

## Pengaruh Pemodelan Las Titik Terhadap Karakteristik Tumbukan Aksial *Crash Box Berpenampang Top-Hat*

Agustinus Dimas, Annisa Jusuf, Leonardo Gunawan<sup>1</sup>, Tatacipta Dirgantara<sup>2</sup> dan Ichsan Setya Putra<sup>3</sup>

Kelompok Keahlian Struktur Ringan  
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia  
Email : <sup>1</sup>gun@ae.itb.ac.id, <sup>2</sup>tdirgantara@ftmd.itb.ac.id, <sup>3</sup>isp@aero.pauir.itb.ac.id

### Abstrak

Meningkatnya jumlah mobil di jalan raya setiap tahun menyebabkan peningkatan jumlah kecelakaan dimana tabrakan dari depan mendominasi kecelakaan yang terjadi. Untuk melindungi penumpang dalam suatu kecelakaan, diperlukan suatu sistem pelindung pada mobil yang dapat menyerap energi tabrakan. Salah satu sistem penyerap energi dalam kasus tabrakan arah depan adalah *crash box* berbentuk tabung yang akan menyerap energi dengan membentuk deformasi plastis berupa lipatan-lipatan secara berurutan yang disebut dengan *progressive buckling*. Mekanisme ini diharapkan mampu mengurangi kerusakan kabin penumpang dan memperlambat kendaraan dalam tingkat yang berada dalam batas aman, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya cedera pada penumpang. Paper ini menyajikan studi penyerapan energi tumbukan aksial kecepatan rendah oleh *crash box* berdinding tipis dengan penampang *top-hat* yang dibuat dari material St37 dan dirakit menggunakan las titik. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga eksplisit non-linier. Mengikuti pengembangan model dalam penelitian sebelum ini, dinding tabung dimodelkan dengan elemen *shell* tipe Belytschko-Lin-Tsay dan material dimodelkan sebagai *Piecewise Linear Plasticity*. Massa penumbuk dimodelkan sebagai benda kaku menggunakan elemen solid heksahedral. Pemodelan las titik merupakan hal yang dipelajari dalam studi ini, dimana las titik dimodelkan menggunakan tiga model berbeda: elemen satu dimensi berupa elemen *beam*, elemen tiga dimensi berupa satu elemen solid, dan elemen tiga dimensi berupa empat elemen solid. Dari hasil-hasil yang didapat, dilakukan evaluasi pengaruh model elemen las titik yang digunakan terhadap karakteristik tumbukan, yaitu modus deformasi yang terjadi, gaya tumbuk rata-rata, efisiensi gaya tumbuk, dan energi absorpsi spesifik. Dibandingkan dengan hasil analisis menggunakan elemen *beam* sebagai model las titik, analisis yang menggunakan elemen tiga dimensi sebagai model las titik memiliki karakteristik sebagai berikut: modus terbentuknya lipatan pertama berupa dua lipatan ke dalam dan dua lipatan keluar dengan jarak deformasi yang lebih rendah 31-34% dan jumlah lipatan akhir yang lebih sedikit, gaya tumbuk rata-rata lebih besar 45-53%, efisiensi gaya tumbuk lebih besar 36-48%, dan energi absorpsi spesifik lebih besar 62-71%.

**Keywords:** *crash box*, *top-hat*, beban aksial kecepatan rendah, metode elemen hingga, model las titik

### Pendahuluan

Kemungkinan terjadinya kecelakaan di jalan raya semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah produksi mobil tiap tahunnya. Salah satu jenis kasus kecelakaan yang sering dialami oleh mobil adalah kasus tabrakan dari arah depan. Untuk meminimalkan resiko cedera akibat kecelakaan yang dialami penumpang, struktur mobil perlu didesain agar mampu menyerap energi sebanyak mungkin sehingga perlambatan yang dialami penumpang masih dalam batas aman dan tidak ada deformasi yang dapat membahayakan kabin penumpang. Salah satu komponen yang berperan penting dalam menyerap

energi adalah *crash box*.

*Crash box* merupakan komponen struktur yang berada di bagian depan kendaraan dan berfungsi untuk meredam energi akibat benturan (tumbukan) dari arah depan. Mekanisme penyerapan energi yang dilakukan oleh *crash box* adalah dengan membentuk lipatan-lipatan plastis secara berurutan, disebut dengan *progressive buckling*, ketika tumbukan terjadi. Semakin banyak energi yang diserap oleh *crash box*, semakin berkurang dampak yang dirasakan oleh pengemudi ketika tumbukan terjadi.

Penelitian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik tumbukan aksial pada *crash box* telah banyak dilakukan [1-6]. Kelompok Keahlian Struktur Ringan, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut

Teknologi Bandung, saat ini sedang melakukan penelitian mengenai hal ini pada berbagai jenis konfigurasi *crash box* dengan menggunakan metode analitik, numerik dan eksperimen [7-12]. Salah satu konfigurasi yang sedang diteliti adalah *crash box* berpenampang *top-hat* yang dirakit menggunakan las titik. Penampang *top-hat* dipilih karena konfigurasi ini memiliki lebih banyak sudut, yaitu enam sudut, dibandingkan dengan konfigurasi segi empat, dimana jumlah sudut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyerapan energi tumbukan. *Crash box* berpenampang *top-hat* terdiri dari dua buah pelat, pelat *top-hat* dan pelat penutup, dihubungkan menggunakan las titik. Sambungan las titik dipilih karena sambungan tipe ini sering digunakan pada struktur kendaraan.

Pada penelitian ini, akan dievaluasi pengaruh pemodelan las titik terhadap karakteristik tumbukan aksial pada kolom berpenampang *top-hat*. Kolom berpenampang *top-hat* merepresentasikan struktur *crash-box* pada bagian depan kendaraan yang mengalami tumbukan dari arah depan. Analisis numerik telah banyak dilakukan sebelumnya menggunakan elemen satu dimensi sebagai model las titik karena waktu komputasi yang relatif cepat dibandingkan dengan pemodelan menggunakan elemen tiga dimensi [1,7]. Seiring dengan berkembangnya teknologi komputasi, kasus pemodelan dengan menggunakan model elemen tiga dimensi dapat diselesaikan dalam waktu yang relatif cepat sehingga diperoleh pemodelan yang semakin mendekati kondisi sebenarnya [13]. Evaluasi pengaruh pemodelan las titik terhadap karakteristik tumbukan, khususnya modus deformasi, gaya tumbuk rata-rata, efisiensi gaya tumbuk, dan energi absorpsi spesifik akan dilakukan.

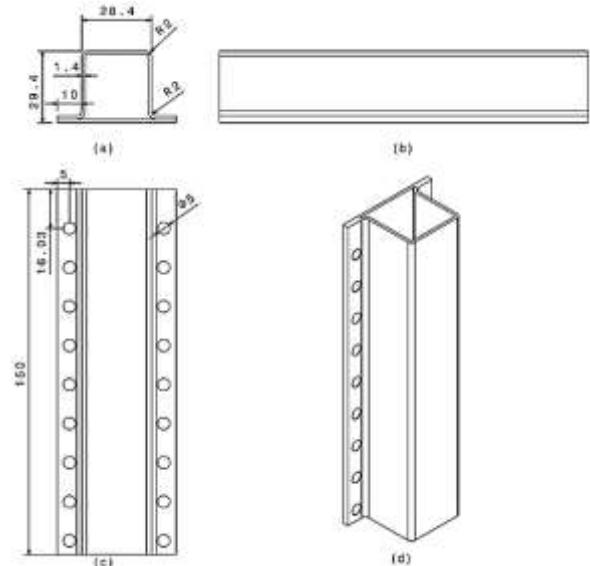
### Detail Geometri Kolom *Top Hat*

Pada penelitian ini, analisis dilakukan terhadap kolom berpenampang *top-hat* berdinding tipis dengan ukuran penampang, panjang kolom dan ketebalan kolom seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Kolom terdiri dari dua buah pelat, yaitu pelat *top-hat* dan pelat penutup yang disambung menggunakan las titik. Jarak antar las titik sebesar 0.5 H, dimana H adalah panjang setengah gelombang lipatan elemen, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Besar H diperoleh dari persamaan analitik yang diturunkan oleh Ly Hung Anh [7] untuk kasus kolom berpenampang *top-hat* berdinding tipis dengan asumsi sambungan kontinu, sebagai berikut:

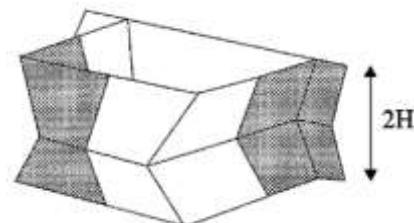
$$\frac{P_m}{M_0} = 32.29 \left( \frac{L}{t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$\frac{H}{t} = 0.40 \left( \frac{L}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$\frac{r}{t} = 0.467 \left( \frac{L}{t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$



**Gambar 1** Geometri struktur kolom berpenampang *top-hat*:  
(a) tampak depan, (b) tampak samping, (c) tampak atas, dan  
(d) isometri.



**Gambar 2** Empat elemen axis-symmetric kolom berpenampang *top hat* yang membentuk satu lipatan gelombang

### Sifat Material

Material yang digunakan pada kolom berpenampang *top-hat* ini adalah *mild steel* St37 dengan karakteristik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Material ini termasuk ke dalam jenis material yang sensitif terhadap laju regangan, artinya material akan menunjukkan respon yang berbeda ketika diuji tarik atau tekan pada kecepatan yang berbeda. Untuk memprediksi perubahan kurva tegangan-regangan terhadap variasi laju regangan, digunakan Cowper-Symonds *constitutive equation* yang berbentuk:

$$\frac{\sigma_0^d}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

**Tabel 1** Karakteristik material St 37

Karakteristik	Simbol	Nilai	Satuan
Young's Modulus	E	200	GPa
Yield Stress	$\sigma_{ys}$	0.251	GPa
Poisson's ratio	N	0.3	-
Density	P	7.83E-06	kg/mm <sup>3</sup>
Power law exponent	N	0.12	-

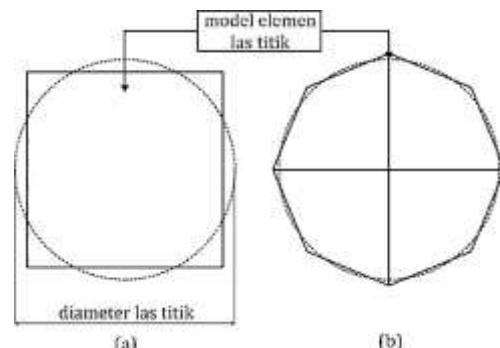
Konstanta Cowper-Symonds yang digunakan yaitu  $D = 6844 \text{ s}^{-1}$  dan  $p = 3.91$ , sama dengan yang digunakan Ly Hung Anh ketika menurunkan persamaan analitik kasus tumbukan kolom berpenampang *top-hat* [7].

### Model Elemen Hingga

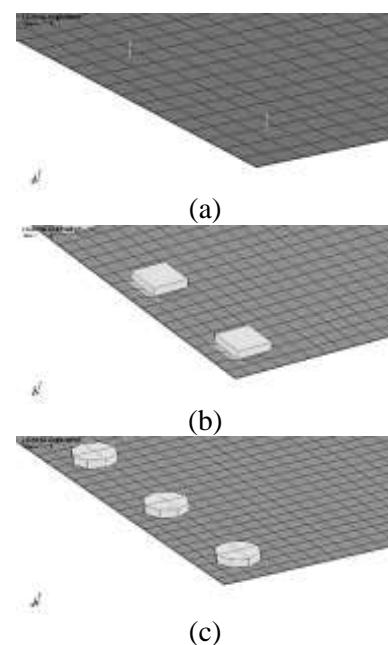
Perangkat lunak berbasis elemen hingga eksplisit non-linier digunakan untuk mengetahui karakteristik tumbukan pada kolom ketika diberi beban aksial. Simulasi tumbukan terdiri dari tiga komponen, yaitu komponen penumbuk, kolom berpenampang *top-hat*, dan las titik. Penumbuk dimodelkan sebagai benda kaku menggunakan elemen *hexahedral 8-node solid* dengan karakteristik elemen *constant stress solid*. Elemen *quadrilateral shell* digunakan untuk memodelkan kolom berpenampang *top-hat* dengan berukuran  $2 \times 2 \text{ mm}$  menggunakan formulasi *Belytschko-Lin-Tsay*. Berdasarkan uji konvergensi yang telah dilakukan, ukuran ini sesuai untuk memperoleh hasil yang diinginkan dalam waktu yang relatif singkat [7]. *Crash box* dimodelkan menggunakan asumsi sempurna tanpa cacat awal. Ada tiga model las titik yang digunakan pada penelitian ini, yaitu model las titik dengan elemen satu dimensi, yaitu elemen *beam*, dan model las titik dengan elemen tiga dimensi, yaitu 1-elemen solid dan 4-elemen solid. Untuk pemodelan tiga dimensi, ukuran elemen menyesuaikan dengan ukuran dari las titik, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3. Luas permukaan elemen solid yang digunakan ekuivalen dengan luas lingkaran dari las titik, yaitu  $19.635 \text{ mm}^2$ . Perbandingan visualisasi dari ketiga pemodelan ini ditunjukkan pada Gambar 4.

Simulasi tumbukan antara penumbuk dengan kolom dilakukan dengan mendefinisikan kondisi batas seperti pada Gambar 5. Penumbuk dengan

berat 65 kg bergerak dalam arah aksial dengan kecepatan 7.3 m/s menuju kolom yang diam. Oleh sebab itu, penumbuk

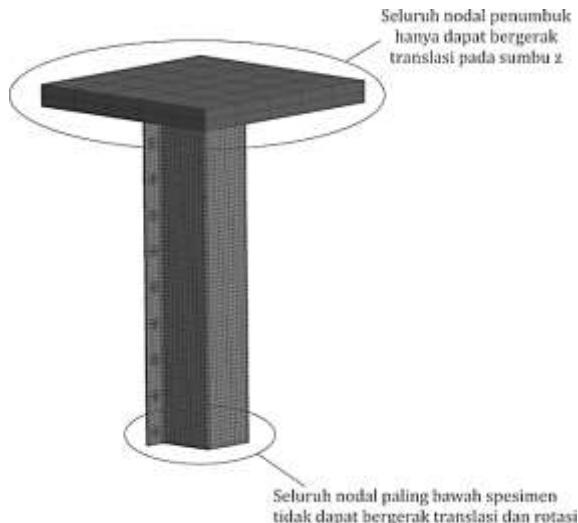


**Gambar 3** Perbandingan ukuran elemen las titik dengan ukuran sebenarnya: (a) satu elemen solid dan (b) empat elemen solid.



**Gambar 4** Visualisasi pemodelan las titik pada LS-DYNA: (a) elemen *beam*, (b) satu elemen solid, dan (c) empat elemen solid.

hanya diperbolehkan bergerak translasi dalam sumbu z agar tumbukan yang terjadi merupakan tumbukan aksial murni. Pada *crash box*, seluruh nodal pada bagian bawah tidak diperbolehkan bergerak translasi atau rotasi. Model material *Piecewise Linear Plasticity* digunakan untuk memodelkan kolom berpenampang *top-hat*. *Piecewise Linear Plasticity* dipilih karena mampu mensimulasikan perilaku material elasto-plastik, isotropik, dan memperhitungkan pengaruh laju regangan. Penumbuk dimodelkan menggunakan material *Rigid* dan komponen las titik menggunakan pilihan material *Spotweld*. Pada penelitian ini, kegagalan pada sambungan las titik tidak dimodelkan.



Gambar 5 Kondisi batas kolom dan penumbuk.

Terdapat 4 jenis kontak yang harus didefinisikan agar simulasi yang dilakukan dapat mendekati kondisi sebenarnya, yaitu *automatic nodes to surface*, *automatic single surface*, *automatic surface to surface*, dan *spotweld*. *Automatic nodes to surface* adalah kontak antara penumbuk dengan *crash box* agar penumbuk dapat mengenali keberadaan *crash box*. *Automatic single surface* berguna agar pelat *top-hat* mengenali keberadaan pelat penutup sehingga kedua komponen menjadi satu-kesatuan utuh dan tidak ada penetrasi antar kedua komponen ketika proses lipatan mulai terjadi. *Automatic surface to surface* perlu didefinisikan agar tidak terjadi penetrasi antara las titik dengan pelat ketika proses lipatan terjadi. Kontak *spotweld* didefinisikan agar *crash box* mengenali keberadaan las titik dan tidak saling lepas ketika tumbukan terjadi.

### Analisis Hasil dan Diskusi

Hasil simulasi tumbukan untuk tabung dengan tiga model las titik yang berbeda dalam bentuk deformasi akhir ditampilkan pada Gambar 6, sedangkan gaya tumbuk sesaat ditampilkan pada Gambar 7. Dari data gaya tumbukan, parameter berupa gaya tumbukan puncak ( $P_{\max}$ ), panjang deformasi ( $\Delta$ ), energi yang diserap ( $E_A$ ), gaya tumbukan rata-rata ( $P_m$ ), dan perbedaan  $P_m$  ditampilkan pada Tabel 2. Selanjutnya, dari data ini dilakukan evaluasi pengaruh model las titik terhadap karakteristik tumbukan aksial *crash box* berpenampang *top-hat*.

#### Modus deformasi

Modus deformasi yang terjadi pada kolom berpenampang *top-hat* dengan elemen beam

**Tabel 2** Hasil simulasi numerik tumbukan

Model spot weld	$P_{\max}$ (kN)	$\Delta$ (mm)	$E_A$ (J)	$P_m$ kN	$\Delta P_m$ (%)
Elemen beam	69.7	53.5	1726.0	32.3	-
1 elemen solid	72.0	34.9	1723.1	49.3	53
4 elemen solid	74.4	36.9	1723.7	46.8	45

sebagai model las titik berbeda dengan modus deformasi model yang menggunakan elemen solid sebagai model las titik, seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Jumlah lipatan akhir yang terjadi pada kolom dengan elemen beam sebagai model las titik berjumlah 3 buah, sedangkan pada kolom dengan elemen solid sebagai model las titik berjumlah 2 buah. Panjang akhir deformasi pada kolom dengan elemen solid sebagai model las titik juga lebih pendek, seperti yang tampak pada Tabel 2. Kolom berpenampang *top-hat* dengan elemen beam sebagai model las titik membentuk lipatan awal berupa 1 lipatan ke dalam dan 2 lipatan keluar, yang berbeda dibandingkan dengan kolom dengan elemen solid sebagai model las titik yaitu 2 lipatan keluar dan 2 lipatan ke dalam. Dapat disimpulkan bahwa pemodelan las titik sebagai elemen solid membuat kolom lebih kaku dibandingkan dengan pemodelan menggunakan elemen beam.

#### Gaya tumbuk rata-rata

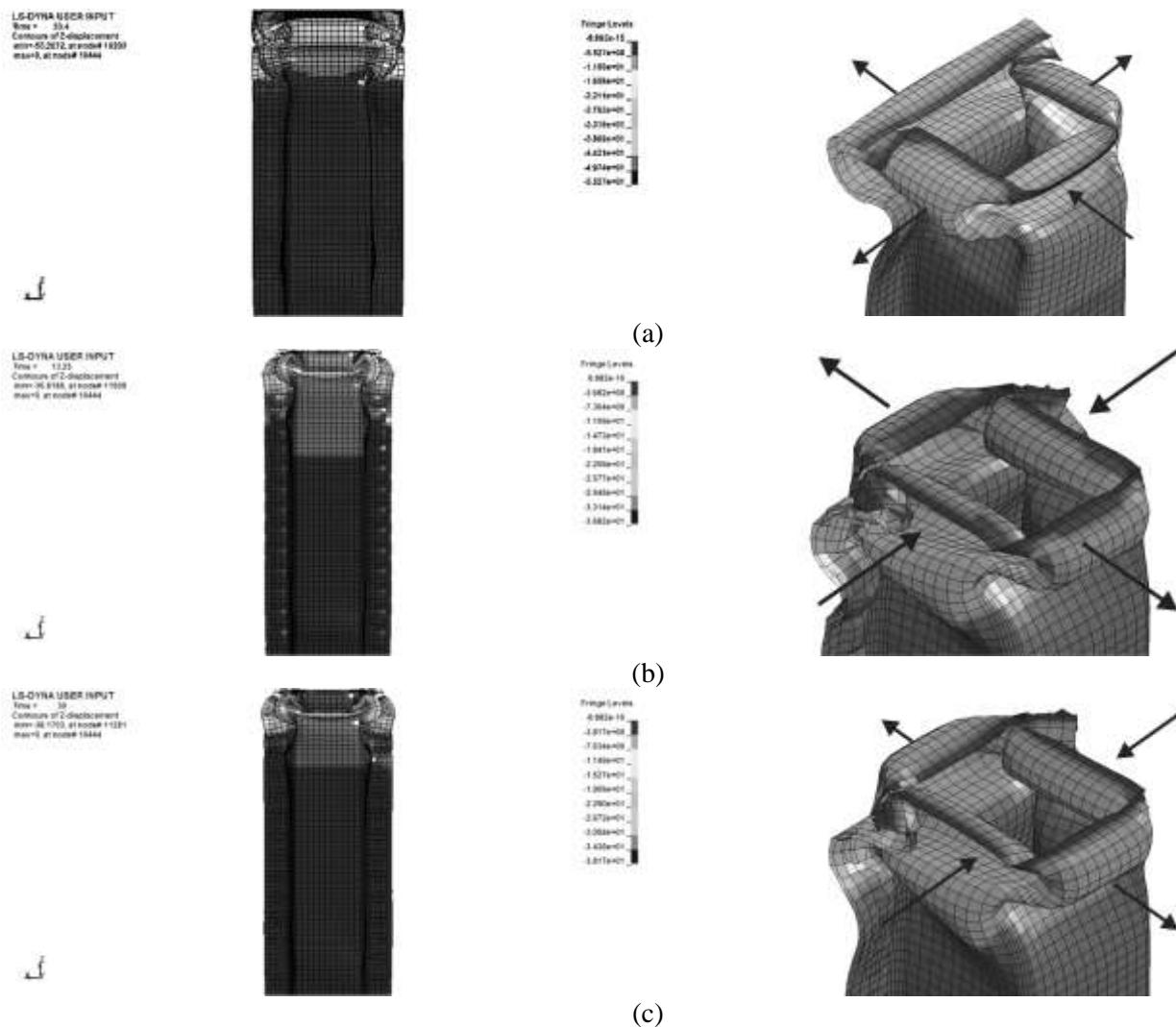
Gaya tumbuk rata-rata adalah gaya rata-rata yang dibutuhkan untuk membentuk satu lipatan pada kolom, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$P_m = \frac{1}{\delta_c} \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta \quad (5)$$

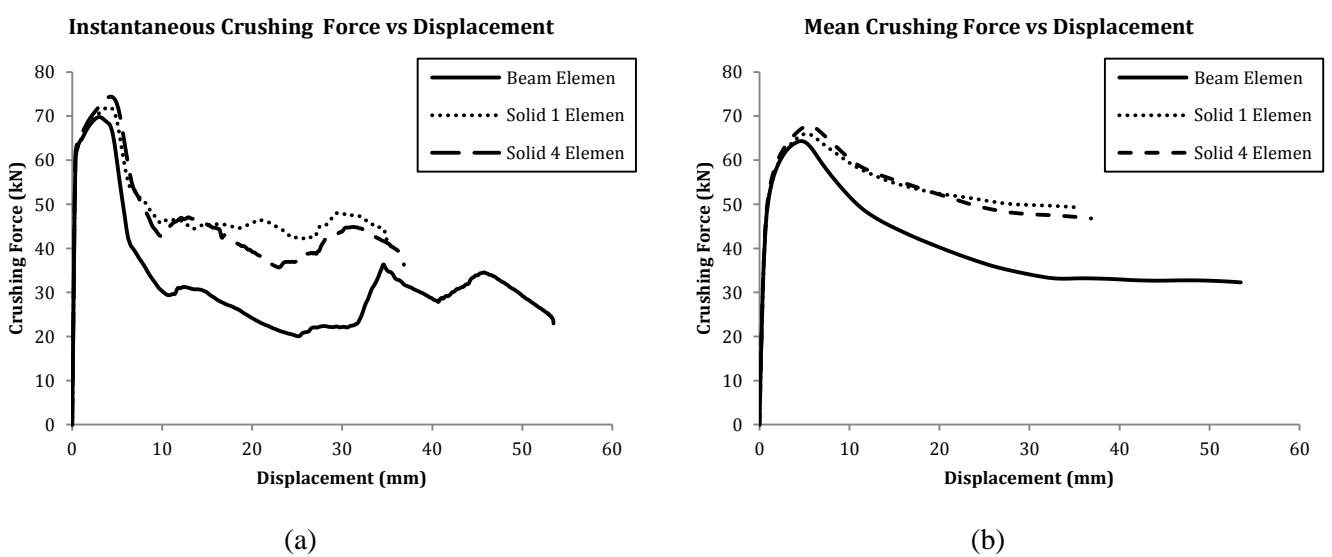
Parameter ini, yang dikaitkan dengan massa kendaraan, merupakan indikasi perlambatan rata-rata yang terjadi selama tumbukan.

Hasil perbandingan respon tumbukan dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 7. Dapat dilihat bahwa kolom berpenampang *top-hat* dengan elemen solid sebagai model las titik memiliki harga gaya tumbuk rata-rata yang lebih besar 45-53% dibandingkan kolom dengan elemen beam sebagai model las titik.

Peningkatan harga gaya tumbuk rata-rata pada kolom berpenampang *top-hat* dengan elemen solid sebagai model las titik disebabkan oleh pengaruh diameter yang membuat kolom menjadi lebih kaku dan sulit untuk membentuk lipatan. Pada kolom dengan elemen solid sebagai model las titik, area las titik yang terhubung dengan elemen pada pelat membuat elemen-elemen tersebut sulit berdeformasi akibat kontak dengan daerah las titik. Kondisi ini tidak dialami pada kolom dengan elemen beam sebagai model las titik, dimana diameter las titik hanya diperhitungkan sebagai masukan data elemen beam.



**Gambar 6** Deformasi akhir pada simulasi tumbukan (kiri) dan proses terbentuknya lipatan pertama (kanan): (a) elemen beam, (b) satu elemen solid, dan (c) empat elemen solid



**Gambar 7** Perbandingan karakteristik tumbukan tabung berpenampang *top-hat* dengan variasi model elemen las titik: (a) gaya-perpindahan dan (b) gaya tumbuk rata-rata-perpindahan

**Tabel 3** Efisiensi gaya tumbuk dan energi absorpsi spesifik

Model spot weld	CFE	$\Delta CFE$ (%)	SEA (kJ/kg)	$\Delta SEA$ (%)
Elemen beam	0.46	-	17.70	-
1 elemen solid	0.69	48	30.23	71
4 elemen solid	0.63	36	28.73	62

### *Efisiensi gaya tumbuk*

Gaya tumbuk puncak,  $P_{max}$ , adalah gaya yang diperlukan untuk menginisiasi terjadinya lipatan dan memulai proses penyerapan energi. Nilai inilah yang berhubungan langsung dengan perlambatan yang dialami penumpang ketika terjadinya tumbukan. Perbandingan antara gaya tumbuk rata-rata dengan gaya tumbuk puncak disebut sebagai parameter efisiensi gaya tumbuk,  $CFE$ , dan didefinisikan melalui persamaan:

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (6)$$

Hasil perhitungan CFE untuk kolom dengan tiga pemodelan ditunjukkan pada Tabel 3. Dapat dilihat bahwa pemodelan las titik dengan elemen solid lebih efisien sebesar 36-48% dalam menyerap energi. Hal ini disebabkan karena model dengan elemen solid memiliki harga gaya tumbuk rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan model beam, sedangkan nilai gaya tumbuk puncak tidak berbeda jauh untuk ketiga model las titik.

### *Energi absorpsi spesifik*

Energi absorpsi spesifik,  $SEA$ , didefinisikan sebagai perbandingan antara energi yang diserap oleh struktur terhadap massa dari struktur yang mengalami deformasi dan didefinisikan sebagai berikut:

$$SEA = \frac{E_a}{m_c} \quad (7)$$

Parameter ini merupakan parameter kuantitatif yang berguna untuk membandingkan prestasi struktur dalam menyerap energi untuk geometri dan massa yang berbeda.

Hasil perhitungan  $SEA$  untuk kolom dengan tiga pemodelan ditunjukkan pada Tabel 3. Dapat dilihat bahwa kolom dengan las titik yang dimodelkan dengan elemen solid memiliki energi absorpsi yang lebih tinggi, 62-71%, yang artinya

memiliki prestasi penyerapan energi yang lebih baik.

### Kesimpulan

Evaluasi pengaruh pemodelan las titik terhadap karakteristik tumbukan aksial pada *crash box* berpenampang *top-hat* dalam hal modus deformasi, gaya tumbuk rata-rata, efisiensi gaya tumbuk, dan energi absorpsi spesifik telah selesai dilakukan. Hasil studi menunjukkan pemodelan las titik menggunakan elemen solid membuat *crash box* lebih kaku dibandingkan dengan pemodelan las titik menggunakan elemen beam. Hasil simulasi *crash box* dengan elemen solid sebagai model las titik memiliki jarak deformasi yang lebih rendah 31-34%, jumlah lipatan akhir yang lebih sedikit, gaya tumbuk rata-rata yang lebih besar 45-53%, efisiensi gaya tumbuk lebih besar 36-48% dan energi absorpsi lebih besar 62-71% jika dibandingkan dengan hasil studi menggunakan elemen beam sebagai model las titik.

### Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Institut Teknologi Bandung yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini melalui Program Riset dan Inovasi ITB tahun anggaran 2013.

### Nomenklatur

$r$	<i>small radius of a cylindrical or conical surface</i>
$t$	tebal kolom
<i>BE</i>	model las titik <i>beam</i> elemen
<i>CFE</i>	efisiensi gaya tumbuk ( <i>Crushing Force Efficiency</i> )
$D,p$	koefisien Cowper – Symonds
$E_A$	energi absorpsi total
$H$	panjang setengah gelombang lipatan elemen
$L$	$= (2a + 2b + 4f)$
$M_0$	<i>fully plastic bending moment</i> $= \frac{1}{4} \sigma_0 t^2$
$P_m$	gaya tumbuk rata-rata
$P_{max}$	gaya tumbuk puncak
<i>S1E</i>	model las titik satu elemen solid
<i>S4A</i>	model las titik empat elemen solid
<i>SEA</i>	energi absorpsi spesifik ( <i>Specific Energy Absorption</i> )

### Greek letters

$\dot{\varepsilon}$	laju regangan plastis uniaksial
$\sigma_0$	<i>static flow stress material</i>
$\sigma_0^d$	<i>dynamic plastic flow stress material</i>

### Referensi

1. V. Tarigopula, M. Langseth, O. S. Hopperstad, dan A. H. Clausen, Axial Crushing of Thin-walled High-strength Steel Sections. *International Journal of Impact Engineering*, **32**:847-882, 2006.
2. F. Schneider dan N. Jones, Impact of Thin-walled High-strength Steel Structural Section, *Proceeding of the Institute Mechanical Engineering, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **218(2)**:131-158, 2004.
3. F. Schneider dan N. Jones, Influence of Spot-weld Failure on Crushing of Thin-walled Structural Section. *International Journal of Mechanical Sciences*, **45**:2061-2081, 2003.
4. E. Rusiński, A. Kopczyński, dan J. Czmochowksi, Tests of Thin-walled Beams Joined by Spot Welding, *Journal of Materials Processing Technology*, **157-158**:405-409, 2004.
5. M. D. White dan Norman Jones, A Theoretical Analysis for the Dynamic Axial Cruhing of Top-hat and Double-hat Thin-walled Sections, *Proceeding of the Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **213(4)**:307-325, 1999.
6. F. Schneider dan N. Jones, Observations on the Design and Modelling of Some Joined Thin-walled Structural Sections, *Thin-Walled Structures*, **46**:887-897, 2008.
7. Ly Hung Anh, *Behaviour of Thin-Walled Prismatic Structures Subjected to Low Velocity Impact Loading*, M.S. Thesis, Aeronautics and Astronautics, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, ITB, Bandung, 2007.
8. Sahril Affandi, *Analisis Numerik dan Eksperimen Tumbukan Kuasi-Statik pada Tabung Silinder Polyvinyl Chloride*, Tugas Sarjana, Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, ITB, Bandung, 2010.
9. Rizky Fitriansyah, Studi Parametrik Kasus Tumbukan Kecepatan Rendah Pada Tabung Berpenampang Bujursangkar Berlubang Menggunakan Metode Elemen Hinga, Tugas Sarjana, Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, ITB, Bandung, 2012.
10. Ditho Ardiansyah P, *Analysis of Cylindrical Thin-Walled Column Subjected to Axial Impact Loading Considering Strain Rate Effect*, Tugas Sarjana, Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, ITB, Bandung, 2010.
11. Sahril Affandi, *Numerical and Experimental Impact Analysis of Square Crash Box Structure with Holes*, M.S. Thesis, Aeronautics and Astronautics, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, ITB, Bandung, 2013
12. Agustinus Dimas. Kaji Numerik Struktur Crash Box Berpenampang Top-Hat dengan Sambungan Las Titik Untuk Keselamatan Alat Transportasi Darat. Tugas Sarjana. Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, ITB, Bandung, 2013.
13. Skye Malcolm dan Emily Nutwell, Spotweld Failure Prediction using Solid Element Assemblies, dipresentasikan pada *6<sup>th</sup> European LS-DYNA User's Conference*, Frankenthal, Jerman, 11 Oktober, 2007.