

PERILAKU BALOK WEB CORRUGATED TERHADAP GESER

Usman Wijaya¹, Wiryanto Dewobroto²

¹Alumni Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen. S. Parman No 1 Jakarta
Email: wijaya_eng@yahoo.com

²Dosen Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. MH. Thamrin Boulevard Lippo Village Tangerang
Email: wiryanto.dewobroto@uph.edu

Abstract: Other alternative of I-built up is web corrugated beam, that is popular at Europe. AISC design code have not discussed it. In general according to behavior of I-built up, the different can be predicted only at shear behavior. According to AISC 360-2010 There are two types of design members for shear elastic behavior before buckling (G2 - AISC); and post buckling due to tension field action (G3 - AISC) from the plate girder. The behavior of corrugated web due to shear include in section G2 or G3 or a new formula. From this research it will determine which section it is. To determine the behavior it needs numerical simulation non linear finite element analysis. At first step calibrate the procedures with simulation I-built up which is known the behavior. After the simulation fulfill the requirement finish the simulation. Then parametric simulation, change the evaluation parts from plate girder to be corrugated web. Parametric study are width, angle and thickness of corrugated web. The result of parametric simulation for shear failure of web corrugated is inelastic buckling, this is based on AISC section G2. Web corrugated can reduce slenderness factor and increase the capacity. The conclusion is web corrugated is more effective to resist shear buckling than I-built up beam.

Keywords: *finite element analysis, I-built up beam, numerical simulation, shear, web corrugated beam*

Abstrak: Alternatif lain dari balok I *built-up* adalah balok dengan pelat badan bergelombang atau balok *web-corrugated*, yang populer di Eropa. Petunjuk perencanaan balok *web-corrugated* dari AISC belum ada. Mengacu perilaku balok I secara umum, diprediksi balok *web-corrugated* hanya berbeda pada perilaku gesernya. Adapun perencanaan geser balok dari AISC (2010) ada dua, yaitu berdasarkan perilaku elastis sebelum tekuk (G2 – AISC); dan perilaku pasca tekuk memanfaatkan “*tension field action*” (G3 – AISC) dari pelat badannya. Variasi dari perilaku geser balok *web-corrugated* masuk dalam kategori pasal G2 atau G3, atau sesuatu yang baru. Perilaku Itu yang ingin diketahui dari penelitian ini. Untuk itu diperlukan simulasi numerik analisis struktur non-linier dengan metode elemen hingga. Langkah awal dimulai dengan kalibrasi prosedur, dengan cara simulasi balok I-built-up yang telah diketahui perilakunya. Setelah dipastikan bahwa prosedur simulasi numerik memenuhi syarat, yang ditunjukkan dengan penyelesaian kasus yang ada. Selanjutnya akan dilakukan cara parametrik, bagian yang akan dievaluasi diubah-ubah parameternya. Mulai dari pelat badan datar (umum) dan dijadikan bergelombang (*corrugated*). Parameter yang ditinjau adalah lebar, sudut dan ketebalan *web corrugated*. Hasil simulasi parameter menunjukkan bahwa keruntuhan geser *web corrugated* adalah tekuk *inelastic* dan dapat direncanakan sesuai ketentuan G2 – AISC. Bentuk gelombang pada pelat badan memperkecil faktor kelangsingannya, sehingga kapasitasnya meningkat. Kesimpulannya balok *web corrugated* lebih efektif untuk menahan tekuk geser dibandingkan dengan balok I-built up.

Kata kunci: balok I-built up, balok web corrugated, finite element analysis, geser, simulasi numerik

PENDAHULUAN

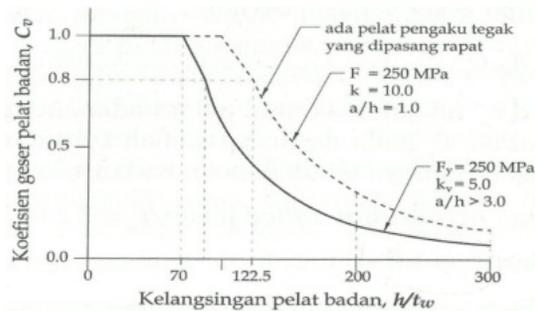
Sebenarnya penggunaan struktur balok dengan pelat badan bergelombang telah banyak digunakan di Eropa, Jepang dan Amerika. Pelat badan bergelombang yang digunakan sebagai

struktur balok dinamakan *web corrugated*. Di Eropa sendiri *web corrugated* sudah digunakan sejak awal tahun 1990-an sebagai struktur *hybrid* pada girder jembatan, struktur bangunan gedung dan bangunan industri (Kovesdi 2010); sedangkan di Indonesia penggunaan *web*

corrugated sangat terbatas. Di Indonesia penggunaan balok *web corrugated* sebagai suatu struktur masih kalah pamor dibandingkan dengan penggunaan balok *castellated* dan balok sistem PEB (*Pre-Engineering Building*). Balok *web corrugated* terbuat dari dua buah sayap atas dan bawah yang di las ke pelat badan. Pada umumnya *web corrugated* dibuat tidak lebih tebal daripada pelat badan balok konvensional. Berdasarkan penelitian – penelitian yang sudah dilakukan pelat badan bergelombang dapat meningkatkan stabilitas geser dan tekuk dibandingkan balok konvensional *I-built up* (Chung 2010). Badan pada suatu balok hanya menyumbang 15% dari kekuatan balok seutuhnya (Dewobroto 2015); oleh karena itu sering dijumpai menggunakan balok *I-built up* dan pelat badan bergelombang dengan ketebalan pelat badan 2 mm sampai dengan 6 mm. *Web corrugated* belum diatur dalam AISC, diperlukan analisis *non linier* geometri dengan bantuan program analisis *finite element* untuk menganalisa dan mensimulasi perilaku *web corrugated*. Untuk mengkategorikan perilaku keruntuhan geser balok *web corrugated* dalam pasal AISC perlu dikaji lagi batasan perilaku yang bisa mencakup kedalam AISC.

PERHITUNGAN GESER BALOK I – BUILT UP

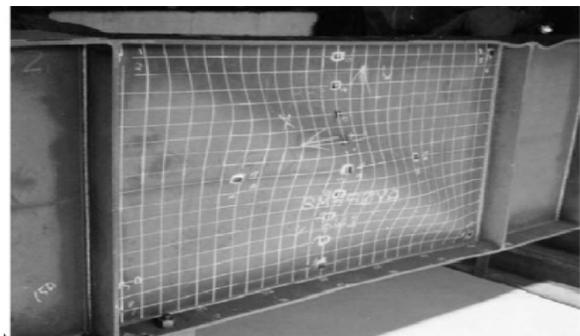
Pada AISC 360-10 ketentuan untuk menghitung kekuatan geser disajikan dalam pasal G2 dan G3. Dimana pasal G2 tidak menggunakan kekuatan pasca tekuk komponen struktur (aksi medan tarik), sedangkan pasal G3 menggunakan aksi medan tarik. Pasal G3 hanya bisa dipakai jika pelat badan terbingkai di empat sisinya, horizontal oleh pelat sayap dan vertikal oleh pelat pengaku tegak.



Gambar 1 Pengaruh kelangsingan terhadap nilai C_v (Dewobroto 2015)



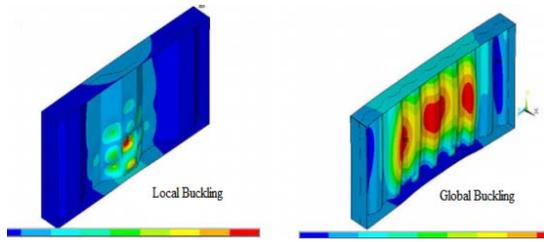
Gambar 2 Keruntuhan geser pelat badan pasal G2 AISC 360-10 (Okeil et al., 2012)



Gambar 3 Keruntuhan geser pasca tekuk pelat badan pasal G3 AISC 360-10 (Ellobody, 2014)

PERHITUNGAN GESER BALOK WEB CORRUGATED

Perumusan kuat geser *web corrugated* dikeluarkan oleh Eurocode yang sebenarnya dibuat dari kumpulan beberapa penelitian oleh para ahli diantaranya Leiva, Lindner, Hognlund dan Johnson & Cafolla Terdapat dua *mode* tekuk geser, yaitu tekuk lokal dan tekuk global. Tekuk lokal diatur oleh panel datar terbesar dan tekuk global diatur oleh satu gelombang atau lebih. Tegangan kritis untuk tekuk lokal dan global dapat ditentukan dari rumusan yang sudah ditetapkan dengan profil yang telah diteliti sebelumnya oleh para ahli (Eurocode 2007). Dalam penelitian ini kuat geser *web corrugated* diperoleh dengan cara simulasi dengan program bantu *finite element analysis* Abaqus CAE.



Gambar 4 Mode tekuk geser web corrugated (Kovesdi, 2010)

Imperfection

Dalam suatu permodelan dengan *finite element analysis* aspek *imperfection* harus diperhitungkan karena ketidakstabilan model. Untuk struktur pelat tipis *local imperfection* atau *global imperfection* dapat terjadi (EN 1993-C5). Untuk memodelkan *imperfection* dapat dilakukan dengan memberikan beban lateral kecil yang biasa disebut *notional load* sebesar 0,2% dari beban yang diberikan di struktur tersebut (Galambos 2008). Lokasi dari arah beban *notional load* disesuaikan dari mode yang dihasilkan oleh analisa *buckling mode* pada mode 1. Dalam suatu simulasi *non linier*, geometrik *imperfection* harus dilakukan dengan simulasi *eigenvalue analysis* pada pemeriksaan *eigenmode* pertama (Kovesdi 2010)

Riks Method

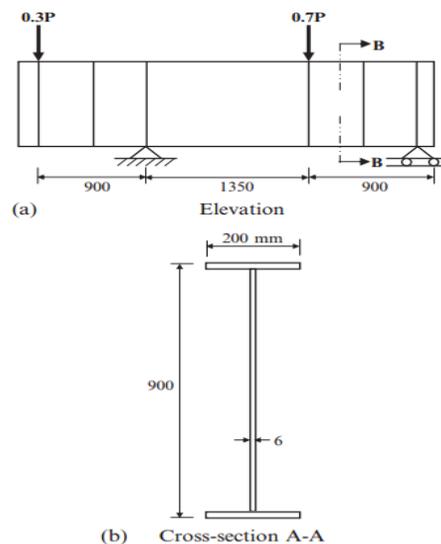
Riks method merupakan *step analysis* yang paling efektif untuk memprediksi ketidakstabilan struktur dan kegagalan *non linier* geometri dan material. Dalam kasus ini *non linier* geometri dengan analisis *Riks method* akan memberikan gambaran perilaku tekuk dan pasca tekuk. Ketika melakukan *load-displacement analysis* menggunakan *step Riks method* efek *non linier imperfection* dan linier *buckling mode* bisa dimasukkan dalam analisis. Analisis *elastic* linier dan *non linier plastic* material dilakukan oleh Abaqus dengan menggunakan *command Static Riks*. Dalam analisis ini beban mewakili kondisi paling ideal, untuk mengakhiri riks analisis kita harus menentukan nilai maksimal dari LPF atau dengan cara lain yaitu menentukan *degree of freedom* (dof) nya (Novoselac et al 2012).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Numerik I-Built up Pengaruh Pasal G3 AISC 360-10

Simulasi yang dilakukan oleh Ellobody 2014 yaitu balok *I-built up* skala kecil Panjang balok *I-built up* adalah 2450 mm ditambah kantilever 900 mm, total panjang balok *I-built up* adalah 3150 mm, dimensi balok adalah tinggi 900 mm, lebar 200 mm tebal sayap 12 mm dan tebal badan 6 mm diberi pengaku $t = 6$ mm seperti pada gambar 2 dibawah 5.

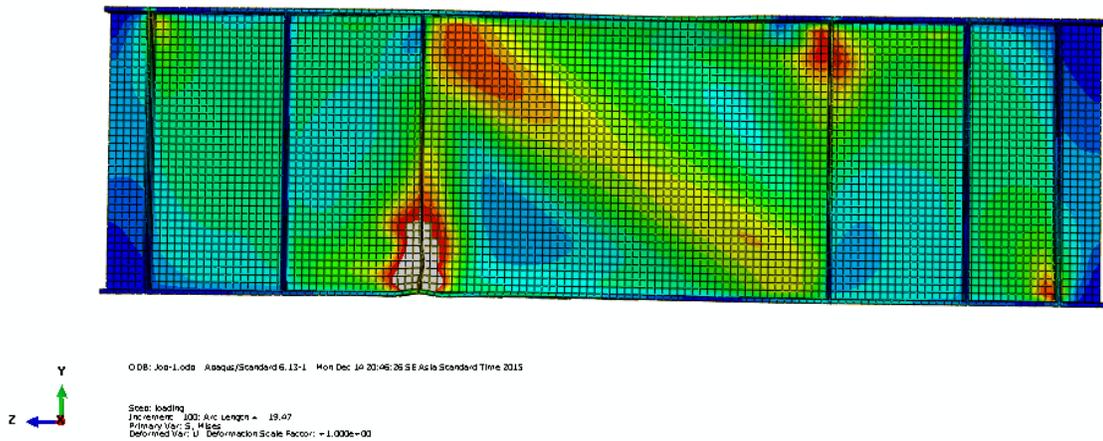
Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ellobody 2014, tegangan terkonsentrasi di tengah pelat badan dan terjadi diagonal aksi medan tarik dan kegagalan akibat tekuk geser pada pelat badan. Untuk memodelkan pelat badan *I-built up* digunakan program Abaqus untuk menganalisa *non linier geometry*, *imperfection geometry* dan material. Mesh S4R digunakan untuk memodelkan sayap dan pelat badan dengan ukuran *meshing* 25 mm x 25 mm. Untuk memodelkan pelat badan *I-built up* digunakan program Abaqus untuk menganalisa *non linier geometry*, *imperfection geometry* dan material. Mesh S4R digunakan untuk memodelkan sayap dan pelat badan dengan ukuran *meshing* 25 mm x 25 mm. Tumpuan sendi dimodelkan pada salah satu sisi tumpuan untuk mencegah perpindahan arah horisontal dan arah vertikal, sedangkan pada sisi lainnya tumpuan roll dimodelkan hanya untuk mencegah perpindahan vertikal. Untuk menahan lateral pada sayap serat tekan, pada sisi atas dari sayap diberi tumpuan untuk menahan gaya lateral arah x.



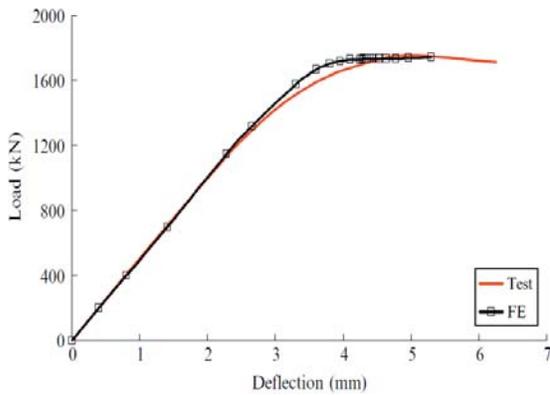
Gambar 5 Input beban girder I-built up (Ellobody (2014))

Dari simulasi sebelumnya oleh Ellobody 2014 (Gambar 7.a) disimulasikan ulang terlihat pada gambar 7.b dari dua perbandingan tersebut terlihat simulasi sudah terkalibrasi dengan benar dimana diperoleh hasil yang hampir mirip antara kedua simulasi tersebut. Dari profil tersebut diperoleh bahwa balok dalam kondisi tekuk elastis dimana untuk perencanaan geser pasal G2 AISC 360-10 sudah tidak efektif digunakan karena akan menghasilkan nilai gaya

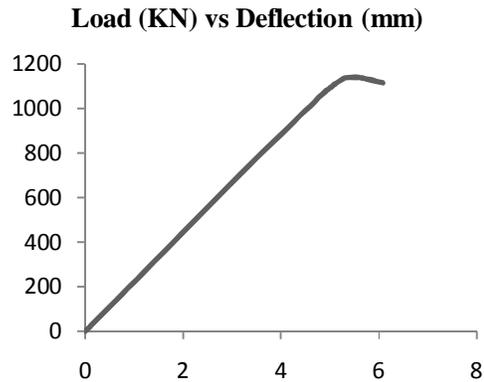
geser yang konservatif. Untuk menghasilkan gaya geser yang maksimal dipilih perhitungan geser menurut pasal G3 AISC 360-10 untuk perencanaan geser dengan properties seperti diatas. Dengan pasal G3 berarti akan dipasang pelat pengaku tegak sehingga mekanisme aksi medan tarik timbul dan dimanfaatkan. Hasil simulasi tegangan yang terjadi dapat dilihat pada gambar 6 dibawah ini.



Gambar 6 Kontur Tegangan Aksi Medan Tarik (Wijaya 2015)



Gambar 7a Keruntuhan geser tekuk *elastic* (Ellobody 2014)



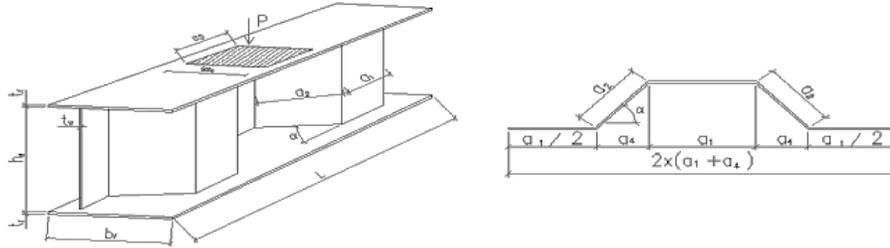
Gambar 7b Keruntuhan geser tekuk *elastic* (Wijaya 2015)

Simulasi Parametrik Balok *Web Corrugated*

Perhitungan geser pada balok dengan *web corrugated* dilakukan dengan pemeriksaan dua *mode* tekuk yaitu tekuk lokal dan tekuk global. Untuk itu dilakukan simulasi analisa geser kedua

mode tersebut dengan berbagai model pelat badan bergelombang dengan program Abaqus.

Dalam penelitian ini disimulasikan model balok *web corrugated* sebanyak 32 sampel seperti tertulis dalam tabel 1.



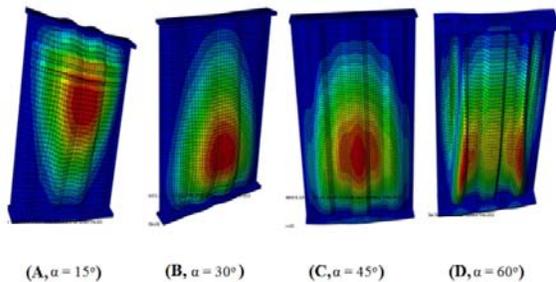
Gambar 8 Profil balok pelat badan bergelombang (Kovesdi 2010)

Tabel 1 Parameter Profil Balok *Web Corrugated* (Wijaya 2015)

No	Sampel	f_y (Mpa)		h_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	a_1 (mm)	a_2 (mm)	a_3 (mm)	a_4 (mm)	α°
		sayap	badan									
1	1000x200x20x3	240	240	960	3	200	20	140	70.7	50	50	60
2	1200x200x20x3	240	240	1160	3	200	20	140	70.7	50	50	60
3	1500x200x20x3	240	240	1460	3	200	20	140	70.7	50	50	60
4	2000x200x20x3	240	240	1960	3	200	20	140	70.7	50	50	60
5	1000x200x20x3	240	240	960	3	200	20	140	70.7	50	50	45
6	1200x200x20x3	240	240	1160	3	200	20	140	70.7	50	50	45
7	1500x200x20x3	240	240	1460	3	200	20	140	70.7	50	50	45
8	2000x200x20x3	240	240	1960	3	200	20	140	70.7	50	50	45
9	1000x200x20x3	240	240	960	3	200	20	120	139	70	120	30
10	1200x200x20x3	240	240	1160	3	200	20	120	139	70	120	30
11	1500x200x20x3	240	240	1460	3	200	20	120	139	70	120	30
12	2000x200x20x3	240	240	1960	3	200	20	120	139	70	120	30
13	1000x200x20x3	240	240	960	3	200	20	70	72.8	20	70	15
14	1200x200x20x3	240	240	1160	3	200	20	70	72.8	20	70	15
15	1500x200x20x3	240	240	1460	3	200	20	70	72.8	20	70	15
16	2000x200x20x3	240	240	1960	3	200	20	70	72.8	20	70	15
17	1000x200x20x2	240	240	960	2	200	20	140	70.7	50	50	60
18	1200x200x20x2	240	240	1160	2	200	20	140	70.7	50	50	60
19	1500x200x20x2	240	240	1460	2	200	20	140	70.7	50	50	60
20	2000x200x20x2	240	240	1960	2	200	20	140	70.7	50	50	60
21	1000x200x20x2	240	240	960	2	200	20	140	70.7	50	50	45
22	1200x200x20x2	240	240	1160	2	200	20	140	70.7	50	50	45
23	1500x200x20x2	240	240	1460	2	200	20	140	70.7	50	50	45
24	2000x200x20x2	240	240	1960	2	200	20	140	70.7	50	50	45
25	1000x200x20x2	240	240	960	2	200	20	120	139	70	120	30
26	1200x200x20x2	240	240	1160	2	200	20	120	139	70	120	30
27	1500x200x20x2	240	240	1460	2	200	20	120	139	70	120	30
28	2000x200x20x2	240	240	1960	2	200	20	120	139	70	120	30
29	1000x200x20x2	240	240	960	2	200	20	70	72.8	20	70	15
30	1200x200x20x2	240	240	1160	2	200	20	70	72.8	20	70	15
31	1500x200x20x2	240	240	1460	2	200	20	70	72.8	20	70	15
32	2000x200x20x2	240	240	1960	2	200	20	70	72.8	20	70	15

Kuat Geser Tekuk Lokal dan Tekuk Global

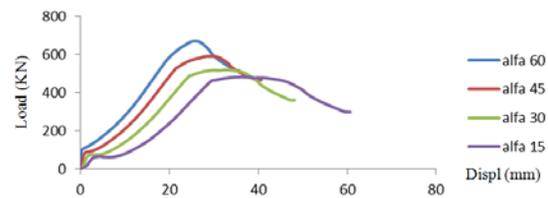
Pada balok *web corrugated* kegagalan geser tekuk, baik lokal maupun global dapat terjadi apabila pelat badan sangat tipis dan tinggi atau dapat dikatakan tekuk akan terjadi pada balok yang rasio perbandingan bentangan balok terhadap ketinggian balok cukup besar. Dalam simulasi ini dicoba bentuk pelat yang bergelombang dengan sudut mulai dari 15°, 30°, 45° dan 60° serta ketinggian balok mulai dari 1000 mm sampai 2000 mm seperti terlihat pada tabel 1 diatas. Model kegagalan geser tekuk pada simulasi ini hanya terjadi pada model tekuk inelastis, dimana tekuk yang terjadi tidak membentuk aksi medan tarik. Dalam simulasi *web corrugated* model tekuk baik lokal maupun global dipakai untuk menentukan perilaku kegagalan geser tekuk. Model kegagalan tekuk geser yang telah disimulasikan dengan program Abaqus dengan berbagai macam sudut tekukan gelombang *web corrugated* dapat dilihat pada gambar 9 dibawah ini :



Gambar 9 Perilaku Tekuk Geser Balok *Web Corrugated* (Wijaya 2015)

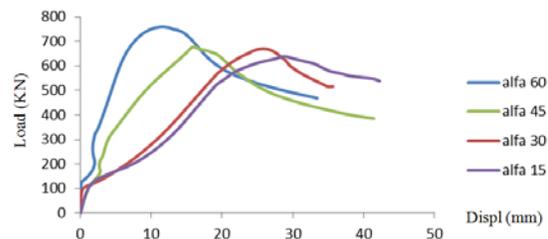
Dari gambar diatas terlihat telah terjadi beberapa fenomena tekuk lokal pada lipatan *web corrugated*, tekuk global juga terjadi. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan tekuk lokal terjadi apabila *web corrugated* memiliki sudut gelombang yang kecil maksimal 45° (gambar 9a, 9b, 9c), pada sudut 60° terjadi tekuk global (gambar 9d). Dari hasil simulasi – simulasi diatas terlihat tidak satupun menunjukkan kegagalan geser tekuk dengan mekanisme pengalihan gaya yang memanfaatkan aksi medan tarik, artinya kegagalan geser yang mementukan adalah kondisi batas akibat leleh dan tekuk akibat geser. Penampang plastis belum terbentuk sehingga memungkinkan terjadinya tekuk lokal, namun beberapa penampang bisa

tercapai juga kondisi tekuk global. Tekuk global pada *web corrugated* justru terjadi pada sudut *web corrugated* terbesar, hal ini dapat terjadi karena meskipun sudut *web corrugated* besar jarak antar lipatan juga berpengaruh. Dari beberapa sampel yang telah disimulasikan disimpulkan tidak ada satupun yang berperilaku tekuk *elastic* atau terbentuk aksi medan tarik, dari sini disimpulkan bahwa pada balok *web corrugated* hanya terjadi tekuk *inelastic* yang artinya setara dengan pasal G2 AISC 360-10. Ringkasan kurva kenaikan beban sampai mencapai puncak untuk tebal *web corrugated* $t_w = 2$ mm yaitu 669 KN dan *displacement* yang terjadi akibat beban puncak yaitu 25 mm dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 10 *Load vs Displacement web corrugated* $t_w = 2$ mm (Wijaya 2015)

Sedangkan kurva kenaikan beban sampai mencapai puncak untuk tebal *web corrugated* $t_w = 3$ mm yaitu 758 KN dengan *displacement* yang terjadi yaitu 12 mm dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

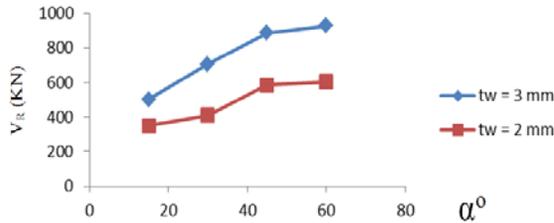


Gambar 11 *Load vs Displacement Web corrugated* $t_w = 3$ mm (Wijaya 2015)

Efek Sudut *Corrugated*

Sudut *corrugated* memberi kontribusi dalam menaikkan kuat geser, dari hasil simulasi diperoleh sudut *corrugated* dengan pengaruh terbesar adalah 60° seperti terlihat pada kurva dibawah ini. Sama halnya dengan sudut

corrugated ketebalan web corrugated $t_w = 3\text{mm}$ dengan sudut gelombang terbesar menghasilkan nilai kuat geser nominal terbesar.



Gambar 12 Kurva Pengaruh Sudut Corrugated Terhadap Kuat Geser (Wijaya 2015)

Perbandingan I-built up vs Web Corrugated

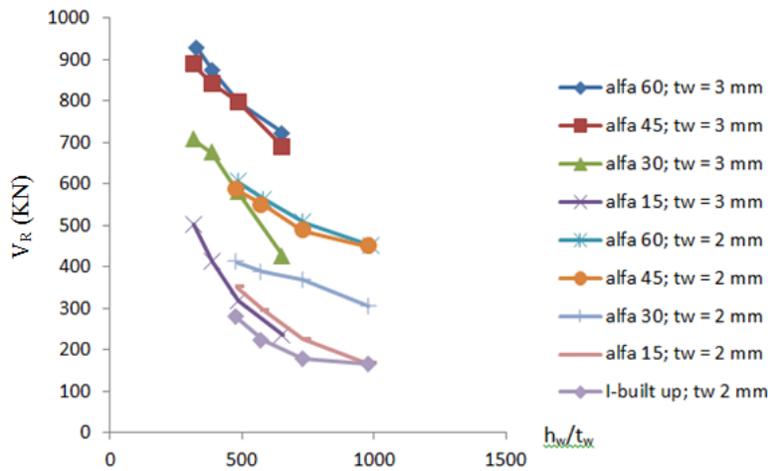
Dilakukan simulasi dengan membandingkan kuat geser perhitungan manual balok I-built up terhadap balok web corrugated. Adapun data sampel yang dipilih adalah kategori h/t_w sama dengan corrugated web dihitung sebagai berikut :

Tabel 2 Parameter penampang I-built up (Wijaya 2015)

No	Profil I-built up	h/t_w	C_v	V_n (KN)
1	1000x200x2x20	480	0,958	276
2	1200x200x2x20	580	0,647	224
3	1500x200x2x20	730	0,414	179
4	2000x200x2x20	980	0,286	165

Dari sampel diatas digunakan alternatif desain menggunakan pelat pengaku, sehingga dapat dikategorikan sebagai analisa geser pasca tekuk (pasal G3) sehingga harus mempertimbangkan aksi medan tarik, sedangkan pada balok web corrugated kondisi geser pasca tekuk tidak pernah terjadi. Dari perhitungan manual diatas diperoleh nilai kuat geser nominal terbesar yaitu 276 KN, nilai ini masih jauh lebih kecil dari nilai kuat geser maksimum yang diperoleh dari balok web corrugated yaitu 929 KN. Sampel diatas masuk dalam kategori langsing, dimana nilai $h_w/t_w > 260$ yang sudah pasti alternatif desain yang paling efektif adalah menggunakan pelat pengaku untuk mendapatkan aksi medan tarik yang dapat dimanfaatkan untuk menaikan gaya geser nominal. Apabila memaksakan perhitungan dengan pasal G2 maka sudah pasti akan didapat gaya geser nominal yang konservatif dan sudah pasti tidak efektif dibandingkan dengan web corrugated.

Nilai kuat geser nominal parameter penampang I-built up tidak ada yang lebih tinggi dari nilai kuat geser nominal sampel balok web corrugated.



Gambar 14 Kurva Balok Web Corrugated VS Balok I-built up (Wijaya 2015)

KESIMPULAN

Dari sejumlah simulasi numerik yang telah dilakukan dalam penulisan makalah ini diperoleh bahwa balok *web corrugated* bisa lebih baik dalam menahan tekuk dan geser dibandingkan dengan balok konvensional *I-built up* apabila dilakukan kombinasi yang tepat antara bentuk *corrugated*, ketebalan pelat badan bergelombang, jarak antar lipatan, dan sudut *corrugated*.

DAFTAR PUSTAKA

- Chung, J. *Finite Element Analysis of Corrugated Web Beam with Openings*, Faculty of Civil Engineering & Earth Resources University Malaysia Pahang, 2010
- Dewobroto, W. *Struktur Baja Perilaku, Analisis dan Desain – AISC 2010*, Lumina Press, 2015
- Ellobody, E. *Finite Element Analysis and Design of Steel and Steel-Concrete Composite Bridges*, Elsevier Inc, 2014
- Eurocode. *Commentary and Work Examples to EN 1993-1-5 Plated Structural Elements*. JRC European Commission 2007
- Galambos, T. *Structural Stability of Steel: Concepts and Application for Structural Engineers*. Jhon wiley and sons. Inc, 2008.
- Kovesdi, B. PhD. *Dissertation: Patch Loading Resistance of Girders with Corrugated Webs*, Budapest, 2010
- Novoselac, S et al. *Linear and Non Linear Buckling and Post Buckling Analysis of a Bar with the Influence of Imperfections*, Tehnicki Vjesnik Journals volume 19, 2012
- Okeil et al. *Novel Stiffening of Thin – Walled Steel Structures*, Louisiana Transportation Research Center, 2012
- Wijaya, U. Tesis : Perilaku Balok Web Corrugated Terhadap Geser, Magister Teknik Sipil Universitas Tarumanagara, 2015