

Pengaruh Pengisian *Aluminum Foam* Terhadap Karakteristik Tumbukan Aksial Tabung Segi Empat

Annisa Jusuf, Supemda Siahaan, Tatacipta Dirgantara¹, Leonardo Gunawan², Ichsan Setya Putra³

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

Abstrak

Tema penelitian tentang sistem penyerap energi tumbukan pada mobil meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah kecelakaan pada saat ini. Pada umumnya konstruksi struktur mobil dilengkapi dengan sistem penyerap energi tumbukan dari arah depan, biasanya berbentuk kolom, untuk melindungi kabin penumpang selama mengalami tumbukan. Sistem ini akan menyerap energi tumbukan melalui proses deformasi plastis yang disebut *progressive buckling*. Dengan proses deformasi ini, kerusakan pada kabin penumpang dapat dihindari sebanyak mungkin, kemungkinan tercederainya penumpang dapat diperkecil, serta gaya inersia akibat perlambatan yang dirasakan oleh penumpang tetap dalam batas aman. Pada penelitian ini, akan dianalisis konstruksi kolom penyerap energi berbentuk tabung segi empat berdinding tipis dan tabung segi empat yang diisi dengan material *aluminum foam* dikenai oleh pembebanan tumbukan dari arah aksial. Tabung tersebut dianalogikan sebagai *crash-box* yang mengalami tumbukan dari arah depan. Evaluasi pengaruh penggunaan *aluminum foam* terhadap karakteristik tumbukan aksial khususnya kenaikan nilai *mean crushing force* dari tabung segi empat dan modus deformasinya akan dilakukan. Perangkat lunak berbasis metoda elemen hingga eksplisit non-linear digunakan untuk memprediksi respons dari tabung ketika dikenai pembebanan tumbukan secara aksial. Hasil studi menunjukkan bahwa tabung segi empat yang diisi dengan *aluminum foam* memiliki harga *mean crushing force* 196% lebih tinggi dan deformasi yang lebih pendek dibandingkan dengan tabung segi empat dengan dimensi yang sama. Studi numerik juga menunjukkan bahwa tabung yang diisi dengan *aluminum foam* lebih efektif dalam menyerap energi dibandingkan dengan tabung segi empat tanpa material pengisi.

Keywords: Tumbukan aksial, tabung segi empat berdinding tipis, *aluminum foam*, *mean crushing force*

Pendahuluan

Banyaknya kecelakaan yang terjadi pada kendaraan bermotor khususnya mobil menuntut dilakukannya tindakan perlindungan keselamatan yang lebih baik. Bentuk kecelakaan yang sering terjadi adalah benturan (tumbukan) mobil dengan benda-benda lain seperti kendaraan lain, pagar, tembok, dan lain-lain. Untuk mengurangi pengaruh benturan tersebut terhadap penumpang, struktur mobil dirancang agar beban yang timbul karena tumbukan dapat diserap. Dengan merancang ulang komponen peredam beban tumbukan atau menambahkan komponen untuk keperluan ini, diharapkan korban yang timbul karena kecelakaan mobil dapat dikurangi atau bahkan dihindari. Contoh alat yang khusus dibuat untuk melindungi penumpang mobil pada kecelakaan adalah penahan beban tumbukan depan dan belakang (sistem *bumper*), *airbag*, dan sabuk pengaman.

Prinsip kerja sistem *bumper* adalah menyerap energi

kinetik sebesar mungkin dan membatasi beban yang diterima penumpang. Pada umumnya sistem *bumper* menggunakan struktur kolom yang dikorbankan untuk menyerap energi kinetik jika terjadi kecelakaan, struktur ini diberi nama *crash-box*. Rancangan *crash-box* sangat menentukan besaran energi yang dapat diserap dan beban yang diterima penumpang. Pada akhirnya, dua hal ini sangat berhubungan dengan keselamatan penumpang jika terjadi kecelakaan.

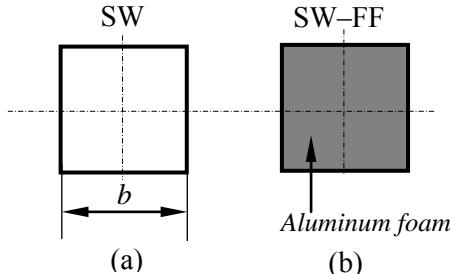
Karakteristik penyerapan energi *crash-box* ketika menerima beban tumbukan dalam arah aksial telah banyak diteliti [1–16]. Kelompok Keahlian Struktur Ringan, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, saat ini tengah melakukan penelitian tentang berbagai konfigurasi *crash-box* yang menerima beban tumbukan aksial secara numerik yang divalidasi melalui eksperimen, guna mendapatkan prosedur dan parameter penting dalam mendesain *crash-box* [13–16]. Salah satu konfigurasi *crash-box* yang menjadi perhatian adalah tabung berisi metal foam karena memiliki

kemampuan menyerap energi yang lebih baik jika dibandingkan dengan tabung logam saja, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian sebelumnya [13].

Pada penelitian ini, akan dianalisis konstruksi kolom penyerap energi berbentuk tabung segi empat berdinding tipis dan tabung segi empat yang diisi dengan material *aluminum foam* yang dikenai oleh pembebanan tumbukan dalam arah aksial. Tabung tersebut dianalogikan sebagai struktur *crash-box* yang mengalami tumbukan dari arah depan. Pengembangan model material yang digunakan pada simulasi numerik telah dilakukan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dibandingkan dengan penelitian sebelumnya [13]. Evaluasi pengaruh penggunaan *aluminum foam* terhadap karakteristik tumbukan aksial tabung segi empat khususnya kenaikan harga *mean crushing force*, modus deformasi plastis, dan peningkatan efektivitas struktur dalam menyerap energi akan dilakukan.

Detail Geometri

Pada penelitian ini, tabung segi empat berdinding tipis (SW) dan tabung segi empat yang diisi dengan material *aluminum foam* (SW-FF) akan dianalisis. Tabung yang disimulasikan memiliki panjang (L) 150 mm, panjang sisi (b) 55 mm, ketebalan (t) 1.1 mm dan geometri tabung dianggap sempurna. Geometri penampang tabung segi empat yang dianalisis ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Geometri penampang tabung segi empat (a) berdinding tipis, (b) diisi dengan *aluminum foam*

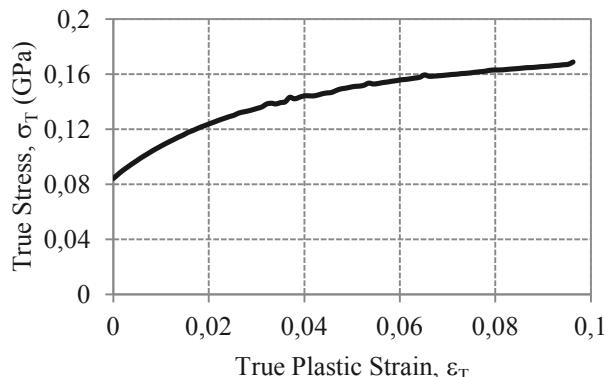
Sifat Material

Material yang digunakan untuk tabung adalah Al 6063 T1. Untuk mendapatkan kurva tegangan (σ) dan regangan (ε) sebagai input data pada model material, maka dilakukan dua macam uji tarik, yaitu uji tarik statik dengan laju regangan 0.001 /s dan uji tarik dinamik dengan laju regangan 0.1, 1, 10 and 100 /s. Uji tarik dilakukan di Computational Solid Mechanics and Design Laboratory – Korea Advanced Institute of Science and Technology. Dari hasil uji tarik didapatkan bahwa material aluminum yang digunakan tidak sensitif terhadap perubahan laju regangan. Sehingga, kurva *true stress – true strain* hasil uji tarik statik yang digunakan sebagai input pada simulasi numerik (Gambar 2). Sifat material Al 6063 T1 hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

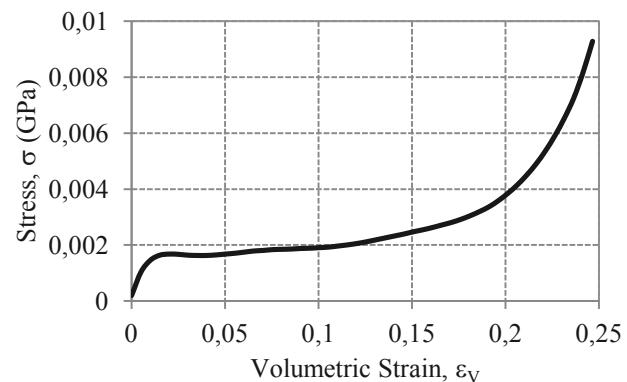
Aluminium foam yang digunakan pada simulasi numerik ini adalah *aluminium foam* jenis ALPORAS. Sifat material didapatkan dari hasil pengujian sifat material yang dilakukan di Laboratorium Teknik Metallurgi – Institut Teknologi Bandung. Sifat material ALPORAS hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1 dan kurva *stress – volumetric strain* yang digunakan sebagai input data material pada simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 1: Sifat material

	Al6063T1	ALPORAS
Modulus Young, E (GPa)	73.17	0.54
Yield stress, σ_{ys} (GPa)	0.084	–
Tensile stress, σ_u (GPa)	0.154	–
Poisson's ratio (ν)	0.3	0.3
Massa jenis, ρ (kg/mm ³)	2.7×10^{-6}	4.125×10^{-7}



Gambar 2. Kurva *true stress – plastic strain* Al6063T1



Gambar 3. Kurva *stress – volumetric strain* ALPORAS

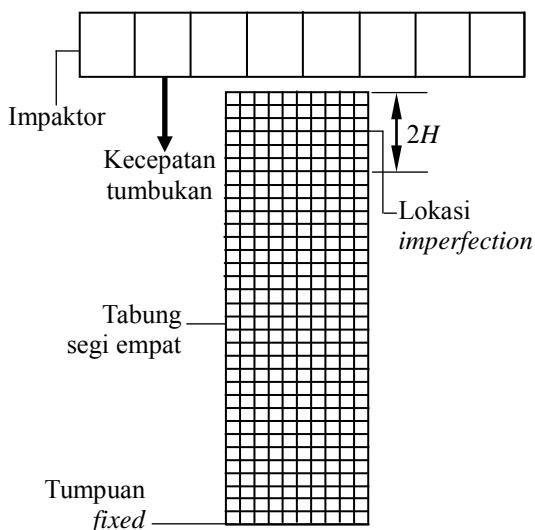
Model Elemen Hingga

Pada penelitian ini, untuk memprediksi respons dari tabung segi empat ketika dikenai beban tumbuk aksial, digunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga eksplisit non-linear. Dinding tabung dimodelkan dengan menggunakan elemen *shell* tipe Belytschko Lin Tsay sedangkan *foam* dan penumbuk dimodelkan dengan menggunakan elemen solid rigid heksahedral. Uji konvergensi menunjukkan bahwa besar elemen yang

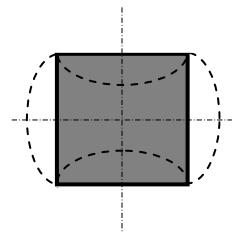
optimal untuk mendapatkan hasil numerik yang detail dalam waktu yang singkat yaitu $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ untuk setiap elemen. Model elemen hingga tabung segi empat ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada simulasi, tabung diberi beban tumbukan dengan memodelkan penumbuk yang bergerak dalam arah aksial dengan kecepatan dan massa yang konstan yaitu 8 m/s dan 80 kg . Alas tabung ditumpu ke segala arah (*fixed*) dan bagian atas tabung dalam keadaan bebas (*free*). Sedangkan, penumbuk ditumpu ke segala arah kecuali arah vertikal nya untuk menjamin penumbuk bergerak dalam arah aksial.

Tabung segi empat berdinding tipis disimulasikan dengan menggunakan model material *Piecewise Linear Plasticity* karena model material tersebut dapat mensimulasikan perilaku material yang elasto-plastik, isotropik, dan juga dapat mengikutsertakan pengaruh dari laju regangan. Sedangkan, *foam* disimulasikan dengan menggunakan model material *crushable foam*, karena model material tersebut dapat mensimulasikan karakteristik aluminum foam yang tidak akan kembali kebentuk semula ketika mengalami tumbukan.



Gambar 4. Model Elemen Hingga



Gambar 5. Tipe *imperfection*

Tipe-tipe kontak yang digunakan dalam pemodelan ini adalah kontak *automatic node to surface* yang digunakan sebagai kontak antara penumbuk dengan tabung, kontak *automatic surface to surface* yang digunakan sebagai kontak antara dinding tabung dengan foam, kontak *automatic single surface* yang digunakan sebagai kontak antara elemen-elemen pada dinding tabung, dan kontak *interior* yang digunakan

sebagai kontak antara elemen-elemen pada foam. Tipe-tipe kontak tersebut harus didefinisikan dalam pemodelan untuk mencegah terjadinya penetrasi antar tiap elemen yang kontak selama terjadinya *progressive buckling*.

Pada pemodelan tabung, ketidak sempurnaan geometri (*imperfection*) digunakan untuk memastikan deformasi plastis yang terjadi berada pada bagian tabung yang diinginkan. *Imperfection* yang diaplikasikan berbentuk setengah gelombang sinus (*half sine wave*) dengan panjang ($2H$), diukur dari bagian atas tabung. Dimana H dapat dihitung dengan menggunakan rumus teoretikal yang dikembangkan oleh Wierzbicki and Abramowicz [3], yaitu

$$H = 0.99b^{2/3}t^{1/3} \quad (1)$$

dimana b adalah panjang sisi tabung, dan t adalah tebal dinding tabung. Bentuk *imperfection* yang digunakan adalah bentuk inextensional, dimana puncak gelombang sinus pada dua sisi tabung yang saling berhubungan dibuat saling berlawanan arah yaitu satu sisi keluar dan satu sisi kedalam tabung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Analisis dan Diskusi

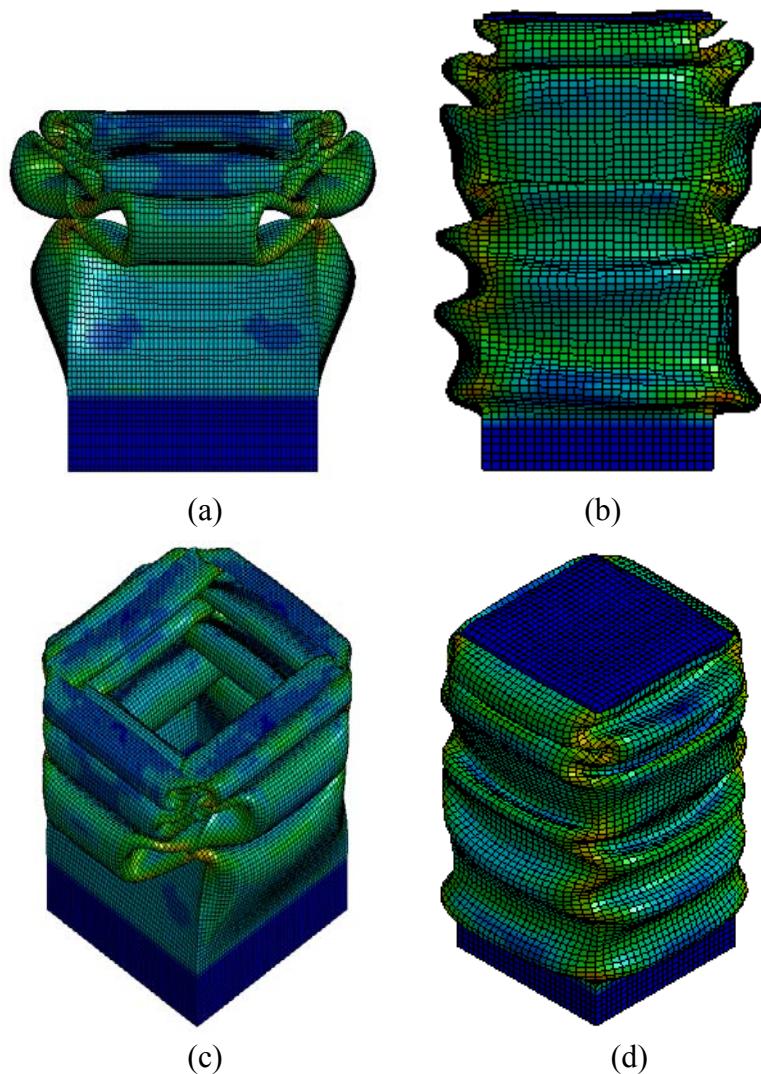
Pada penelitian ini dilakukan evaluasi pengaruh penggunaan *aluminum foam* pada tabung segi empat terhadap karakteristik tumbukan aksial khususnya modus deformasi plastis, kenaikan harga *mean crushing force*, dan peningkatan efektivitas struktur dalam menyerap energi.

Modus deformasi plastis

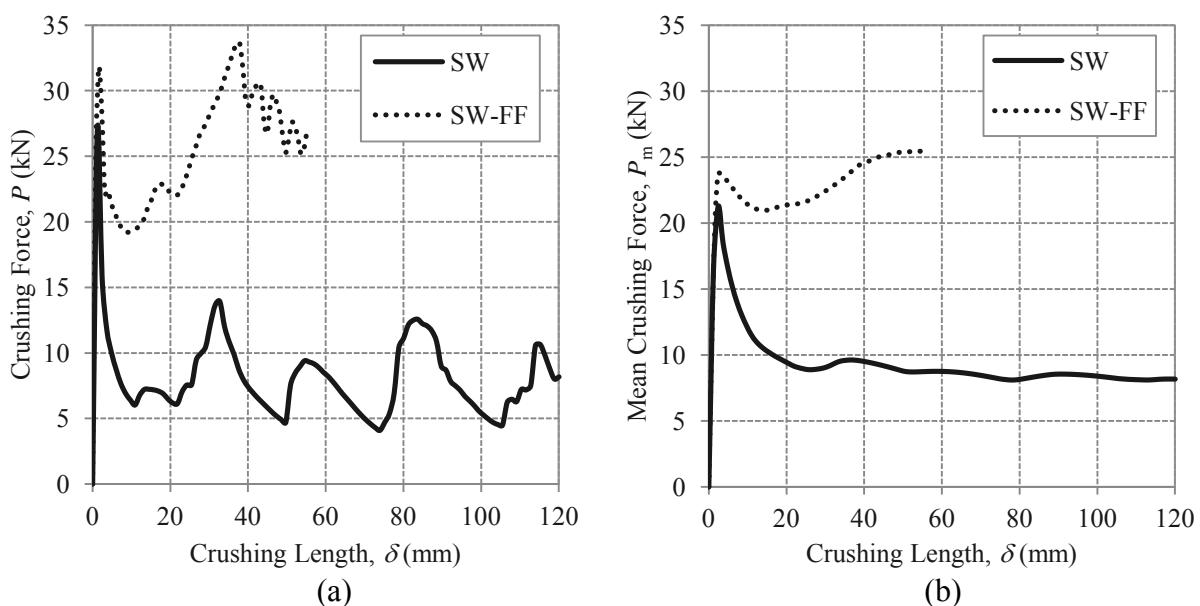
Modus deformasi plastis yang terjadi pada tabung segi empat berdinding tipis (SW) dan tabung segi empat yang diisi dengan *aluminum foam* (SW-FF) ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedua tabung mengalami *progressive buckling* dengan modus deformasi inextensional, dimana dua sisi tabung yang saling terkoneksi memiliki lipatan yang berlawanan arah yaitu satu sisi melipat keluar dan satu sisi melipat kedalam. Dari hasil pemodelan didapatkan pula bahwa pada kondisi pembebanan yang sama kedua tabung memiliki jumlah lipatan yang berbeda, dimana lipatan pada tabung SW-FF lebih banyak (*half wave*, $2H$ yang lebih pendek) dibandingkan dengan lipatan pada tabung SW.

Mean Crushing Force

Mean crushing force (P_m) merupakan parameter penting untuk mengetahui jumlah energi yang terdisipasi melalui deformasi plastis yang terjadi pada tabung dan dapat dihitung dengan cara merata-ratakan nilai gaya penghancur (*crushing force*, P) pada setiap perubahan panjang deformasi (*crushing length*, δ), dan dapat dituliskan



Gambar 6. Modus deformasi plastis (a) (c) tabung segi empat berdinding tipis (SW)
(b) (d) tabung segi empat yang diisi dengan *aluminum foam* (SW-FF)



Gambar 7. Respon tumbukan (a) tabung segi empat berdinding tipis (SW)
(b) tabung segi empat yang diisi dengan *aluminum foam* (SW-FF)

melalui persamaan sebagai berikut

$$P_m = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta P(\delta) d\delta \quad (2)$$

Gambar 7 dan Tabel 2 menunjukkan perbandingan respon tumbukan tabung segi empat berdinding tipis (SW) dan tabung segi empat diisi dengan *aluminum foam* (SW-FF). Dapat dilihat bahwa perbedaan harga *mean crushing force* (P_m) dan energi yang diserap (E_A) untuk tabung SW-FF adalah 196% lebih tinggi dan deformasi maksimum (δ_{max}) yang terjadi 54.1% lebih pendek jika dibandingkan dengan tabung SW.

Tabel 2: Hasil simulasi numerik

Jenis Tabung	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	E_A (kJ/kg)	P_m (kN)	ΔP_m (%)
SW	26.9	120.0	0.525	8.8	–
SW-FF	33.6	55.1	1.553	25.5	196

* P_m dan E_A ditentukan pada saat δ_{max}

** ΔP_m dihitung dengan perbandingan terhadap SW

Interaksi antara dinding tabung dan material pengisi *aluminum foam* pada tabung SW-FF menyebabkan *mean crushing force* dan penyerapan energi pada tabung akibat beban tumbukan aksial menjadi lebih baik karena deformasi plastis dinding tabung ke arah dalam tertahan oleh material pengisi. Dengan demikian, dinding tabung dipaksa untuk membentuk lipatan dengan *half wave* ($2H$) yang lebih pendek, terdapat interval antara satu lipatan dengan lipatan lain dan jumlah lipatan yang terjadi menjadi lebih banyak.

Efektivitas Struktur

Berdasarkan Jones [4] dan Yuen et al. [11], parameter-parameter penting yang menyatakan efektivitas suatu struktur dalam hal penyerapan energi adalah *Specific Energy Absorption* (S_{EA}) dan *Crush Force Efficiency* (CFE), yang dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$S_{EA} = \frac{E_A}{m} \quad (3)$$

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (4)$$

dimana m adalah massa tabung yang terdeformasi, dan P_{max} adalah gaya puncak (*peak force*) yang merupakan inisiasi terjadinya *buckling* lokal yang ditandai dengan besarnya gaya yang dibutuhkan untuk terjadinya lipatan pertama.

Tabel 3 menunjukkan S_{EA} dan CFE untuk tabung segi empat yang dianalisis. Didapatkan bahwa tabung segi empat yang diisi dengan *aluminum foam* (SW-FF) lebih

efektif dalam menyerap energi jika dibandingkan dengan tabung segi empat berdinding tipis (SW), ditandai dengan harga S_{EA} 2.054 kali lebih tinggi dan CFE 2.303 kali lebih tinggi.

Tabel 3: Efektivitas struktur dalam menyerap energi

Jenis Tabung	S_{EA}	CFE
SW	4.45	0.33
SW-FF	9.14	0.76

Kesimpulan

Evaluasi pengaruh penggunaan *aluminum foam* terhadap karakteristik tumbukan aksial tabung segi empat, khususnya kenaikan harga *mean crushing force* dan modus deformasinya menggunakan metode elemen hingga telah selesai dilakukan. Hasil studi menunjukkan bahwa tabung segi empat yang diisi dengan *aluminum foam* memiliki harga *mean crushing force* 196% lebih tinggi dan deformasi yang lebih pendek dibandingkan dengan tabung segi empat dengan dimensi yang sama. Studi numerik juga menunjukkan bahwa tabung yang diisi dengan *aluminum foam* lebih efektif dalam menyerap energi dibandingkan dengan tabung segi empat tanpa *aluminum foam*.

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini terselenggara berkat dukungan dana dari Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi, Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan, Republik Indonesia melalui program Hibah Kompetensi 2009 – 2011, Hibah Bersaing 2009 – 2011, Collaborative Research ITB – KAIST 2009 – 2011 dan dana Hibah Riset KK ITB 2011. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada Prof. Hoon Huh dari Computational Solid Mechanics and Design Laboratory – Korea Advanced Institute of Science and Technology (CSMD Lab – KAIST) yang telah menfasilitasi pengujian tarik statik dan dinamik.

Referensi

- [1] Wierzbicki T, Abramowicz W. On crushing mechanics of thin-walled structures. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50:4a, 727–34 (1983).
- [2] Abramowicz W, Wierzbicki T. Dynamic axial crushing of square tubes. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 2:2, 179–208 (1984).
- [3] Abramowicz W, Wierzbicki T. Axial crushing of multi corner sheet metal columns. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 56:1, 113–20 (1989).
- [4] Jones N. *Structural impact*. Cambridge University Press (1989).

- [5] Langseth M, Hopperstad OS. Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminum extrusions. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18:7–8, 949–68 (1996).
- [6] Langseth M, Hopperstad OS, Hanssen AG. Crash behaviour of thin-walled aluminium members. *Thin-Walled Structures*, Vol. 32:1–3, 127–50 (1998).
- [7] Langseth M, Hopperstad OS, Berstad T. Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, 829–854 (1999).
- [8] Sun J, Osire SE. Prediction of energy absorption of thin tubes. *Proceeding of ASME GSTC*, 63–67 (2002).
- [9] Zhang X, Huh H. Crushing analysis of polygonal columns and angle elements. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, 441–451 (2010).
- [10] Aljawi AAN, et al. Finite element and experimental analysis of square tubes under dynamic axial crushing. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS* (2004).
- [11] Yuen SCK, Nurick GN, Starke RA. The energy absorption characteristics of double-cell tubular profiles. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 5, 289–317 (2008).
- [12] Zhang XW, Su H, Yu TX. Energy absorption of an axially crushed square tube with a buckling initiator. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36:3, 402–417 (2009).
- [13] Jusuf A, Allam FS, Dirgantara T, Gunawan L, Putra IS. Low velocity impact analyses of prismatic columns using finite element method. *Key Engineering Materials*, Vol. 462–463, 1308–1313 (2011).
- [14] M. Mora, A. Jusuf, T. Dirgantara, L. Gunawan, I.S. Putra. Low Velocity Impact Analysis of Foam-Filled Double-Walled Prismatic Columns. *Proceeding of International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME)* (2009).
- [15] Leonardo Gunawan, Tatacipta Dirgantara, Ichsan Setya Putra. Development of a Dropped Weight Impact Testing Machine. *International Journal of Engineering and Technology IJET-IJENS*, Vol. 11:06, 120–126 (2011).
- [16] Annisa Jusuf, Tatacipta Dirgantara, Leonardo Gunawan, Ichsan Setya Putra. Numerical and Experimental Study of Single-Walled and Double-Walled Columns under Dynamic Axial Loading. Telah diterima untuk diterbitkan pada *Journal of Mechanical Engineering* (2012).