

# INVESTIGASI ANALITIS DAN EKSPERIMENTAL KEKUATAN PROFIL BAJA RINGAN TERHADAP INTERAKSI LOCAL DAN GLOBAL BUCKLING

Harkali Setiyono

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) - BPPT  
Kompleks Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

## ABSTRAK

**INVESTIGASI ANALITIS DAN EKSPERIMENTAL KEKUATAN PROFIL BAJA RINGAN TERHADAP INTERAKSI LOCAL DAN GLOBAL BUCKLING.** Makalah ini membahas metode pendekatan analitis dan eksperimental untuk mengevaluasi kekuatan profil baja ringan yang banyak dijumpai sebagai bahan konstruksi kolom terhadap pengaruh interaksi *local* dan *global buckling*. Pendekatan analitis dilaksanakan dengan mempertimbangkan pengaruh *local buckling* terhadap keefektifan penampang profil dalam mendukung beban kerja, dimana dimensi efektif penampang profil selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk estimasi besarnya tegangan kritis sampai profil mengalami *global buckling*. Ketelitian metode pendekatan analitis juga diverifikasi dengan membandingkan hasilnya terhadap tegangan kritis *buckling* aktual yang diukur melalui pengujian tekan aksial sejumlah profil baja ringan berpenampang persegi empat sampai mengalami *column buckling*. Verifikasi metode analitis yang digunakan menunjukkan bahwa sebagian besar data analitis cenderung konservatif terhadap data eksperimental pada kisaran 8,5%. Hal ini terlihat jelas dari hasil evaluasi statistik populasi deviasi data analitis, dimana data statistik menunjukkan bahwa nilai rata-rata deviasi data analitis adalah 1.085 dengan standar deviasi sebesar 0,047.

**Kata kunci:** *local* dan *global buckling*, penampang efektif, profil baja ringan, tegangan kritis *buckling*

## ABSTRACT

**ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE STRENGTH OF A LIGHTWEIGHT STEEL SECTION SUBJECTED TO THE INTERACTION OF LOCAL AND GLOBAL BUCKLING.** The paper discusses a method of analytical and experimental approaches to evaluate the strength of a lightweight steel section, which is largely encountered as a structural member in column construction with respect to the interaction of local and global buckling. The analytical approach is performed by considering the influence of local buckling on the effectiveness of cross section elements in carrying applied loads where the effective cross section is subsequently used as a basic criterion in estimating critical stresses until the section undergoes global buckling. The accuracy of the method of analytical approach used is also verified by comparing its results to actual-critical buckling stresses measured in axial compression tests on a number of rectangular box lightweight steel sections to column buckling failure. Verification of the analytical method used indicates that most of analytical data obtained tends to be conservative with respect to experimental one by approximately 8.5%. This is clearly seen from the results of a statistical evaluation on the population of analytical data deviation, where the statistical data shows that a mean value of the analytical data deviation is 1.085 with the standard deviation of 0.047.

**Key words:** *Local and global buckling, effective cross section, lightweight steel section, critical buckling stresses*

## PENDAHULUAN

Profil baja ringan adalah jenis profil baja yang memiliki dimensi ketebalan relatif tipis dengan rasio dimensi lebar setiap elemen profil terhadap tebalnya sangat besar. Karena dimensi ketebalan profil relatif tipis, maka pembentukan profil dapat dilaksanakan menggunakan proses pembentukan dingin (*cold forming processes*). Didalam proses ini, profil dibentuk dari pelat atau lembaran baja menjadi bentuk yang diinginkan melalui mesin rol atau mesin tekuk pelat (*rolling, press* atau *bending brake machines*) pada

suhu ruangan. Ketebalan pelat baja yang umumnya digunakan sebagai bahan dasar pembentukan profil biasanya berkisar antara 0.3 mm hingga 6 mm [1,2], tetapi pernah juga dilaporkan bahwa pembentukan dingin profil jenis ini berhasil dilaksanakan dengan bahan baku pelat baja setebal 18 mm.

Profil baja ringan sangat berbeda dibanding profil baja konvensional yang dibentuk melalui proses pengerjaan panas (*hot formed steel sections*). Jenis profil pertama dipengaruhi oleh tegangan sisa tekan yang

diakibatkan oleh *strain hardening* dalam proses pengerjaan dingin sedangkan pada jenis profil kedua, tegangan sisa yang timbul diakibatkan oleh proses pendinginan. Karena rasio dimensi lebar terhadap tebal dinding profil disetiap bagian elemennya sangat besar, maka akibat beban tekan sering kali profil pertama-tama mengalami *local buckling* sebelum mencapai kekuatan maksimumnya dalam mendukung beban kerja. Bentuk mekanisme kerusakan profil sangat bervariasi tergantung dari jenis pembebanan yang dapat didukung profil sampai mencapai kekuatan maksimumnya.

Makalah ini membahas perilaku profil baja ringan berpenampang persegi empat yang sering dijumpai sebagai bahan dasar dari bagian kolom dalam desain konstruksi baja terhadap interaksi pengaruh *local* dan *global* atau *column buckling*. Pengaruh interaksi kedua tipe *buckling* pada konstruksi kolom baja sangat dipengaruhi oleh nilai *slenderness ratio* yang merupakan perbandingan antara panjang kolom dengan radius girasi penampang kolom terhadap sumbu terlemah. Berdasarkan nilai *slenderness ratio*, mekanisme kerusakan profil baja ringan sebagai bagian dari konstruksi kolom dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu kolom akan rusak akibat pengaruh *local buckling* saja pada nilai *slenderness ratio* yang rendah, interaksi *local* dan *global* atau *column flexural buckling* pada nilai *slenderness ratio* yang sedang dan *global buckling* tanpa tanda-tanda awal terbentuknya *local buckling* pada nilai *slenderness ratio* yang tinggi.

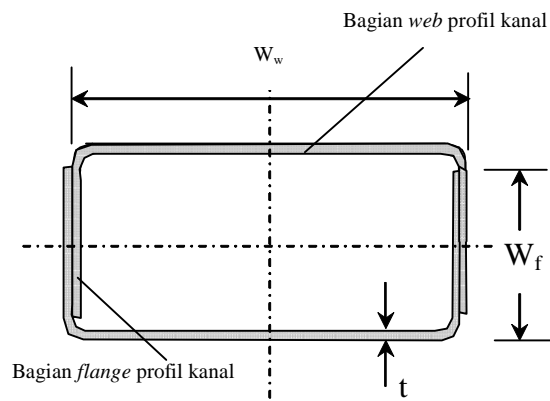
Tipe kerusakan diatas dapat terjadi kalau profil sebagai konstruksi kolom tidak dipengaruhi oleh *torsional* atau *torsional-flexural buckling*, dimana terbentuknya *local buckling* pada pelat profil terjadi sebelum material dasarnya mengalami *yielding*.

Pembahasan perilaku kolom dari profil baja ringan berpenampang persegi empat akibat pengaruh seperti pada butir kedua diatas dalam makalah ini didasarkan pada hasil investigasi analitis dan eksperimental. Didalam investigasi analitis, dimensi penampang profil yang efektif mendukung beban kerja ditentukan berdasarkan pertimbangan pengaruh *local buckling* dengan memanfaatkan konsep analisis lebar efektif pada setiap elemen profil yang tertekan. Tegangan kritis yang dapat didukung profil sampai mengalami *column buckling* ditentukan berdasarkan dimensi penampang efektif profil. Untuk memastikan ketelitian hasil pendekatan analitis, hasilnya diverifikasi menggunakan nilai aktual tegangan kritis *buckling* yang terukur dari pendekatan eksperimental.

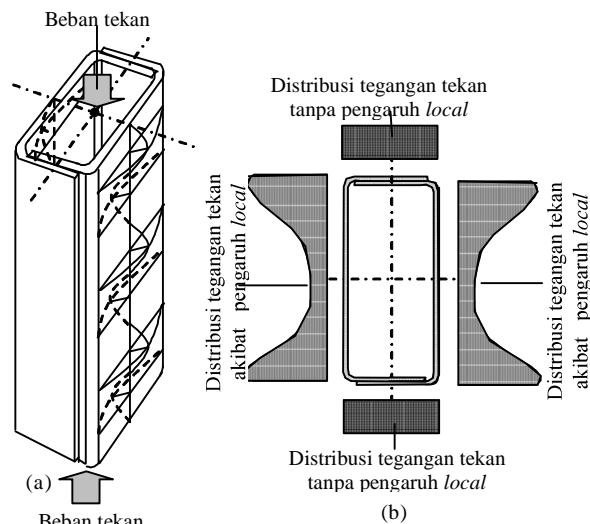
## PENDEKATAN ANALITIS

Didalam pendekatan analitis, pertimbangan penentuan tegangan kritis *buckling* yang didukung oleh

profil baja ringan berpenampang persegi empat seperti terlihat dalam Gambar 1 didasarkan pada pengaruh *local buckling* disetiap bagian pelat profil. Terlihat dalam gambar bahwa penampang profil tersusun dari dua buah profil kanal ringan yang ditangkupkan sehingga kedua bagian *flangeny* saling melekat. Dimensi pelat profil bagian atas dan bawah tersusun dari satu ketebalan dimensi *web* ( $W_w$ ) sedang dimensi sisi kiri dan kanan tersusun dari dua ketebalan dimensi *flange* ( $W_f$ ). Jadi akibat beban tekan pada konstruksi kolom, kemungkinan terbesar *local buckling* terjadi pada kedua pelat atas dan bawah sedang kedua pelat sisi kiri dan kanan lebih kuat dalam menghindari terbentuknya *local buckling*.



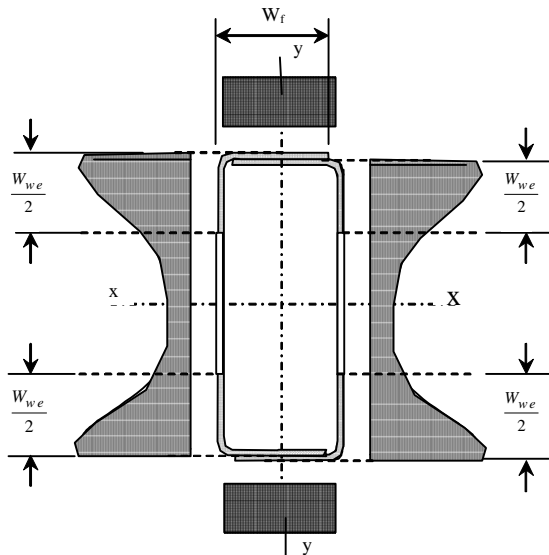
Gambar 1. Penampang profil



Gambar 2. Pengaruh *local buckling*, (a) *local buckling* pada dinding pelat tunggal profil baja kolom, (b) Distribusi tegangan elastis pada dinding pelat tunggal dan ganda profil baja kolom.

Didalam Gambar 2 (a) terlihat bahwa desain profil dibuat sedemikian rupa sehingga *local buckling* hanya terjadi pada pelat profil yang berdinding tunggal. Pengaruh *local buckling* tidak perlu dipertimbangkan pada sisi pelat berdinding ganda sehingga sisi ini boleh dikatakan sepenuhnya efektif mendukung beban seperti yang jelas terlihat dari distribusi tegangan

elastis didalam Gambar 2(b). Tetapi pengaruh *local buckling* menyebabkan sisi pelat berdingtunggal menjadi tidak efektif mendukung beban, dimana distribusi tegangan elastis pada sisi ini cenderung maksimum diujung-ujung pelat dan melemah kearah bagian tengahnya. Jadi akibat *local buckling* maka penampang profil yang masih efektif mendukung beban kerja berubah bentuk menjadi penampang seperti terlihat dalam Gambar 3.



Gambar 3. Penampang efektif profil

Bagian pelat tunggal dalam Gambar 3 merupakan *stiffened elements* karena kedua ujungnya ditumpu secara longitudinal oleh bagian *flange* profil dan dimensi  $W_{we}$  adalah lebar pelat yang efektif mendukung beban. Lebar efektif *stiffened plate elements* akibat *local buckling* secara klasik telah diformulasikan oleh George Winter sebagai berikut :

dimana :

$W_w$  : keseluruhan lebar pelat

$\sigma_{cr}$  : tegangan kritis *local buckling*

$$\frac{W_{we}}{W_w} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \left( 1.0 - 0.22 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$\sigma_{max}$  : tegangan maksimum yang bekerja diujung-ujung pelat.

Berdasarkan persamaan Bryan, tegangan kritis *local buckling* ( $\sigma_{cr}$ ) dapat dihitung dari :

$$\sigma_{cr} = K \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left( \frac{W_w}{t} \right)^2} \dots \dots \dots (2)$$

dimana :

K : konstanta *buckling* yang bergantung pada jenis pelat, dimana untuk *stiffened plate element* nilai K = 4

E : modulus elastisitas bahan baku pelat

$\nu$  : Poisson's ratio

Lebar efektif  $W_{we}$  juga dapat ditentukan dengan menggunakan metode standar desain seperti yang terdapat dalam spesifikasi desain *British Standard* [ 3 ]. Untuk jenis pelat tunggal dalam Gambar 3, lebar efektifnya ditentukan oleh *British Standard* dengan syarat kalau :

$$\frac{f_c}{p_{cr}} \leq 0.123 ; W_{we} = W_w$$

$$\frac{f_c}{p_{cr}} > 0.123 ; \frac{W_{we}}{W_w} = \left[ 1 + 14 \left[ \left( \frac{f_c}{p_{cr}} \right)^2 - 0.35 \right]^4 \right]^{-0.2} \dots \dots (3)$$

$f_c$  adalah tegangan tekan pada penampang efektif pelat sedangkan  $p_{cr}$  adalah tegangan *local buckling* yang dapat ditentukan dari :

$$p_{cr} = 0.904 E K \left( \frac{t}{W_w} \right)^2 \dots \dots \dots (4)$$

Konstanta *buckling* pelat tunggal pada Gambar 3 dihitung dengan rumus *British Standard* :

$$K = \left\{ 7 - 5.4 \left( \frac{W_w}{W_f} \right) + 50 \left( \frac{W_w}{W_f} \right) \left[ \left( \frac{W_w}{W_f} - 0.55 \right) \left( \frac{W_w}{W_f} - 0.75 \right) \left( \frac{W_w}{W_f} - 1 \right) \right] \right\} \left( \frac{W_w}{W_f} \right)^2 (5)$$

Penampang efektif profil yang terlihat dalam Gambar 3 digunakan sebagai dasar untuk menentukan tegangan kritis *buckling* sampai profil mengalami *column/global buckling*.

Besarnya tegangan kritis *global buckling* ( $\sigma_{cr,gb}$ ) diprediksi berdasarkan teori *Euler Buckling* sebagai berikut :

$$(\sigma_{cr})_{gb} = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{K_{eff} L}{r} \right)^2} \dots \dots \dots (6)$$

$K_{eff}$  dan L adalah faktor panjang efektif dan panjang profil kolom, dimana  $K_{eff}$  diperoleh dari formulasi :

$$K_{eff} = \pi \left( \frac{r}{L} \right) \sqrt{\frac{2E}{\sigma_y}} \dots \dots \dots (7)$$

$\sigma_y$  adalah *yield strength* material dasar pelat profil sedangkan r adalah jari-jari girasi penampang efektif profil terhadap sumbu terlemah. Profil pada saat mengalami *column buckling*, penampangnya cenderung melentur terhadap sumbu terlemah y. Oleh karena itu jari-jari girasi ditentukan terhadap sumbu terlemah y ( $r_y$ ) melalui rumus berikut ini.

dimana :

$$(r)_y = \sqrt{\frac{(I_{eff})_y}{A_{eff}}} \dots \dots \dots (8)$$

$(I_{eff})_y$  : momen inersia penampang efektif profil terhadap sumbu lentur y

$A_{eff}$  : luas penampang efektif profil

## PENDEKATAN EKSPERIMENTAL

Didalam pendekatan eksperimental, kekuatan terhadap interaksi *local* dan *global buckling* diukur melalui pengujian tekan aksial 18 batang profil baja ringan berpenampang persegi empat seperti yang terlihat dalam Gambar 1. Konfigurasi desain masing-masing benda uji merupakan susunan dari 2 batang profil baja kanal ringan yang ditangkupkan dengan melekatkan kedua bagian *flangeny* melalui sistem ikatan sejenis lem *epoxy*. Kedua profil baja kanal ringan penyusunnya dibentuk melalui pengerjaan dingin (*Press-brake-cold forming*) dengan alat penekan yang tajam sehingga dimensi radius kelengkungan antara bagian *flange* dan *web* sangat kecil. Kerataan setiap bagian pelat profil diperiksa secara acak dengan toleransi ketidak rataan permukaan pelat dibatasi tidak lebih dari 0.1 tebal pelat dan 0.001 lebarnya.

Untuk memastikan kekuatan profil sebagai konstruksi kolom terhadap interaksi *local* dan *global buckling*, maka dimensi profil didesain dengan memvariasi parameter-parameter yang sangat berpengaruh terhadap terbentuknya kedua tipe *buckling* tersebut. Parameter-parameter *buckling* yang dimaksud bervariasi sebagai berikut :

- Rasio dimensi lebar pelat tunggal terhadap tebalnya,  $\frac{W_w}{t} = 57.2 - 151.8$  untuk tegangan kritis terhadap *local buckling*.
- Rasio kelangsingan (*Slenderness ratio*) yaitu perbandingan antara panjang kolom profil ( $L$ ) dan jari-jari girasinya ( $r_y$ ),  $\frac{L}{r_y} = 8.5 - 138.2$  untuk tegangan kritis terhadap *global* atau *column buckling*.

Karena profil akan mengalami *flexural column buckling* terhadap sumbu terlemahnya, maka jari-jari girasi penampang profil ( $r_y$ ) ditentukan terhadap sumbu  $y$ . Dimensi nominal tebal dinding tunggal ( $t$ ) dan lebar dinding ganda ( $W_f$ ) untuk semua profil yang diuji dibuat selalu konstan kecuali dimensi lebar bagian dinding tunggal ( $W_w$ ) dan panjang profil ( $L$ ) yang bervariasi, dimana nilai nominal tersebut adalah sebagai berikut :

$$t = 1.47 \text{ mm}$$

$$W_f = 50.80 \text{ mm}$$

$$W_w = (88.90 - 228.60) \text{ mm}$$

$$L = (192.28 - 3124.20) \text{ mm}$$

Pelat dasar profil terbuat dari jenis baja karbon untuk konstruksi dan dari hasil evaluasi uji tarik statis, sifat mekanisnya adalah :

$$\text{Kekuatan luluh (Yield strength), } \sigma_y = 289 \text{ MPa}$$

$$\text{Kekuatan tarik (Ultimate tensile strength),}$$

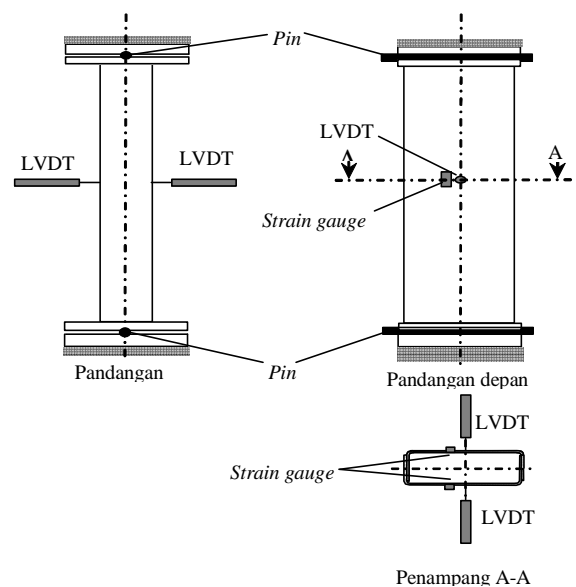
$$\sigma_{UTS} = 372 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus elastisitas, } E = 203 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Didalam pengujian tekan aksial, profil diuji sebagai *Euler's column* dimana kedua ujungnya ditahan dengan sistem tumpuan *pin* dan beban uji

dipasang berimpit dengan sumbu longitudinal profil. Secara skematis konfigurasi pengujian profil dapat dilihat dalam Gambar 4, dimana kedua sistem tumpuan *pin* terpasang pada lobang takikan pelat penumpu dan kedudukannya sejajar dengan sumbu terlemah penampang profil.

Untuk menjamin konsentrisitas beban uji yang diberikan maka tepat ditengah bentang profil dikedua permukaan pelat tunggalnya dipasang *strain gauges*. Beban uji pertama-tama diberikan bertahap sampai mencapai 20% dari estimasi beban uji maksimumnya dan peningkatan regangan yang ditunjukkan oleh *strain gauges* pada setiap tahap pembebanan uji diukur dan dicatat menggunakan *data logger*. Kalau distribusi regangan dikedua permukaan pelat terlihat selalu merata, maka konsentrisitas beban uji sudah dapat dikatakan tercapai sehingga pengujian dapat diteruskan sampai profil rusak oleh *flexural buckling*. Sebagai ukuran kerataan distribusi regangan dikedua permukaan pelat tunggal profil adalah kalau perbedaannya masih berada dalam batas toleransi 5%. Untuk mengukur defleksi lateral profil maka dikedua permukaan tunggalnya dipasang LVDTs seperti yang terlihat dalam Gambar 4 dan sistem pemasangan LVDTs ini untuk mengantisipasi *flexural buckling* terhadap sumbu terlemahnya.



Gambar 4. Skema pengujian tekan aksial profil

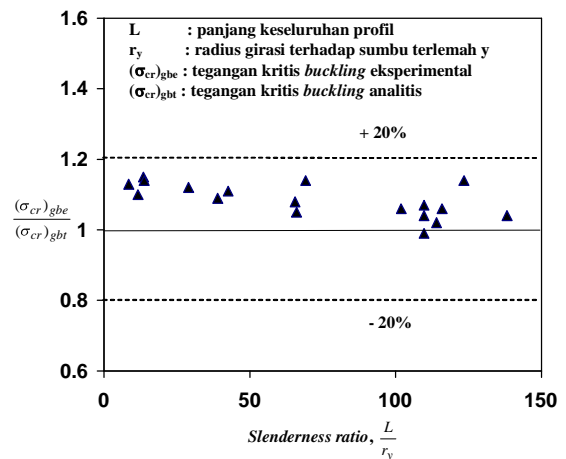
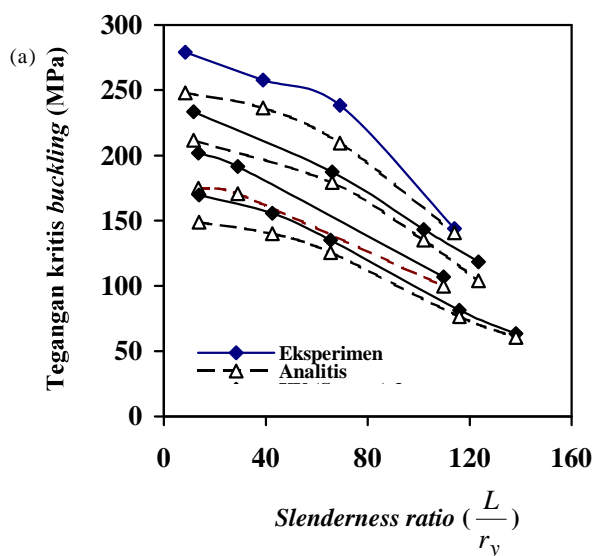
## VERIFIKASI PREDIKSI ANALITIS

Pengaruh proses pembentukan dingin profil hanya berada disekitar sudut lengkung antara bagian *web* dan *flange* dimana luas daerah disekitarnya jauh lebih kecil dibanding luas keseluruhan profil. Oleh karena itu dalam analisis, besarnya penampang efektif dan tegangan kritis *buckling* tidak ditentukan berdasarkan peningkatan sifat mekanis bahan disekitar sudut lengkung sebagai akibat pengaruh tegangan sisa proses pengerjaan dingin, melainkan didasarkan pada sifat

Tabel 1. profil baja berpenampang persegi empat (Rectangular box steel section)

Benda uji	Rasio kelangsingan $(\frac{L}{r_y})$	Tegangan kritis buckling (MPa)		$\frac{(\sigma_{cr})_{gbe}}{(\sigma_{cr})_{gbt}}$
		Eksperimen, $(\sigma_{cr})_{gbe}$	Analitis, $(\sigma_{cr})_{gbt}$	
SSBS-1	8.50	279.05	248.04	1.13
SSBS-2	39.00	257.69	236.33	1.09
SSBS-3	69.10	238.39	209.46	1.14
SSBS-4	114.10	144.00	140.56	1.02
SSBS-5	11.70	233.57	211.52	1.10
SSBS-6	66.00	187.41	179.14	1.05
SSBS-7	102.00	143.31	135.04	1.06
SSBS-8	123.50	118.51	104.04	1.14
SSBS-9	13.60	201.88	175.01	1.15
SSBS-10	29.00	191.54	170.87	1.12
SSBS-11	109.80	106.80	99.91	1.07
SSBS-12	109.80	104.04	99.91	1.04
SSBS-13	109.80	99.22	99.91	0.99
SSBS-14	13.80	169.49	148.82	1.14
SSBS-15	42.60	155.71	139.87	1.11
SSBS-16	65.50	135.04	125.40	1.08
SSBS-17	116.00	81.30	76.48	1.06
SSBS-18	138.20	63.39	60.63	1.04

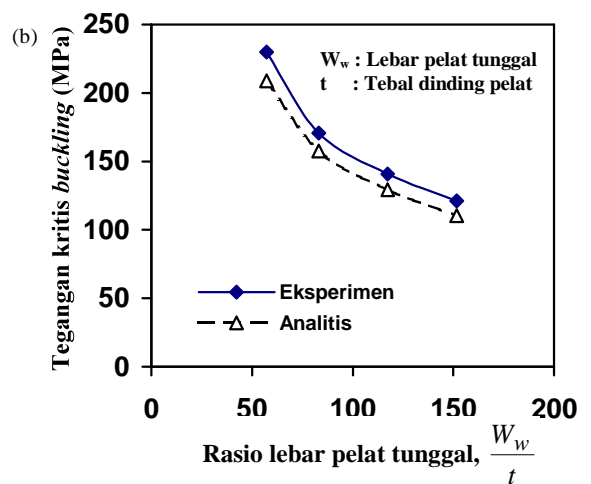
mekanis material dasar profil. Tabel 1 menunjukkan perbandingan masing-masing data eksperimental dan analitis tegangan kritis buckling profil yang tersusun berdasarkan variasi nilai rasio kelangsingan (*Slenderness ratio*). Pengaruh rasio kelangsingan profil terhadap tegangan kritisnya sangat berarti sekali dimana makin tinggi nilai rasio kelangsingannya maka ketahanan profil terhadap *flexural buckling* akan semakin melemah. Berkurangnya ketahanan profil terhadap *flexural buckling* juga diakibatkan oleh interaksinya terhadap *local buckling* pada bagian pelat tunggal profil dimana hal ini menyebabkan penampang yang efektif mendukung beban kerja menjadi lebih mengecil.



Gambar 6. Toleransi deviasi pendekatan analitis terhadap eksperimental.

Gambar 5 (a) dan Gambar 5 (b) menunjukkan pengaruh interaksi antara *local* dan *global (Flexural) buckling* terhadap kekuatan profil baja ringan berpenampang persegi empat yang diperoleh dari pendekatan eksperimental dan analitis. Terlihat jelas dalam gambar bahwa kekuatan profil terhadap interaksi kedua tipe buckling tersebut sangat dipengaruhi dua parameter rasio kelangsingan ( $\frac{L}{r_y}$ ) dan rasio lebar pelat tunggalnya ( $\frac{W_w}{t}$ ). Berdasarkan rumus (4), secara analitis makin besar dimensi lebar pelat tunggalnya maka untuk tebal dinding pelat yang selalu sama, *local buckling* akan terjadi pada tegangan kritis  $p_{cr}$  yang relatif lebih rendah.

Hal ini akan mempengaruhi dimensi penampang profil yang efektif mendukung beban kerja dan semakin tinggi nilai rasio kelangsingan profil maka berdasarkan rumus (6) – (8), profil juga akan mengalami *global* atau *flexural buckling* pada tegangan kritis yang lebih rendah.



Gambar 5. Kekuatan terhadap interaksi local dan global buckling

Fenomena ini jelas terbukti dari hasil pendekatan eksperimental dan analitis seperti ditunjukkan dalam Gambar 5 (a) dan Gambar 5 (b). Sebagian besar data analitis cenderung konservatif terhadap data eksperimental dan variasi deviasinya masih tersebar dalam batas toleransi  $\pm 20\%$  (Gambar 6). Hasil evaluasi statistik menunjukkan nilai rata-rata deviasi data analitis terhadap eksperimental adalah 1.085 dengan standar deviasi 0,047 dan ini berarti bahwa hasil pendekatan analitis rata-rata konservatif 8,5% terhadap hasil eksperimental.

## KESIMPULAN

Kekuatan tekan aksial profil baja ringan terhadap interaksi *local* dan *global buckling* sangat ditentukan oleh dua parameter geometrisnya yaitu kelangsingan (*Slenderness*) profil dan rasio lebar pelat disetiap bagian profil dimana *local buckling* dapat terjadi. Hasil investigasi analitis dan eksperimental mengungkapkan bahwa degradasi kekuatan profil sangat berarti dengan semakin tinggi nilai rasio kelangsingan dan lebar bagian profil yang kritis terhadap *local buckling*. Estimasi analitis kekuatannya ditentukan berdasarkan pada semua sifat penampang efektif profil akibat pengaruh *local buckling*. Verifikasi pendekatan analitis menunjukkan bahwa kekuatan aktual profil terhadap *global buckling* yang terukur dari eksperimen cenderung terprediksi secara konservatif. Deviasi data analitis terhadap eksperimental tersebar dalam batas toleransi  $\pm 20\%$  dan evaluasi statistik menunjukkan rata-rata deviasinya berada pada kisaran 8,5%.

## DAFTARACUAN

- [1]. J. RHODES, Design of Cold-formed Steel Members, Elsevier Science Publishers Ltd., (1991)
- [2]. HARKALI SETIYONO, Pengembangan model analisis kekuatan struktur baja ringan, Laporan Penelitian, UPT-Laboratorium uji konstruksi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, (2001)
- [3]. BRITISH STANDARD INSTITUTION, Structural Use of Steelwork in Building - Part 5 - Code of Practice for Design of Cold Formed Thin Gauge Sections, BS 5950-5, (1998)
- [4]. KENNETH W. KARREN and GEORGE WINTER, Journal of Structural Division, February, (1967)
- [5]. KENNETH W. KARREN, Journal of the Structural Division, (1967)
- [6]. C.C. WENG and TEOMAN PEKOZ, Journal of Structural Engineering, **116** (5), (1990) 1230-1246
- [7]. HARKALI SETIYONO, Jurnal Standardisasi Majalah Ilmiah Standardisasi, **6** (2), (2004) 31-40