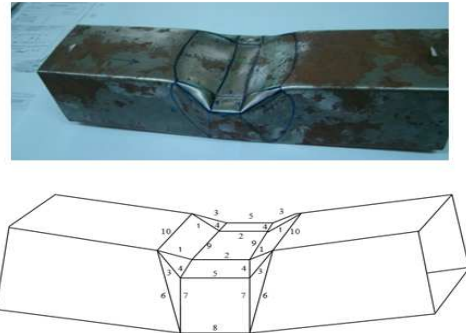
### Analisis Mekanisme Plastis

Idealisasi model kerusakan profil SHS akibat beban tekan memusat dan momen lentur seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Idealisasi model mekanisme plastis ini akan dianalisis menggunakan metode keseimbangan energi dan hal ini dilakukan menurut asumsi sebagai berikut:

- Pengaruh gaya membran pada kapasitas momen tahanan dari sendi plastis diperhitungkan.
- Sendi plastis mengalami perputaran dengan sudut yang kecil, sehingga perputaran sudut sendi akan diprediksi menurut *the small deflection theory*.
- Flange curling* dapat diabaikan, karena itu defleksi setempat pada *top flange* mungkin dipertimbangkan sama dengan deformasi *web crippling* ( $\Delta h$ ).

- Selain dari bagian sendi plastis, bagian/area dari *web* dan *flange* masih dalam keadaan elastis.

Seluruh *yield lines* diasumsi adalah lurus. Efek dari radius kelengkungan pada pojok pertemuan antara *web* dan *flange*, dibutuhkan untuk perhitungan dalam menentukan energi eksternal dan hal tersebut diasumsi bahwa aksi beban *web* terjadi pada ujung dari jari-jari kelengkungan dari *web* dan *flange*.



Gambar 5.

Idealisasi model mekanisme plastis dari *web crippling* pada balok SHS

Persamaan dasar dari analisis kesetimbangan energi yang dipakai adalah sebagai berikut<sup>6)</sup>

$$W_{ext} = \sum_{i=1}^{i=n} [(M_p)_i \theta_i l_i] \quad (5)$$

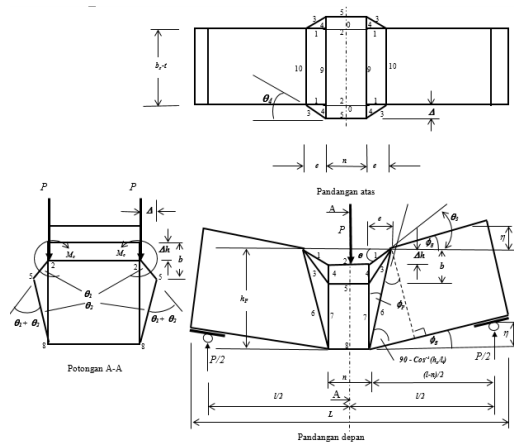
dimana  $W_{ext}$  adalah energi eksternal yang menyebabkan defleksi aktual akibat beban,  $l_i$  adalah panjang sendi plastis,  $\theta_i$  adalah sudut perputaran sendi plastis, dan  $M_p$  adalah kapasitas momen tahanan dari sendi plastis persatuan panjang sebagai berikut

$$M_p' = \frac{\sigma_y b_p t^2}{4} \left[ 1 - \left( \frac{P}{\sigma_y b_p t} \right)^2 \right]$$

Dengan mengacu pada prinsip kerja yang sebenarnya (*the principle of virtual work*) maka energi eksternal ( $W_{ext}$ ) ditentukan menurut defleksi dari penggunaan beban seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

$$W_{ext} = P(\Delta h + \eta)) + 2M_o \theta_1 \quad (6)$$

dimana  $P$  adalah beban yang diterapkan,  $\Delta h$  adalah deformasi *web crippling*, dan  $\eta$  adalah defleksi balok SHS akibat momen lentur keseluruhan.  $M_o = P(r+0,5t)$  adalah *Out of plane bending moment* pada interseksi dari *web* dan *top flange*, dan  $\theta_1$  adalah sudut perputaran dari garis sendi plastis no 2. Pada Persamaan (5),  $\eta$ ,  $\Delta h$ , dan  $\theta$  dianalisis menggunakan mekanisme plastis seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Analisis ini didasarkan pada teori defleksi kecil (*the small deflection theory*).



Gambar 6. Mekanisme plastic hinge<sup>14,20)</sup>

$$\eta = \frac{\theta_g(l-n)}{2} ; \theta_g = \frac{2\eta}{(l-n)} = \frac{h_p^2 + e^2 - l_g^2 - \Delta h^2}{2l_g(h_p - \Delta h)} ; \theta_p = -\theta_g - \cos^{-1}(hp/l_6)$$

$$e = \frac{\eta(l-n) - \eta(l-n)}{2\eta} ; \text{ untuk } e = \sqrt{(h_p - \Delta h)^2 + l_6^2 - 2l_g(h_p - \Delta h) \cos \theta_p} \text{ maka}$$

$$\Delta h = \frac{2l_g \cos(\frac{2\eta}{(l-n)}) + \sqrt{(-2l_g \cos(\frac{2\eta}{(l-n)})^2 - 4(2l_g h_p \cos(\frac{2\eta}{(l-n)}) - h_p^2 - e^2 + l_6^2)}}{2}$$

$$\Delta = \sqrt{2b\Delta h - \Delta h^2} ; \theta = \frac{\Delta h}{e} ; \theta_1 = \frac{\Delta}{b}$$

Dengan menggunakan penjelasan ini dan Persamaan (5) maka persamaan eksternal energi dapat dikembangkan menjadi

$$W_{ext} = \frac{P[bC1 + 2b\eta + 4(r + 0.5t)C2]}{2b} \quad (7)$$

Dimana  $C1 = 2l_g \cos(\frac{2\eta}{(l-n)}) + \sqrt{(-2l_g \cos(\frac{2\eta}{(l-n)})^2 - 4(2l_g h_p \cos(\frac{2\eta}{(l-n)}) - h_p^2 - e^2 + l_6^2)}$   
 $C2 = \Delta = \sqrt{C1b - \frac{C1^2}{2}}$

Gambar 7a menunjukkan mekanisme garis sendi plastis. Energi yang diserap pada plastic hinge pada web dan top flange dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut

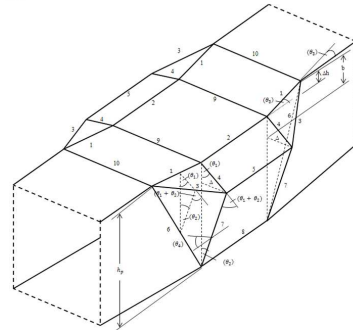
$$u = \frac{2\sigma_y t^2 C6}{C7} \left[ 1 - \left( \frac{P}{\sigma_y n t} \right)^2 \right] + \left[ \sigma_y t^2 \left( \Delta C3 + \frac{C4}{e} + 0.5C5 \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{1.5Ph_p C9}{\sigma_y C8} \right)^2 \right]$$

$$C3 = \frac{e(h_p - b) + h_p \sqrt{e^2 + \sigma^2} + b \sqrt{(h_p)^2 + \sigma^2}}{b(h_p - b)}$$

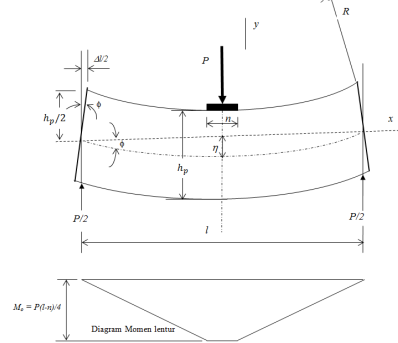
$$C4 = \Delta h \sqrt{\Delta^2 + (\Delta h)^2} + \Delta(h_p - b) ;$$

$$C6 = n \Delta(h_p) ; C7 = b(h_p - b) ; C8 = (D_{01}^4 - h_p^4) ; C9 = l - n$$

$$C5 = \frac{2\Delta h h_p}{e} - \frac{(h_p^2 + \sigma^2 - l_g^2 - \Delta h^2) h_p}{2l_g(h_p - \Delta h)}$$



a) Deformasi web dan flange



b) Defleksi SHS beam

Gambar 7. Deformasi pad profil SHS<sup>14,20)</sup>

Dari Persamaan (5), (6) dan (7)

$$W_{ext} = P(\Delta h + \eta) + 2M_0 \theta_1$$

$$W_{ext} = \frac{P[bC1 + 2b\eta + 4(r + 0.5t)C2]}{2b} = U$$

untuk  $C = \frac{2b}{[bC1 + 2b\eta + 4(r + 0.5t)C2]}$  maka

$$P - C.U - C \left[ \frac{2\sigma_y t^2 C6}{C7} \left( 1 - \left( \frac{P}{\sigma_y n t} \right)^2 \right) + \left[ \sigma_y t^2 \left( \Delta C3 + \frac{C4}{e} + 0.5C5 \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{1.5Ph_p C9}{\sigma_y C8} \right)^2 \right] \right]$$

dimana

$$A = \frac{2\sigma_y t^2 C6}{C7} ; a_1 = \sigma_y n t ; A_2 = \sigma_y t^2 \left( \Delta C3 + \frac{C4}{e} + 0.5C5 \right)$$

$$CA - \frac{CA}{a_1^2} P^2 + CA_2 - CA_2 \left( \frac{1.5h_p C2}{\sigma_y C8} \right)^2 P^2 - P = 0$$

$$\left( -\frac{CA}{a_1^2} - CA_2 \left( \frac{1.5h_p C2}{\sigma_y C8} \right)^2 \right) P^2 - P + (CA + CA_2) = 0$$

sehingga untuk  $B_1 = \frac{CA}{a_1^2} ; B_2 = CA_2 \left( \frac{1.5h_p C2}{\sigma_y C8} \right)^2$

maka

$$(-B_1 - B_2) P^2 - P + (CA + CA_2) = 0$$

$$\text{atau } (B_1 + B_2) P^2 + P - (CA + CA_2) = 0$$

Dengan demikian diperoleh<sup>20)</sup>

$$P_1 = \frac{-1 + \sqrt{1^2 + 4(B_1 + B_2)(CA + CA_2)}}{2(B_1 + B_2)} \quad (8)$$



dimana  $b$  adalah *yield arc depth*,  $\sigma_y$  adalah tegangan *yield*,  $r$  adalah jari-jari kelengkungan antara *web* dan *flange*,  $t$  adalah tebal,  $n$  adalah *load bearing length*, dan  $h_p$  adalah tinggi *web*.

### Analisis Elastis Non-Linier

Analisis elastis non-linier batang SHS bertujuan untuk membuat ekspresi lain dari *load carrying capacity* ( $P_e$ ) terhadap *deflection* ( $\eta$ ) batang SHS. Dalam analisis ini, pengaruh tekuk setempat (*local buckling*) pada elemen tekan (*compression element*) dari benda uji juga dilakukan dalam perhitungan untuk tujuan pendekatan lebar efektif<sup>14,17,20</sup>. Analisis defleksi balok SHS yang disebabkan momen lentur global dilakukan sesuai Gambar 7b. Rumus beban ( $P_e$ ) pada analisis elastis sebagai fungsi defleksi ( $\eta$ ) adalah<sup>20</sup>

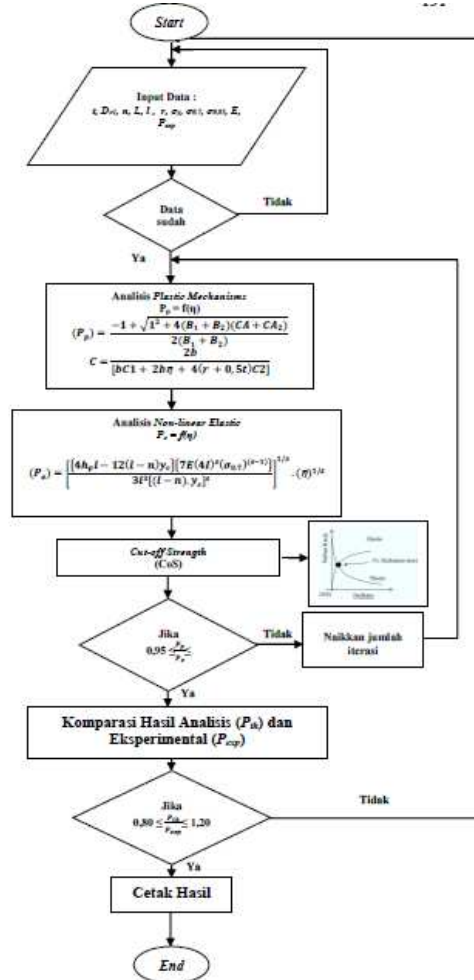
$$(P_e) = \left[ \frac{\{4h_p l - 12(l-n)y_c\} \{7E(4I)^s (\sigma_{0.7})^{(s-1)}\}}{3I^3 [(l-n)y_c]^s} \right]^{1/s} \cdot (\eta)^{1/s} \quad (9)$$

dimana  $P_e$  adalah beban elastis (N),  $l$  adalah jarak tumpuan (mm),  $E$  adalah modulus elastis (MPa),  $n$  adalah panjang blok pembeban (mm),  $\eta$  adalah defleksi balok pada kondisi elastis linier (mm),  $s$  adalah *strain hardening index*,  $y_c$  adalah tinggi *web* yang mengalami beban tekan (mm),  $h_p$  adalah tinggi *web* (mm), dan  $I$  adalah momen inersi penampang (mm<sup>4</sup>) berdasarkan lebar efektif.

Rumus beban plastis dan elastis pada persamaan (8) dan Persamaan (9) kemudian dibuat dalam bentuk program komputer. Diagram alir program seperti ditunjukkan dalam Gambar 8.

### Pendekatan Eksperimental

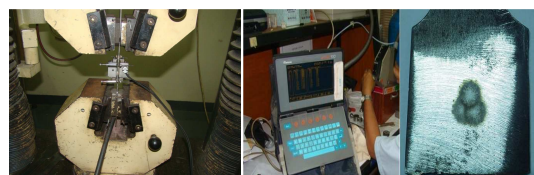
Pendekatan eksperimental dilaksanakan meliputi pengujian pendahuluan dan pengujian utama. Dalam pengujian pendahuluan dilakukan karakterisasi material dasar yaitu uji tarik, uji kekerasan, metalografi dan komposisi kimia. Uji tarik dilakukan pada mesin uji statis RME 100 Schenck Trebel pada temperatur kamar sampai putus dan hubungan beban-deformasi dicatat menggunakan X-Y recorder.



Gambar 8.

Diagram alir pembuatan program komputer

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan mesin uji<sup>31</sup>: OES ARC-MET 930 SP (Metorex). Standar uji : ASTM A751 pengujian komposisi kimia dengan metode E 403 sistem OES. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode vickers. Pengamatan metalografi dilakukan dengan mikroskop optik. Foto-foto pengujian material seperti terlihat dalam Gambar 9 dan 10.



Gambar 9.

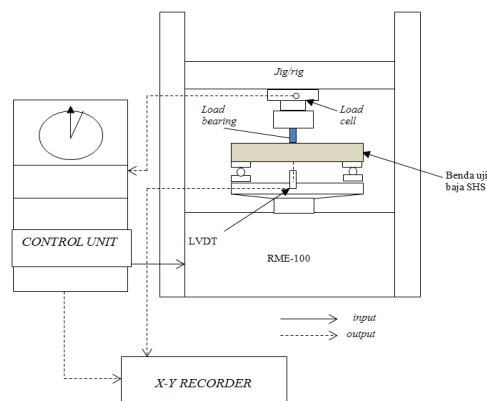
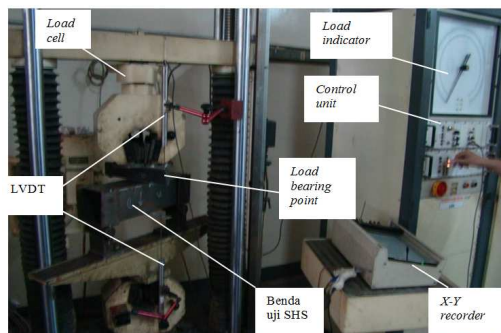
Foto pengujian tarik dan pengujian komposisi kimia



Gambar 10. Foto pengujian kekerasan dan pengamatan metalografi

Pengujian utama dilaksanakan dengan menguji sebanyak 60 (enam puluh) batang benda uji yang berbentuk profil baja ringan SHS dengan parameter : lebar pembebanan ( $n$ ), jarak tumpuan ( $l$ ), ketebalan ( $t$ ), tinggi web ( $h_w$ ), radius kelengkungan pertemuan web dan flange ( $r$ ) dan tegangan luluh material ( $\sigma_{yield}$ ). Pengujian ini dilakukan sampai benda uji rusak menggunakan kombinasi beban tekan memusat dan momen lentur (*compression concentrated and bending loads*) pada temperatur kamar. Gambar 11 menunjukkan skematis dan foto test set-up dan sistem pengujian beban memusat dan momen lentur statis terhadap profil baja SHS.

Proses *set up* benda uji ke mesin uji dilakukan dengan menempatkan benda uji profil baja SHS di atas dua tumpuan berbentuk *roll* kemudian pada bagian tengah bentangan bagian atas (*top flange*) dipasang pelat penekan (*load bearing*). Pemasangan *linear variable displacement transducers* (LVDT) pada bagian permukaan atas (*top flange* dekat *load bearing*) dan bagian permukaan bawah (*bottom flange*) dari profil SHS. Pada bagian atas pelat *load bearing* dipasang sensor gaya (*loadcell*) untuk mengukur besarnya gaya yang diaplikasikan. Sensor gaya dan sensor defleksi kemudian di hubungkan dengan *X-Y recorder* untuk mencetak grafik hubungan gaya dengan defleksi.



Gambar 11. Skema *Set-up* dan Sistem pengujian profil baja SHS dengan interaksi beban tekan memusat dan momen lentur

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan pada batang SHS dengan ketebalan masing-masing  $t = 0,6$  mm,  $t = 1,2$  mm dan  $t = 2,04$  mm. Untuk material dengan ketebalan  $t = 0,6$  mm, dan  $t = 1,2$  mm diuji dengan orientasi SHS SPPC =  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan sejajar permukaan. Hasil pengujian terhadap kekerasan dengan ketebalan dan orientasi SHS SPPC tersebut ditabulasikan pada Tabel 1. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa orientasi sejajar permukaan memberikan nilai kekerasan lebih tinggi daripada pengujian dengan berbagai posisi orientasi bersudut.

Tabel 1. Hasil Uji Kekerasan

No	Kekerasan HV								
	SHS Industri $t = 2,04$ mm	SHS SPPC $t = 1,2$ mm				SHS SPPC $t = 0,6$ mm			
		( $0^\circ$ )	( $90^\circ$ )	$45^\circ$	Sejajar/surface	( $0^\circ$ )	( $90^\circ$ )	$45^\circ$	Sejajar/surface
1	110	85,6	82,3	89,6	89,6	96,7	98,2	96,1	105,0
2	114	84,1	84,8	83,5	89,6	98,7	100,6	97,4	98,7
3	114	82,8	87,5	86,1	97,5	97,4	98,2	98,7	110,0
Rata2	113	84	85	86	92	98	99	97	105

Pengujian dilakukan juga terhadap komposisi kimia profil baja SHS. Hasil



pengujian komposisi kimia material ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2.  
Hasil Uji Komposisi Kimia (% berat)

SHS Industri ( $t = 2.04$ mm)										
Unsur (%)	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V
	99,64	0,037	0,06	0,29	0,027	0,18	0,0018	0,049	0,015	0,006
Unsur (%)	W	Ti	Nb	B	S	P				
	0,046	0,0	0,0	0,0	0,021	0,020				
SPCC ( $t = 1.2$ mm)										
Unsur (%)	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V
	99,61	0,027	0,03	0,22	0,021	0,017	0,0019	0,040	0,045	0,007
Unsur (%)	W	Ti	Nb	P	Zr	Zn	Sn	S	Pb	
	0,0014	0,0	0,0	0,016	0,0	0,005	0,003	0,017	0,01	
SPCC ( $t = 0.6$ mm)										
Unsur (%)	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V
	99,54	0,052	0,013	0,188	0,034	0,017	<0,002	0,043	0,046	<0,002
Unsur (%)	W	Ti	Nb	P	S					
	0,011	<0,002	<0,002	0,014	0,033					

Profil baja dilakukan pengujian terhadap kekuatan tarik material dasar. Hasil uji tarik material dasar ditunjukkan pada Tabel 3.

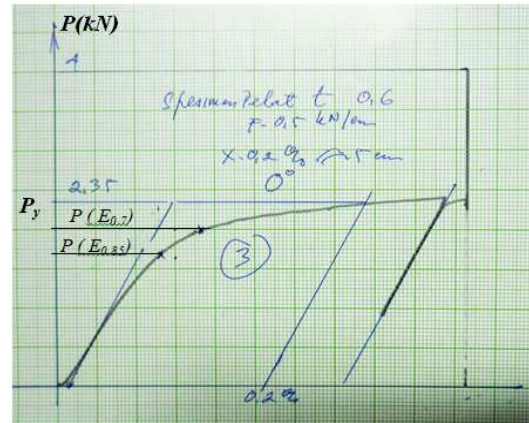
Tabel 3.  
Hasil Uji Tarik material dasar

	No	Tegangan Tarik, $\sigma_{ult}$ (MPa)	Tegangan luluh, $\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	Modulus Elastis, E (MPa)	Elongasi (%)
Material dasar SHS buatan pabrik, $t=2,04$ mm sejajar sumbu longitudinal ( $0^\circ$ )	1	344.8	290.4	246.8	203.3	145200	25.0
	2	347.3	298.	253.8	209.0	149300	25.0
	3	355.9	307.7	261.5	215.4	153850	25.0
	Rata-rata	<b>349.4</b>	<b>298.9</b>	<b>254.1</b>	<b>209.2</b>	<b>149450</b>	<b>25.0</b>
Material dasar SHS SPCC, $t=1.2$ mm Tegak lurus arah rolling ( $90^\circ$ )	1	313.2	172.1	136.8	114.7	86025.1	27.0
	2	289.3	160.2	95.7	80.1	80116.8	30.0
	3	297.5	153.1	87.5	78.7	76553.3	29.0
	Rata-rata	<b>300.0</b>	<b>161.8</b>	<b>107.0</b>	<b>91.0</b>	<b>80898.4</b>	<b>28.6</b>
Material dasar SHS SPCC, $t=1.2$ mm Searah arah rolling ( $45^\circ$ )	1	309.7	164.4	100.6	87.3	82200	30.5
	2	306.2	169.2	139.4	108.2	84600	29.9
	3	310.8	174.2	149.2	124.2	87100	30.2
	Rata-rata	<b>308.9</b>	<b>169.3</b>	<b>129.7</b>	<b>106.6</b>	<b>84633</b>	<b>30.2</b>
Material dasar SHS SPCC, $t=1.2$ mm Searah arah rolling ( $0^\circ$ )	1	307.5	162.6	114.2	87.9	81275.1	32.0
	2	329.6	176.8	126.6	109.9	88376.4	32.0
	3	310.1	181.6	163.9	126.2	90811.2	27.0
	Rata-rata	<b>315.7</b>	<b>173.6</b>	<b>135.0</b>	<b>108.0</b>	<b>86820.9</b>	<b>30.3</b>
Material dasar SHS SPCC, $t=0.6$ mm Tegak lurus arah rolling ( $90^\circ$ )	1	331.2	182.6	135.9	97.7	91284.3	20.0
	2	323.8	196.0	127.8	88.2	97989.1	24.0
	3	356.3	209.3	178.1	147.0	104651.9	22.0
	Rata-rata	<b>337.1</b>	<b>196.0</b>	<b>147.3</b>	<b>104.3</b>	<b>97975.1</b>	<b>22.7</b>
Material dasar SHS SPCC, $t=0.6$ mm Tegak lurus arah rolling ( $45^\circ$ )	1	356.3	232.9	170.1	129.5	116450	21.0
	2	338.3	239.7	209.4	185.3	119850	22.0
	3	354.1	233.5	164.7	115.2	116750	21.8
	Rata-rata	<b>349.6</b>	<b>235.3</b>	<b>181.4</b>	<b>143.3</b>	<b>117683</b>	<b>21.6</b>
Material dasar SHS SPCC, $t=0.6$ mm Searah arah rolling ( $0^\circ$ )	1	394.8	261.6	238.7	220.3	130821.6	22.0
	2	363.8	235.2	199.7	164.2	117579.2	24.0
	3	346.0	211.9	181.6	151.4	105950.5	20.0
	Rata-rata	<b>368.2</b>	<b>236.2</b>	<b>206.7</b>	<b>178.6</b>	<b>118117.1</b>	<b>22.0</b>

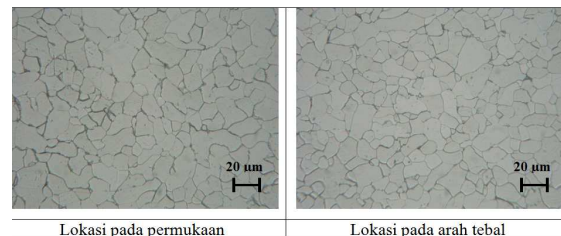
Semua material yang diuji tarik memberikan perilaku yang relatif sama satu dengan lainnya seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Modulus elastisitas terjadi pada pembebanan awal sampai mencapai beban ultimit. Selanjutnya pembebanan dilepas untuk menunjukkan kondisi regangan set yang terjadi setelah pembebanan dilepas. Semua material dengan berbagai ketebalan memberikan perilaku yang sama. Hal ini terjadi karena komposisi material terhadap prosentase berat memiliki komposisi yang proporsional.

Pengujian dilakukan juga terhadap komposisi mikrostruktur dengan berbagai ketebalan dan orientasi potongan. Pengujian dilakukan menggunakan *scanning electro magnetic (SEM)* dan *EDAX*. Hasil pengujian mikrostruktur ditunjukkan pada Gambar 13 dan hasil pengujian menggunakan *scanning*

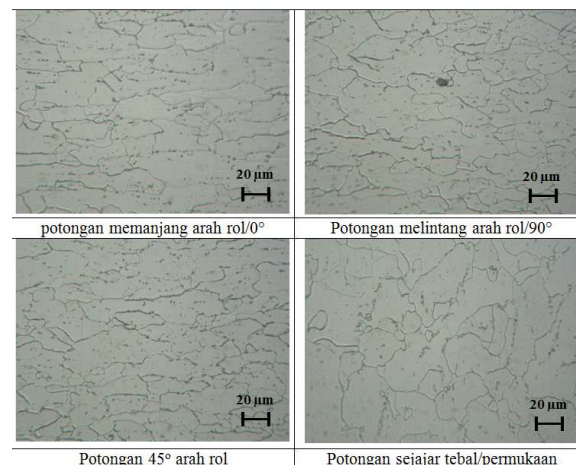
*electro magnetic (SEM)* dan *EDAX* ditunjukkan pada Gambar 14.



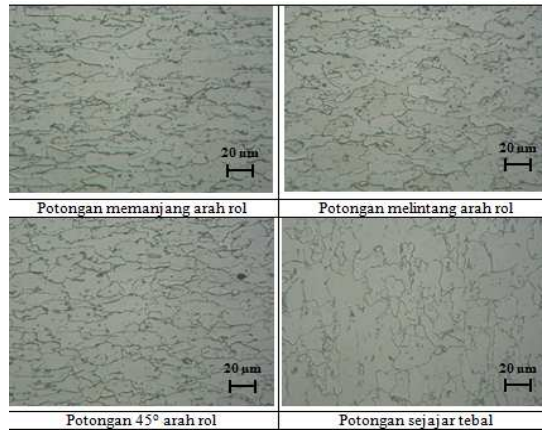
Gambar 12.  
Grafik Gaya (kN) vs. Regangan (%) pada pengujian tarik material dasar profil SHS<sup>(20)</sup>



(a) Mikrostruktur dari material dasar profil SHS  $t = 2,04$  mm (industri)<sup>(20)</sup>

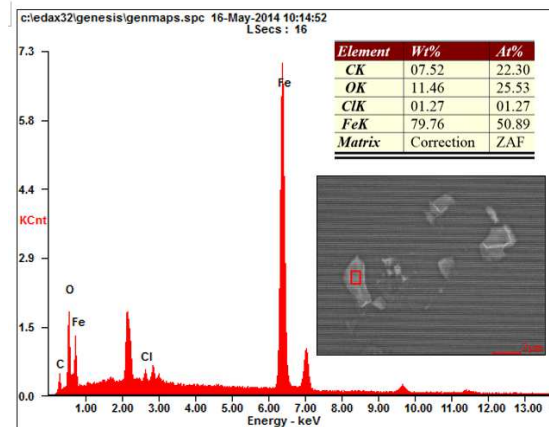
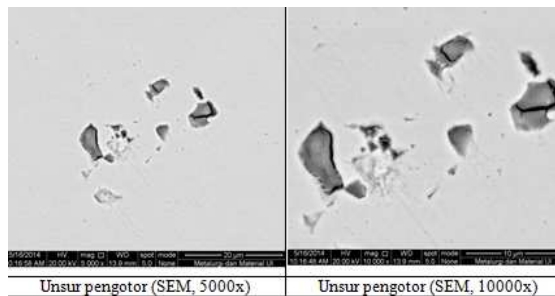


(b) Mikrostruktur dari material dasar profil SHS  $t = 1,2$  mm (SPCC)<sup>(20)</sup>



(c) Mikrostruktur dari material dasar profil SHS  $t = 0,6$  mm (SPCC)<sup>20)</sup>

Gambar 13.(a,b,c) Orientasi Mikrostruktur



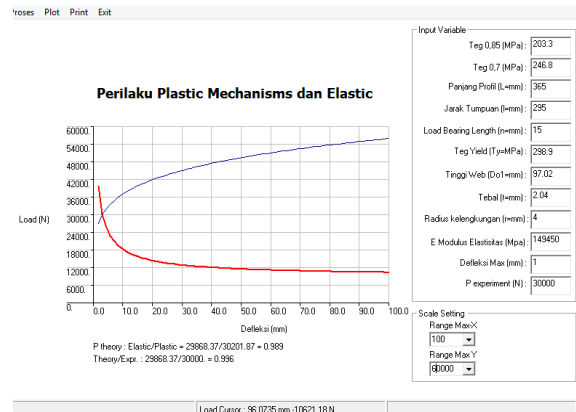
Gambar 14. Hasil uji SEM dan EDAX dari material dasar profil SHS  $t = 0,6$  mm

### Hasil Prediksi Kekuatan dan Pengujian Profil SHS

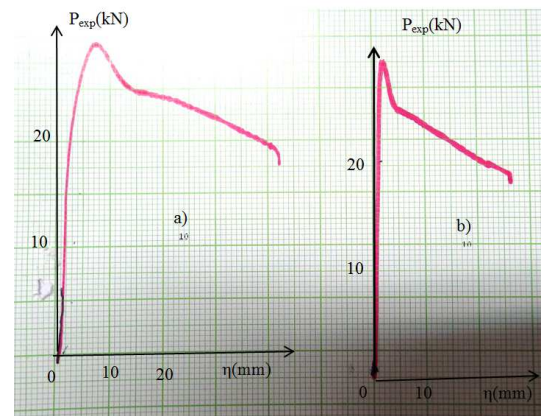
Untuk meprediksi kekuatan profil SHS digunakan metode *cut-off strength*. Hasil prediksi kekuatan dengan metode *cut off strength* dan hasil pengujian profil SHS akibat beban tekan memusat dan momen lentur ditunjukkan pada Gambar 15 dan 16.

Perbandingan hasil prediksi kekuatan teoritis dan hasil pengujian profil baja ringan SHS (industri) dengan interaksi beban tekan memusat dan momen lentur dengan berbagai

ketebalan dan orientasi pembebanan ditabulasikan pada Tabel 4. Masing-masing kondisi diuji dengan berbagai parameter yang telah dijelaskan. Dari hasil pengujian dijumlah dan dirata-rata dengan penyimpangan standard kurang dari 10%. Dengan demikian hasil prediksi kekuatan teoritis relatif sama dengan hasil pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa prediksi teoritis bisa dipertanggungjawabkan. Pengaruh variabel  $n/t$ ,  $hw/t$ ,  $r/t$  dan  $l$  di tunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 15. Hasil prediksi kekuatan profil baja ringan SHS (industri) dan interaksi beban tekan memusat dan momen lentur dengan metode *cut off strength*<sup>20)</sup>



Gambar 16. Hasil pengujian profil baja ringan SHS (industri) dengan interaksi beban tekan memusat dan momen lentur<sup>20)</sup>

Tabel 4.  
Perbandingan hasil prediksi kekuatan teoritis dan hasil uji profil baja ringan SHS

(a) Industri

$$t = 2.04 \text{ mm} \quad \sigma_{0.85} = 209.2 \text{ (MPa)} \quad \sigma_{0.7} = 254.1 \text{ (MPa)} \quad \sigma_y = 298.9 \text{ (MPa)} \quad E = 149450 \text{ (MPa)}$$

Id.	$D_{01}$ (mm)	$t$ (mm)	$r$ (mm)	$L$ (mm)	$l$ (mm)	$n$ (mm)	$P_{th}$ (2Ch- BS) (kN)	$P_{th}^{(CoS)}$ (kN)	$P_{exp}$ (N)	$\frac{P_{th}^{(2Ch-BS)}}{P_{exp}}$	$\frac{P_{th}^{(CoS)}}{P_{exp}}$
SHS-2.04-15-A1	97.03	2.04	4.0	365	295	15	29785	29580	30000	0.98	0.99
SHS-2.04-15-A2	96.86	2.04	4.0	365	295	15	30063	29530	30000	0.99	0.98
SHS-2.04-15-A3	97.00	2.04	4.0	365	295	15	30073	29570	30000	0.99	0.99
SHS-2.04-30-B1	97.00	2.05	4.0	380	310	30	30002	32670	31000	0.96	1.05
SHS-2.04-30-B2	96.99	2.04	4.0	380	310	30	29702	32500	31000	0.95	1.05
SHS-2.04-30-B3	96.90	2.05	4.0	380	310	30	29706	32640	31000	0.95	1.05
SHS-2.04-60-C1	96.99	2.05	4.0	410	340	60	29548	41340	37000	0.79	1.12
SHS-2.04-60-C2	97.05	2.05	4.0	410	340	60	29840	41290	37000	0.80	1.12
SHS-2.04-60-C3	96.98	2.05	4.0	410	340	60	29836	43330	37000	0.80	1.12
SHS-2.04-30-D1	97.00	2.05	4.0	465	395	30	27974	26320	28000	0.99	0.94
SHS-2.04-30-D2	97.07	2.05	4.0	465	395	30	28246	26330	28000	0.99	0.94
SHS-2.04-30-D3	96.95	2.04	4.0	465	395	30	27964	26170	28000	0.98	0.93
Hasil Statistik							Rata-rata		<b>0.93</b>	<b>0.95</b>	
							Standar deviasi		<b>0.082</b>	<b>0.078</b>	

Catatan : BS : British Standard, CoS : Cut-off Strength ;  $\sigma_{all} = \sigma_y$ ,  $b=0.05 \text{ hp}$

(b) SPCC-T0,6-90<sup>0</sup>

$$t = 0.6 \text{ mm} \quad \sigma_{0.85} = 104.3 \text{ (MPa)} \quad \sigma_{0.7} = 147.3 \text{ (MPa)} \quad \sigma_y = 196.0 \text{ (MPa)} \quad E = 97975 \text{ (MPa)}$$

Id.	$D_{01}$ (mm)	$t$ (mm)	$r$ (mm)	$L$ (mm)	$l$ (mm)	$n$ (mm)	$P_{th}$ (2Ch- BS) (kN)	$P_{th}^{(CoS)}$ (kN)	$P_{exp}$ (N)	$\frac{P_{th}^{(2Ch-BS)}}{P_{exp}}$	$\frac{P_{th}^{(CoS)}}{P_{exp}}$
SHS-0.6-90-15-56-1	56.96	0.6	0.6	250	207	15	2420	2499	2100	1.15	1.19
SHS-0.6-90-15-56-2	56.64	0.6	0.6	250	207	15	2430	2489	2210	1.10	1.13
SHS-0.6-90-15-56-3	56.44	0.6	0.6	250	207	15	2420	2481	2190	1.11	1.13
SHS-0.6-90-30-56-1	56.87	0.6	0.6	280	237	30	2340	3714	2910	0.80	1.28
SHS-0.6-90-30-56-2	57.29	0.6	0.6	280	237	30	2340	3717	2760	0.85	1.35
SHS-0.6-90-30-56-3	57.29	0.6	0.6	280	237	30	2340	3717	2890	0.81	1.29
SHS-0.6-90-15-106-1	108.57	0.6	0.6	400	357	15	2250	2935	3500	0.64	0.84
SHS-0.6-90-15-106-2	107.72	0.6	0.6	400	357	15	2250	2912	3280	0.69	0.89
SHS-0.6-90-15-106-3	109.33	0.6	0.6	400	357	15	2260	2955	3800	0.59	0.78
Hasil Statistik							Rata-rata		<b>0.86</b>	<b>1.10</b>	
							Standar deviasi		<b>0.211</b>	<b>0.210</b>	

Catatan : BS : British Standard, CoS : Cut-off Strength ;  $\sigma_{all} = \sigma_y$ ,  $b=0.25 \text{ hp}$

(c) SPCC-T1,2-90<sup>0</sup>

$t = 1.2 \text{ mm}$     $\sigma_{0.85} = 91.0 \text{ (MPa)}$     $\sigma_{0.7} = 107.0 \text{ (MPa)}$     $\sigma_y = 161.8 \text{ (MPa)}$     $E = 80898 \text{ (MPa)}$

<i>Id.</i>	<i>D<sub>01</sub></i> (mm)	<i>t</i> (mm)	<i>r</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	<i>n</i> (mm)	<i>P<sub>th</sub></i> (2Ch -BS) (kN)	<i>P<sub>th</sub></i> (CoS) (kN)	<i>P<sub>exp</sub></i> (N)	<i>P<sub>th</sub></i> (2CH- BS) / <i>P<sub>exp</sub></i>	<i>P<sub>th</sub></i> (CoS) / <i>P<sub>exp</sub></i>
SHS-1.2-90-15-56-1	58.62	1.2	1.2	250	207	15	7505	7465	6500	1.15	1.15
SHS-1.2-90-15-56-2	59.25	1.2	1.2	250	207	15	7523	7619	6500	1.16	1.17
SHS-1.2-90-15-56-3	59.07	1.2	1.2	250	207	15	7505	7600	6510	1.15	1.17
SHS-1.2-90-30-56-1	59.06	1.2	1.2	280	237	30	7343	8151	7460	0.98	1.09
SHS-1.2-90-30-56-2	59.95	1.2	1.2	280	237	30	7331	8288	7200	1.02	1.15
SHS-1.2-90-30-56-3	60.59	1.2	1.2	280	237	30	7348	8387	7450	0.99	1.13
SHS-1.2-90-15-106-1	110.78	1.2	1.2	400	357	15	9651	9624	9400	1.03	1.02
SHS-1.2-90-15-106-2	110.20	1.2	1.2	400	357	15	9650	9601	9530	1.01	1.01
SHS-1.2-90-15-106-3	110.46	1.2	1.2	400	357	15	9663	9615	8950	1.08	1.07
SHS-1.2-90-30-106-1	110.29	1.2	1.2	430	387	30	9446	10679	10400	0.91	1.03
SHS-1.2-90-30-106-2	111.17	1.2	1.2	430	387	30	9467	10847	10320	0.92	1.05
SHS-1.2-90-30-106-3	109.60	1.2	1.2	430	387	30	9472	10624	10570	0.90	1.01
Hasil Statistik							Rata-rata			<b>1.02</b>	<b>1.09</b>
							Standar deviasi			<b>0.09</b>	<b>0.06</b>

Catatan : BS : British Standard, CoS : Cut-off Strength ;  $\sigma_{all} = \sigma_y$ ,  $b=0.05 \text{ hp}$

(d) SPCC-T1,2-0<sup>0</sup>

$t = 1.2 \text{ mm}$     $\sigma_{0.85} = 108.0 \text{ (MPa)}$     $\sigma_{0.7} = 135.0 \text{ (MPa)}$     $\sigma_y = 173.6 \text{ (MPa)}$     $E = 86820 \text{ (MPa)}$

<i>Id.</i>	<i>D<sub>01</sub></i> (mm)	<i>t</i> (mm)	<i>r</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	<i>n</i> (mm)	<i>P<sub>th</sub></i> (2Ch -BS) (kN)	<i>P<sub>th</sub></i> (CoS) (kN)	<i>P<sub>exp</sub></i> (N)	<i>P<sub>th</sub></i> (2CH- BS) / <i>P<sub>exp</sub></i>	<i>P<sub>th</sub></i> (CoS) / <i>P<sub>exp</sub></i>
SHS-1.2-0-15-56-1	59.69	1.2	1.2	250	207	15	7521	6986	6520	1.15	1.07
SHS-1.2-0-15-56-2	59.90	1.2	1.2	250	207	15	7526	7008	6560	1.15	1.07
SHS-1.2-0-15-56-3	58.97	1.2	1.2	250	207	15	7485	6869	6510	1.15	1.06
SHS-1.2-0-30-56-1	59.52	1.2	1.2	280	237	30	7519	7907	7750	0.97	1.02
SHS-1.2-0-30-56-2	59.75	1.2	1.2	280	237	30	7446	7932	7230	1.03	1.10
SHS-1.2-0-30-56-3	58.62	1.2	1.2	280	237	30	7439	7804	7530	0.99	1.04
SHS-1.2-0-15-106-1	110.36	1.2	1.2	400	357	15	9472	8780	8390	1.13	1.05
SHS-1.2-0-15-106-2	110.56	1.2	1.2	400	357	15	9483	8793	8480	1.12	1.04
SHS-1.2-0-15-106-3	111.49	1.2	1.2	400	357	15	9468	8852	8360	1.13	1.06
SHS-1.2-0-30-106-1	109.81	1.2	1.2	430	387	30	9558	9657	9180	1.04	1.05
SHS-1.2-0-30-106-2	110.94	1.2	1.2	430	387	30	9576	9741	9670	0.99	1.01
SHS-1.2-0-30-106-3	111.89	1.2	1.2	430	387	30	9562	9835	9300	1.03	1.06
Hasil Statistik							Rata-rata			<b>1.07</b>	<b>1.05</b>
							Standar deviasi			<b>0.07</b>	<b>0.02</b>

Catatan : BS : British Standard, CoS : Cut-off Strength ;  $\sigma_{all} = \sigma_y$ ,  $b=0.05 \text{ hp}$

(e) SPCC-T1,2-r12



Tabel 4.8. Perbandingan hasil prediksi kekuatan teoritis ( $P_{th}$ ) dengan hasil pengujian ( $P_{exp}$ ) profil baja ringan SHS dengan interaksi beban tekan memusat dan momen lentur (SHS-SPCC-T1,2 dengan  $r=12$ )

Roll 0°  $\sigma_{0.85} = 108.5$  (MPa)  $\sigma_{0.7} = 135.0$  (MPa)  $\sigma_y = 173.6$  (MPa)  $E = 86820$  (MPa)  
 Roll 90°  $\sigma_{0.85} = 91.0$  (MPa)  $\sigma_{0.7} = 107.0$  (MPa)  $\sigma_y = 161.8$  (MPa)  $E = 80898$  (MPa)

<i>Id.</i>	$D_{01}$ (mm)	$t$ (mm)	$r$ (mm)	$L$ (mm)	$l$ (mm)	$n$ (mm)	$P_{th}$ (2Ch -BS) (kN)	$P_{th}$ (CoS) (kN)	$P_{exp}$ (N)	$P_{th}$ (2CH- BS) / $P_{exp}$	$P_{th}$ (CoS) / $P_{exp}$
SHS-1.2-0-30-106-1	109.41	1.2	12	430	387	30	5010	6358	7610	0.66	0.83
SHS-1.2-0-30-106-2	110.65	1.2	12	430	387	30	5020	6361	7595	0.66	0.84
SHS-1.2-0-30-106-3	110.51	1.2	12	430	387	30	5020	6361	7545	0.66	0.84
SHS-1.2-90-30-106-1	109.36	1.2	12	430	387	30	5040	5915	7000	0.72	0.85
SHS-1.2-90-30-106-2	108.46	1.2	12	430	387	30	5040	5914	7050	0.84	0.84
SHS-1.2-90-30-106-3	109.72	1.2	12	430	387	30	5040	5915	6990	0.85	0.85
Hasil Statistik							Rata-rata			<b>0.73</b>	<b>0.84</b>
							Standar deviasi			<b>0.082</b>	<b>0.007</b>

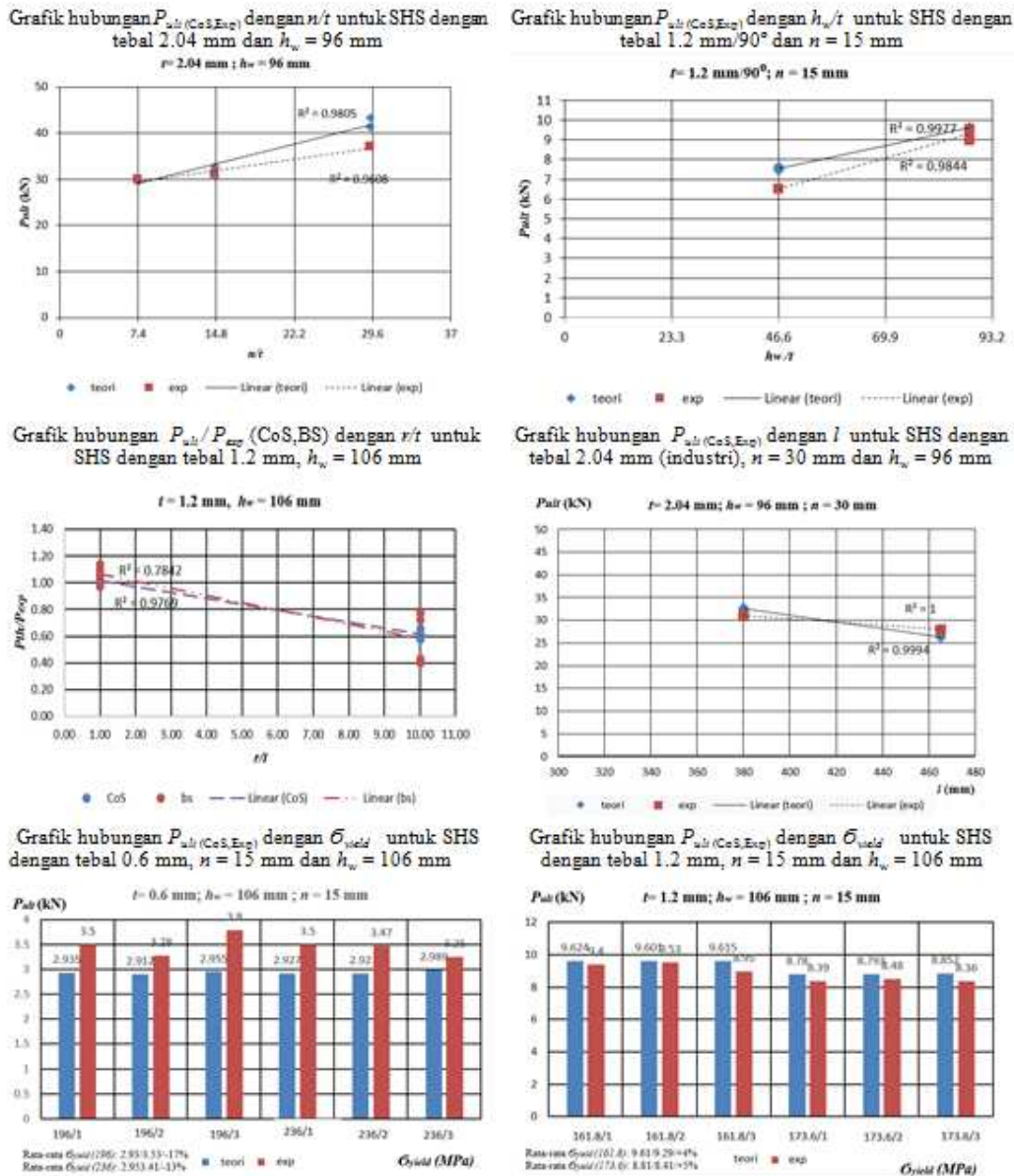
Catatan : BS : British Standard, CoS : Cut-off Strength ;  $\sigma_{all} = \sigma_y$ ,  $b=0.05$  hp

(f) SPCC-T0,6-0°

Roll 90°  $\sigma_{0.85} = 104.3$  (MPa)  $\sigma_{0.7} = 147.3$  (MPa)  $\sigma_y = 196.0$  (MPa)  $E = 97975$  (MPa)

<i>Id.</i>	$D_{01}$ (mm)	$t$ (mm)	$r$ (mm)	$L$ (mm)	$l$ (mm)	$n$ (mm)	$P_{th}$ (2Ch -BS) (kN)	$P_{th}$ (CoS) (kN)	$P_{exp}$ (N)	$P_{th}$ (2CH- BS) / $P_{exp}$	$P_{th}$ (CoS) / $P_{exp}$
SHS-0.6-0-15-56-1	56.47	0.6	0.6	250	207	15	2340	2482	2510	0.93	0.99
SHS-0.6-0-15-56-2	57.49	0.6	0.6	250	207	15	2340	2520	2420	0.97	1.04
SHS-0.6-0-15-56-3	56.82	0.6	0.6	250	207	15	2340	2496	2370	0.99	1.05
SHS-0.6-0-30-56-1	57.19	0.6	0.6	280	237	30	2410	3705	3030	0.80	1.22
SHS-0.6-0-30-56-2	56.49	0.6	0.6	280	237	30	2410	3710	3020	0.80	1.23
SHS-0.6-0-30-56-3	57.40	0.6	0.6	280	237	30	2410	3718	2890	0.83	1.29
SHS-0.6-0-15-106-1	108.29	0.6	0.6	400	357	15	1920	2927	3500	0.55	0.84
SHS-0.6-0-15-106-2	108.02	0.6	0.6	400	357	15	1930	2920	3470	0.56	0.84
SHS-0.6-0-15-106-3	107.28	0.6	0.6	400	357	15	1910	2989	3250	0.59	0.92
Hasil Statistik							Rata-rata			<b>0.78</b>	<b>1.05</b>
							Standar deviasi			<b>0.175</b>	<b>0.169</b>

Catatan : BS : British Standard, CoS : Cut-off Strength ;  $\sigma_{all} = \sigma_{y(90)}$ ,  $b=0.25$  hp



Gambar 17. Pengaruh variabel n/t, hw/t, r/t dan l

**Pembahasan**

Dari seluruh rangkain kegiatan dalam penelitian ini maka dapat dibuat ringkasan hasil penelitian berupa rangkuman hasil pengujian material seperti ditunjukkan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Rangkuman Hasil Identifikasi Material Dasar Profil SHS

No	SHS	$\sigma_{ult}$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{0.7}$ (MPa)	$\sigma_{0.85}$ (MPa)	E (MPa)	$\epsilon$ (%)	Hv	Komp. Kimia	Mikro struktur
1	$t=2,04 / 0^\circ$	349,4	298,9	254,1	209,2	149450	25,0	113	SPPC	Ferritic
2	$t=1,2 / 90^\circ$	300,0	161,8	107,0	91,0	80898,4	28,6	85	SPPC	Ferritic
3	$t=1,2 / 45^\circ$	308,9	169,3	129,7	106,6	84633	30,2	86	SPPC	Ferritic
4	$t=1,2 / 0^\circ$	315,7	173,6	135,0	108,0	86820,9	30,3	84	SPPC	Ferritic
5	$t=0,6 / 90^\circ$	337,1	196,0	147,3	104,3	97975,1	22,7	99	SPPC	Ferritic*
6	$t=0,6 / 45^\circ$	349,6	222,0	181,4	143,3	111016	21,6	97	SPPC	Ferritic*
7	$t=0,6 / 0^\circ$	368,2	236,2	206,7	178,6	118117,1	22,0	98	SPPC	Ferritic*

Catatan : Kekerasan pada permukaan SHS 1,2 = 92,2 dan SHS 0,6 = 104,6, \*) terdapat unsur pengotor (Cl), SHS2.04 (produk industri), SHS 1.2/0.6 (pelat/ SPPC)



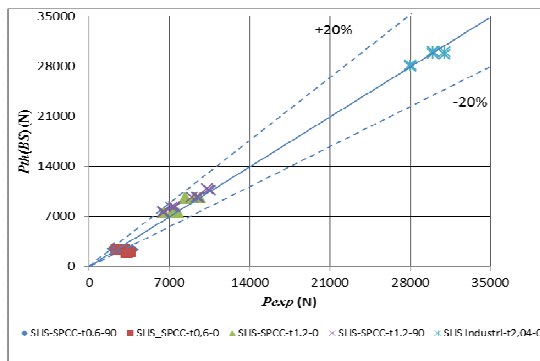
Rangkuman tingkat akurasi dari *British Standard* dan pengembangan metode evaluasi kekuatan profil baja SHS yang menerima interaksi beban memusat dan momen lentur dengan menggunakan kombinasi teori mekanisme plastis dan elastis non-linier terhadap hasil verifikasi melalui sejumlah pengujian dengan berbagai variabel ( $n$ ,  $h_w$ ,  $r$ ,  $l$ , dan  $\sigma_{yield}$ ) seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 6. Hasil tabulasi ini dapat dibuat grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 18 dan 19.

Hubungan antara panjang butir terhadap kekuatan *yield* material dasar profil SHS tebal 1,2 mm dan 0,6 mm pada arah 90°, 45° dan 0° ditunjukkan pada Gambar 20. Hal ini menunjukkan bahwa dalam suatu pelat makin panjang butirnya makin tinggi kekuatan *yield*-nya. Sedangkan struktur mikrostruktur pelat tebal 0,6 mm lebih halus dibandingkan dengan pelat tebal 1,2 mm sehingga lebih kuat.

Tabel 6.

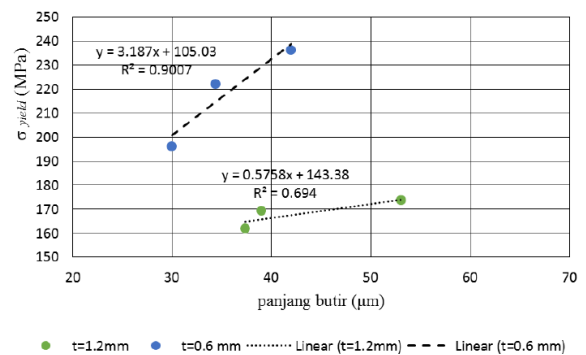
Rangkuman akurasi metode *Cut-off strength* dengan hasil pengujian profil baja SHS

No	Profil SHS	BS 5950 Part 5 1987 (BS)		Cut-off Strength (CoS)	
		Rata-rata $P_{th}(BS)/P_{exp}$	Std. Dev	Rata-rata $P_{th}(CoS)/P_{exp}$	Std. Dev
1	$t = 2,04 / 0^\circ$	0.93	0.082	0.95	0.078
2	$t = 0.6 / 90^\circ$	0.86	0.211	1.10	0.210
3	$t = 1.2 / 90^\circ$	1.02	0.009	1.09	0.006
4	$t = 1.2 / 0^\circ$	1.07	0.070	1.05	0.020
5	$t = 1.2 //r-12$	0.73	0.082	0.84	0.007
6	$t = 0.6 / 0^\circ$	0.78	0.110	1.05	0.150
<b>Rata-rata</b>		<b>0.90</b>	<b>0.094</b>	<b>1.01</b>	<b>0.079</b>



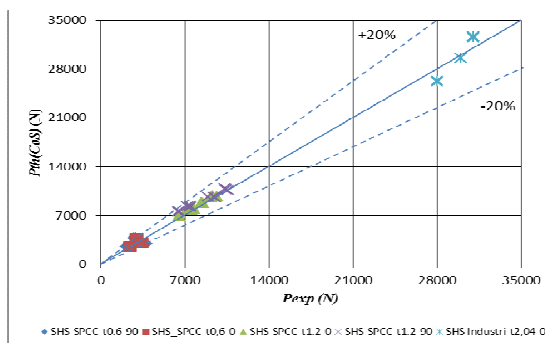
Gambar 18.

Grafik hubungan  $P_{th}(BS)$  dengan  $P_{exp}$



Gambar 20.

Grafik hubungan panjang butir



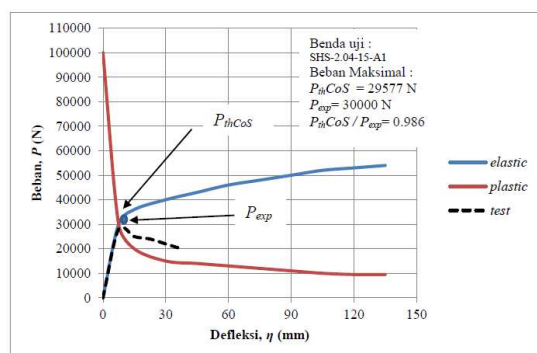
Gambar 19.

Grafik hubungan  $P_{th}(CoS)$  dengan  $P_{exp}$

Data hasil uji material dasar profil baja SHS ini dipakai dalam penelitian ini untuk memprediksi kekuatan profil baja SHS yang menerima interaksi beban memusat dan momen lentur adalah data  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{0.7}$ ,  $\sigma_{0.85}$ , dan  $E$ . Data ini sangat bermanfaat sebagai data input pada perhitungan dengan menggunakan program komputer. Karena itu pengujian karakteristik material dasar profil SHS sangat membantu dalam menganalisis adanya perbedaan antara prediksi kekuatan teoritis dan eksperimental.

Gambar 21 menunjukkan perbandingan kurva beban teoritis dan beban aktual terhadap defleksi dari benda uji SHS-2.04-15-A1. Perilaku beban runtuh dari benda uji yang diestimasi dengan metode *cut-off strength*

( $P_{thCoS}$ ) ini cenderung lebih tinggi dari kekuatan aktual selama runtuh ( $P_{exp}$ ). Gambar 21 ini menunjukkan perbedaan perilaku beban runtuh teoritis dan beban runtuh aktual dari benda uji dimana penurunan perilaku beban runtuh teoritis lebih kecil dibanding perilaku kekuatan runtuh aktual. Walaupun perilaku beban runtuh aktual dari benda uji ini belum tepat seperti yang diprediksi tetapi dari sudut pandang penggunaan pengembangan idealisasi model mekanisme plastis dalam penelitian ini dapat menghasilkan variasi nilai teoritis dimana penyebarannya (*scattered*) masih dalam batas yang diizinkan.



Gambar 21.

Grafik beban teoritis ( $P_{thCoS}$ ) dan beban runtuh ( $P_{exp}$ ) dari benda uji SHS-2.04-15-A1

Dengan mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya<sup>3,6,9,12,14</sup> dimana batas yang diizinkan  $\pm 20\%$  dan berdasarkan hasil akurasi penelitian pada Tabel 6 maka metode evaluasi kekuatan profil baja SHS yang menerima interaksi beban memusat dan momen lentur dengan menggunakan BS 5950 Part 5 1987 untuk profil SHS dengan tebal 2,04 mm mempunyai akurasi -7% dengan standar deviasi 0,082. Untuk profil SHS dengan tebal 0,6 mm ( $90^\circ$ ) mempunyai akurasi -14% dengan standar deviasi 0,211 dan profil SHS dengan tebal 0,6 mm ( $0^\circ$ ) mempunyai akurasi -22% dengan standar deviasi 0,011. Untuk profil SHS dengan tebal 1,2 mm ( $r=12$ ) mempunyai akurasi -27% dengan standar deviasi 0,082. Sedangkan profil SHS dengan tebal 1,2 mm ( $90^\circ$ ) mempunyai akurasi +2% dengan standar deviasi 0,009 dan profil SHS dengan tebal 1,2 mm ( $0^\circ$ ) mempunyai akurasi +7% dengan standar deviasi 0,070. Hal ini menunjukkan bahwa akurasi datanya umumnya berada dalam batas yang diizinkan ( $\pm 20\%$ ). Dari Tabel 6 ini juga terlihat akurasi rata-rata menggunakan metode BS 5950 Part 5 1987 adalah 0,9 atau -10% (cenderung tidak konservatif)

Untuk metode evaluasi kekuatan profil baja SHS yang menerima interaksi beban memusat dan momen lentur dengan menggunakan kombinasi teori mekanisme plastis dan elastis non-linier.

Akurasi perbandingan kekuatan SHS antara hasil analisis menggunakan metode *cut-off strength* ( $P_{thCoS}$ ) dengan kombinasi teori *plastic mechanisms* dan *non-linear elastic* dengan hasil pengujian ( $P_{exp}$ ) menunjukkan bahwa profil SHS dengan tebal 2,04 mm mempunyai akurasi -5% dengan standar deviasi 0,078. Untuk profil SHS dengan tebal 0,6 mm ( $90^\circ$ ) mempunyai akurasi +10% dengan standar deviasi 0,210 dan profil SHS dengan tebal 0,6 mm ( $0^\circ$ ) mempunyai akurasi +5% dengan standar deviasi 0,150. Untuk profil SHS dengan tebal 1,2 mm ( $r=12$ ) mempunyai akurasi -16% dengan standar deviasi 0,007. Sedangkan profil SHS dengan tebal 1,2 mm ( $90^\circ$ ) mempunyai akurasi +9% dengan standar deviasi 0,006 dan profil SHS dengan tebal 1,2 mm ( $0^\circ$ ) mempunyai akurasi +5% dengan standar deviasi 0,020. Hal ini menunjukkan bahwa akurasi datanya berada dalam batas yang diizinkan ( $\pm 20\%$ ). Dari Tabel 6 ini juga terlihat akurasi rata-rata menggunakan metode *cut-off strength* adalah 1,01 atau +1% (cenderung konservatif).

Pengaruh parameter dimensi ( $n$ ,  $h_w$ ,  $r$ ,  $l$ ) dan kekuatan material ( $\sigma_{yield}$ ) terhadap kekuatan profil baja SHS yang menerima interaksi beban memusat dan momen lentur adalah :

- Pengaruh  $n$  : nilai rasio  $n/t$  naik menyebabkan rasio  $P_{th}/P_{exp}$  naik
- Pengaruh  $h_w$  : nilai rasio  $h_w/t$  naik menyebabkan rasio  $P_{th}/P_{exp}$  naik
- Pengaruh  $r$  : nilai rasio  $r/t$  naik menyebabkan rasio  $P_{th}/P_{exp}$  turun
- Pengaruh  $l$  : nilai  $l$  naik menyebabkan rasio  $P_{th}/P_{exp}$  turun
- Pengaruh  $\sigma_{yield}$  : nilai  $\sigma_{yield}$  naik maka rasio  $P_{th}/P_{exp}$  cenderung tetap

Pengaruh dimensi ( $n$ ,  $h_w$ ,  $r$ ,  $l$ ) terhadap kekuatan profil baja SHS yang diperoleh dalam penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya<sup>6,9,14</sup>. Pengaruh kekuatan material dasar ( $\sigma_{yield}$ ) yang meningkat menyebabkan kekuatan profil baja SHS yang menerima interaksi beban memusat dan momen lentur dalam cenderung tetap. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya<sup>2</sup> dimana pada kondisi suatu pelat tipis mengalami beban tekan maka kekuatan material tidak berpengaruh tetapi yang sangat berpengaruh pada kondisi tersebut adalah kestabilan yang dipengaruhi oleh rasio dimensi ( $h_w/t$  dan  $b_p/t$ ) yang mengakibatkan

*local buckling* dan rasio  $l/r$  yang mengakibatkan *global buckling*.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan ada beberapa hal yang perlu mendapat perhatian dan disampaikan sebagai berikut. Pengujian karakteristik material dasar secara komprehensif dari profil SHS sangat bermanfaat memberikan informasi penting dalam menganalisis adanya perbedaan antara prediksi kekuatan teoritis dan eksperimental. Formulasi yang dihasilkan untuk memprediksi kekuatan profil baja SHS yang menerima interaksi beban tekan memusat dan momen lentur berdasarkan hasil pengembangan metode analisa kekuatan profil baja SHS dengan kombinasi teori mekanisme plastis dan elastis non-linear berdasarkan identifikasi dan idealisasi model mekanisme kerusakan hasil pengujian. Rumus prediksi kekuatan analitis berdasarkan mekanisme plastis adalah

$$(P_p) = \frac{-1 + \sqrt{1^2 + 4(B_1 + B_2)(CA + CA_2)}}{2(B_1 + B_2)}$$

Konstante  $C$  merupakan fungsi dari *yield arc depth* ( $b$ ) yang berbanding terbalik dengan defleksi global profil baja SHS ( $\eta$ ), dimana makin besar nilai defleksi  $\eta$  maka nilai beban plastis ( $P_p$ ) makin mengecil. Jadi grafik *plastic mechanisms* cenderung menurun (*unloading*) sejalan dengan peningkatan nilai defleksi  $\eta$ . Sedangkan rumus untuk memprediksi kekuatan analitis berdasarkan *non-linear elastic* ( $P_e$ ):

$$(P_e) = \left[ \frac{\{4h_p l - 12(l-n)y_c\} \{7E(4l)^s (\sigma_{0.7})^{(s-1)}\}^{1/s}}{3l^3 [(l-n).y_c]^s} \right] \cdot (\eta)^{1/s}$$

Pada ruas kanan terlihat variabel defleksi  $\eta$ . Untuk memeriksa secara sederhana dapat dilihat bahwa jika nilai  $\eta = 0$  maka akan diperoleh  $P_e = 0$  artinya grafik perilaku profil baja SHS cenderung meningkat sejalan peningkatan nilai defleksi  $\eta$ .

Pengembangan model atau metode analisis kekuatan profil SHS akibat interaksi beban tekan memusat dan momen lentur yang didasarkan pada metode *cut-off strength* dimana kekuatan profil ( $P_{th,CoS}$ ) ditentukan dari nilai beban pada perpotongan kurva perilaku *plastic mechanisms* dan *non-linear elastic* telah direalisasikan dalam bentuk perangkat lunak (*software*) komputer dimana aplikasi model analisis tersebut tidak tergantung pada faktor keamanan (*safety factor*). Perbandingan kekuatan profil SHS

dengan tebal 2,04 mm, tebal 0,6 mm dan tebal 1,2 mm antara hasil analisis menggunakan British Standard BS 5950 Part 5 1987 ( $P_{thBS}$ ) dengan asumsi SHS beam dibentuk dari dua buah profil kanal C dengan hasil pengujian ( $P_{exp}$ ) mempunyai nilai rata-rata sebesar 0,90 dengan akurasi rata-rata - 10 % dan rata-rata standar deviasi 0,094. Tingkat akurasi ini berada dalam batas yang diizinkan ( $\pm 20$  %).

Perbandingan kekuatan profil SHS dengan tebal 2,04 mm, tebal 0,6 mm dan tebal 1,2 mm antara hasil analisis menggunakan metode *cut-off strength* ( $P_{thCoS}$ ) dengan kombinasi teori *plastic mechanisms* dan *non-linear elastic* dengan hasil pengujian ( $P_{exp}$ ) mempunyai nilai rata-rata sebesar 1,01 dengan akurasi rata-rata +1,33 % dan rata-rata standar deviasi 0,079. Tingkat akurasi ini berada dalam batas yang diizinkan ( $\pm 20$  %).

Secara teoritis dan experimental, profil SHS lebih kuat mendukung interaksi beban tekan memusat dan momen lentur sejalan dengan peningkatan parameter rasio  $n/t$  dan  $h_w/t$  sedangkan akibat peningkatan parameter  $r/t$  dan panjang bentang ( $l$ ) menyebabkan kekuatan interaksi beban tekan memusat dan momen lentur profil SHS akan lebih melemah. Parameter penelitian tegangan *yield* material ( $\sigma_{yield}$ ) terhadap hasil prediksi dan pengujian kekuatan profil SHS yang menerima interaksi beban tekan memusat dan momen lentur tidak berpengaruh signifikan dimana parameter yang lebih berpengaruh adalah faktor dimensi yaitu rasio kelangsingan ( $h_w/t$ ). Pengaruh sifat isotropik material dasar profil baja SHS perlu dipertimbangkan dalam memprediksi kekuatannya akibat beban tekan memusat dan momen lentur.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini merupakan bagian dari penelitian yang digunakan untuk penulisan disertasi doktor di Universitas Indonesia. Penelitian untuk disertasi doktor ini dibiayai oleh Kementerian Ristek dalam rangka Program Beasiswa Paska sarjana Ristek. Semua pengujian dan investigasi material yang digunakan dilaksanakan di Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur, Kedeputian Teknologi Industri Rancang Bangun dan Rekayasa, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (B2TKS, TIRBR – BPPT).

## DAFTAR PUSTAKA

1. Winter, G., dan Pian, R. H. J., "Crushing strength of Thin Steel Webs," *Engineering Experiment Station*, Bulletin No. 35, Cornell University, New York, April, 1946.
2. Yu, W. W., *Cold-Formed Steel Structures-Design Analysis-Construction*, McGraw-hill Book Company, 1973.
3. Murray, N. W., "The Behaviour of Thin Stiffened Steel Plate," *International Association For Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, Vol. 33-1, hal. 191-201, 1973.
4. Murray, N. W., "The Static Approach to Plastic Collapse and Energy Dissipation in Some Thin-Walled Steel Structures," *Structural Crashworthiness*, editor N. Jones dan T. Wierzbicki, Butterworths, hal. 44-65, 1989.
5. Callister, D. W., *Material Science and Engineering An Introduction*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1991.
6. Setiyono, Harkali, *Web Crippling Of Cold-Formed Plain Channel Steel Section Beams*, PhD Thesis, University of Strathclyde, August, 1994.
7. Setiyono, Harkali, "Application of Plastic Mechanism Approach to Analyse the Strength of a Light Gauge Steel Section," *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Pacific Conference on Automotive Engineering*, Melbourne-Australia, hal. 53-58, 23-28 Mei, 1999.
8. Setiyono, Harkali, "The Development of a Combined Plastic Mechanism and Elastic-Analytical Model to Estimate the Moment Capacity of a Thin-Walled Channel Steel Section," *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Pacific Conference (IPC 10) on Automotive Engineering*, Shanghai-China, 6-9 November, 2001.
9. ..., JIS G 3141," *Commercial Cold Rolled SPCC Steels*", 2005.
10. Setiyono, Harkali, "Plastic Mechanism and Elastic in the Strength Estimation of an Axially Compressed Thin-walled Channel Steel Section Beam," *Electronic Journal of Structural Engineering (eJAE International)*, Juni, 2006. ..., *American Iron and Steel Institute, Commentary on North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, Washington, D.C. 2007.
11. Setiyono, Harkali, "An Alternative Approach to the Analytical Determination of the Moment Capacity of Thin-Walled Channel Steel Beam Section", *International Journal of Mechanic Science*, Vol. 50, Agustus, 2008.
12. Poonaya, S., Teeboonme, U., dan Thinvongpituk, C., "Plastic Collapse Analysis of Thin-walled Circular Tubes subjected to bending," *Thin-Walled Structures*, Volume 47, hal. 637-645, 6-7 Juni, 2009.
13. Kadir, Andi M., Priadi, Dedi, Siradj, Eddy S., Setiyono, H., "Strength Analysis of a Thin-Walled Steel Square Hollow Section Beam Affected by the Interaction of Concentrated-Compressive Load and Bending Moment," *Seminar on Quality in Research (QIR)*, Universitas Indonesia, 2011. Elchalakani, M., Fernando, D., "Plastic Mechanism Analysis of Unstiffened Steel I-Section Beams Strengthened with CFRP under 3-Point Bending," *Thin-Walled Structures*, Volume 53, hal. 58-71, April, 2012.
14. Dowling, Norman E., *Mechanical Behaviour of Material: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, edisi ke 4, Prentice-Hall International Edition, USA, 2013.
15. Kadir, Andi M., Priadi, D., Siradj, Eddy S., Setiyono, H., "Investigasi Experimental Perilaku Profil Baja Ringan Berpenampang Persegi Akibat Interaksi Beban Tekan Memusat dan Momen Lentur," *Majalah Metalurgi LIPI*, Volume 28, hal. 33-47, April, 2013.
16. Kadir, Andi M., Priadi, D., Siradj, Eddy S., Setiyono, H., "Developing a Strength Analytical Method of a Thin-Walled Steel SHS Beam by Combine Theory of Plastic Mechanism and Non-linear Elastic," *Advanced Materials Research*, Volume 746, hal. 428-433, 2013.
17. Kadir, Andi M., Priadi, D., Siradj, Eddy S., Setiyono, H., "Effect of Rolling Direction to The Strength of A Thin-Walled Steel SHS Beam under Concentrated-Compressive Load and Bending Moment," *Advanced Materials Research*, Volume 789, hal. 398-402, 2013.
18. Kadir, Andi M., *Pengembangan Metode Evaluasi Kekuatan Dari Profil Baja Persegi (Square Hollow Section/SHS) dengan Menggunakan Teori Gabungan Pendekatan Mekanisme Plastik dan Elastis*, Disertasi Doktor, Universitas Indonesia, Depok, Juli, 2014.