

Optimization of Foam Filled Double Cylinder Tube under Bending Load

Ilyas Renreng¹, Fauzan Djameluddin^{1,*} dan Thomas Tjandinegara¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin - Makassar

*Korespondensi: fauzanman_77@yahoo.com

Abstract. This paper presents the comparison of the optimum value for empty and foam filled double circular tube under bending loading. The thin-walled tube is used in vehicle structures to absorb the impact energy especially on vehicle door. In this study, aluminum alloy tubes AA6063 T6 filled foam that both ends are supported and in the middle of tube subjected to static quasi bending loading. Numerical analysis using finite element method software. Previously, the models were validated based on experimental data in reference accordance with this study. Deformation mode of under bending load were studied by variations in thickness (t) and diameter (d) of the tube wall. The design of multi objective optimization used crash-worthiness parameters such as minimum crushing force and maximized specific energy absorption by using Radial Base Function and NSGA II. The results showed that the optimum value of foam filled double circular tube is higher than the empty double circular tube so that this structure can be recommended as the energy absorption component such as side beam on the vehicle door.

Abstrak. Makalah ini menyajikan perbandingan nilai optimasi tabung bulat ganda berbahan aluminium kosong dan tabung bulat ganda berisi foam di bawah pembebanan lentur. Tabung berdinding tipis ini digunakan pada struktur kendaraan untuk menyerap energi benturan khususnya pada pintu kendaraan. Dalam penelitian ini, tabung paduan aluminium AA6063 T6 diisi foam yang kedua ujungnya ditumpu dan pada bagian tengah mengalami pembebanan lentur kuasi statik. Analisis numerik menggunakan perangkat lunak metode elemen hingga. Sebelumnya model divalidasi berdasarkan data eksperimen yang sesuai dengan penelitian ini. Model deformasi tabung di bawah beban lentur dipelajari dengan variasi ketebalan (t) dan diameter (d) dari dinding tabung. Perancangan optimasi berbagai objektif (*multi objective optimization*) menggunakan parameter *crashworthiness* seperti minimum nilai daya penghancur (*crushing force*) dan memaksimalkan nilai penyerapan energi spesifik dilakukan dengan menggunakan *radial basis function* dan NSGA II. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain optimal yang berbeda diperoleh bahwa nilai optimum tabung bulat ganda berisi foam lebih tinggi dibandingkan dengan tabung bulat ganda kosong sehingga struktur ini dapat direkomendasikan sebagai komponen penyerap tenaga seperti *side beam* pada pintu kendaraan.

Kata kunci: tabung bulat, *crashworthiness*, optimasi, NSGA II

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Desain struktur *crashworthiness* pada kendaraan khususnya komponen keselamatan pasif bertujuan untuk memperoleh daya tahan yang kuat dalam menyerap dan menghilangkan energi secara stabil dan terkendali. Dalam kasus tabrakan dan benturan samping, *side beam* dipasang di pintu dan komponen ini memainkan peran yang sangat penting untuk menyerap banyak energi. Sehingga mengurangi jumlah energi yang ditransfer ke penumpang kendaraan. Penelitian untuk menentukan penyerapan energi pada berbagai macam bentuk struktur telah dilakukan oleh banyak peneliti. Beberapa model teoritis telah dikembangkan dan disempurnakan untuk memprediksi energi yang diserap dari *side beam* pada pintu kendaraan [1, 2]. Meningkatnya ketertarikan penelitian secara komprehensif mengenai karakteristik *crashworthiness* struktur tabung berdinding tipis

dengan geometri penampang yang berbeda dianalisis secara analitis [3, 4], secara numerik [5, 6] dan eksperimen [7, 8]. Studi pengoptimalan pada struktur berdinding tipis untuk desain *crashworthiness* juga telah dilakukan [9-11]. Mempelajari dan menentukan nilai optimum *crashworthiness* tabung berdinding tipis yang mengalami lenturan relatif baru, karena sampai saat ini penyelidikan terutama terfokus pada runtuh tabung berdinding tipis di bawah pembebanan aksial [12-15].

Untuk meneliti potensi penghematan bobot struktur pada kendaraan, maka struktur menggunakan material ringan seperti aluminium dan mengisi *foam* sebagai bahan penyerap tenaga. Penelitian dilakukan mempelajari karakteristik mengenai lenturan struktur berbahan aluminium berisi *foam* secara numerik [16] dan eksperimental [17]. Mereka menyimpulkan bahwa pengisian *foam* meningkatkan kapasitas daya dukung dari dalam

terhadap impak atau beban dan meningkatkan penyerapan energi. Juga ditunjukkan bahwa pengisian *foam* meningkatkan penyerapan energi terhadap berat rasio struktur. Dalam beberapa tahun terakhir, kelompok peneliti ini [18-20] telah melakukan penyelidikan secara eksperimental dan numerik terhadap kinerja struktur ber dinding tipis dengan topologi yang berbeda di bawah pembebanan aksial, tiga titik lentur serta kondisi pembebanan miring. Namun, penentuan nilai optimum *crashworthiness* secara dinamis dari struktur ber dinding tipis yang mengalami lenturan tiga titik belum diteliti lebih lengkap.

Dengan kemampuan komputer yang lebih cepat dan algoritma yang lebih baik, beberapa teknik pengoptimuman telah diterapkan dalam desain struktur, terutama untuk mengoptimalkan konfigurasi tabung berisi foam. Penyerapan energi maksimal dan berat minimum tabung berbahan aluminium berisi *foam* di bawah beban aksial diteliti [21]. Selain itu, memaksimalkan penyerapan energi spesifik dan meminimalkan puncak gaya penghancuran gaya tabrakan dengan menggunakan pengoptimalan pelbagai objektif telah diteliti. Sebagai contoh, efisiensi kekuatan penghancur maksimum (CFE) dan penyerapan energi spesifik secara maksimum (SEA) dari tabung bulat ber dinding tipis yang menggunakan optimasi pelbagai obyektif *crashworthiness* telah dipelajari [22]. Selain itu, pemrograman matematis yang berbeda, seperti algoritma genetika (GA) [23, 24] dan optimasi partikel swarm (PSO) [25], telah digunakan untuk mencari solusi nilai optimum.

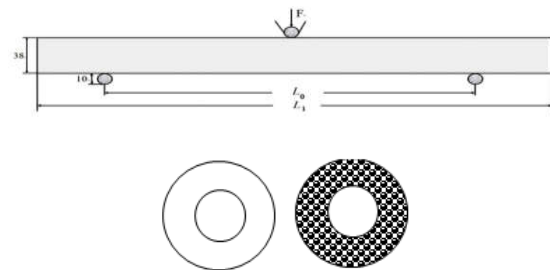
Model *beam* samping yang diimpak oleh tiang kaku menggunakan software ABAQUS. Karakteristik di bawah beban lentur tiga titik dari tabung ganda berisi *foam* dipelajari. Hasil simulasi divalidasi terhadap uji eksperimental yang relevan dalam literatur. Dalam makalah ini, optimasi pelbagai objektif pada tabung berbahan aluminium di bawah beban aksial dilakukan dengan menggunakan algoritma genetika sortir II yang tidak didominasi (NSGA II). Metode ini adalah jenis GA yang cepat dan elitis [26]. Parameter struktur yang dioptimalkan, seperti diameter dalam, diameter luar dan ketebalan pada tabung ganda. Fungsi dasar radial (RBF) digunakan untuk membangun pendekatan desain optimum dengan menggunakan solusi *Pareto*.

Model Elemen Hingga

Untuk mengeksplorasi mekanisme deformasi dan kegagalan, simulasi numerik dari struktur tabung ganda yang dipenuhi foam dilakukan dengan menggunakan kode elemen hingga ABAQUS yang

eksplisit. Parameter material yang digunakan dalam simulasi diperoleh dari pengujian tarik [27].

Model plastik elastis dengan pengerasan regangan isotropik dan aturan aliran terkait digunakan untuk profil. Kurva regangan tegangan teknik yang diperoleh dari hasil eksperimen telah ditransformasikan ke kurva regangan tegangan-plastik sebenarnya. Model foam yang mudah terbakar dikembangkan awalnya oleh Deshpande dan Fleck (2000) digunakan untuk inti aluminium *foam*. Diameter pukulan silindris dan kedua peno-pangnya 10 mm. Panjang total L spesimen bergantung pada rasio span L_0 terhadap diameter tabung luar D , lihat Gambar 1. dipilih $L = 190$ mm ketika $L_0/D = 4$ sedangkan $L = 270$ mm saat $L_0/D = 6$. Massa dampaknya kira-kira 24,23 kg cukup untuk menghancurkan spesimen dalam eksperimen [20].



Gambar 1. (a) Skematik pembebanan lentur tiga titik dan (b) penampang tabung, kosong dan berisi *foam*

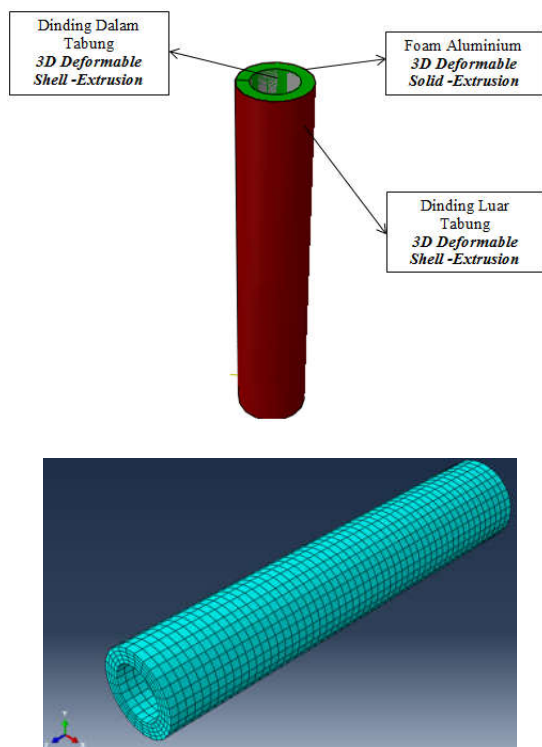
Parameter bahan yang digunakan dalam simulasi dinding tabung diperoleh dari hasil eksperimen [28], berupa paduan aluminium A6063 T6 [29]. Tabel 1 menunjukkan parameter bahan yang digunakan dalam simulasi elemen terhitung bagi dinding tabung. Bahan ini di pilih karena hasil simulasi boleh dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk tabung bulat di bawah pembebanan kuasi statik. Sedangkan parameter foam dengan sel tertutup telah digunakan dengan nilai sifat mekanik diperolehi daripada eksperimen bahan. Hasil eksperimen uji tekan kuasi-statik pada foam dengan berat jenis yang berbeda seperti yang diberikan dalam rujukan [14].

Tabel 1. Sifat mekanik paduan aluminium 6063 T6

Parameter	Nilai
Berat jenis	2700 kg/m ³
Modulus elastisitas	60,2 GPa
Poison rasio	0,3
Tegangan luluh	184,4 MPa
Tegangan maksimum	215,5 MPa

Untuk memodelkan tabung bulat ganda berisi foam, tiga lapisan tabung yang dipilih iaitu dinding tabung dalaman, dinding tabung luaran dan foam (Gambar 2). Lapisan dinding tabung dimodelkan

dengan bentuk dinding shell 3D (*3D Deformable Shell Extrusion*) sedangkan foam dimodelkan dengan bentuk solid 3D (*3D Deformable Shell Extrusion*).



Gambar 2. Geometri model elemen hingga untuk tabung ganda berisi foam

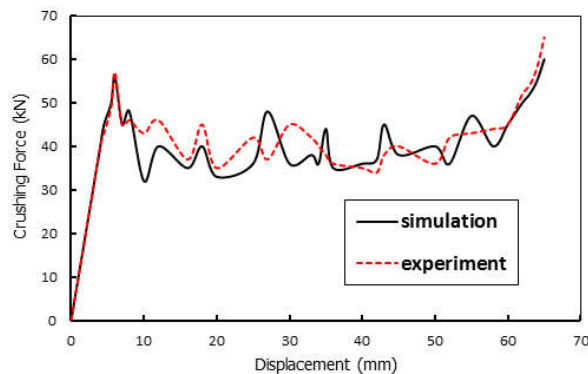
Pada bagian titik dimodelkan dengan menggunakan solid 3D (*3D Deformable Solid Extrusion*). Dinding tabung dimodelkan dengan menggunakan unsur empat node shell dengan titik lima simpul. Karakteristik foam ditentukan dengan menggunakan *Crushable Foam* dan *Crush Foam Hardening* dalam pakej ABAQUS yang mana model ini didasarkan pada model foam Dehspande dan Fleck. Sedangkan parameter foam dengan sel tertutup telah digunakan dengan nilai sifat mekanikal diperoleh dari eksperimen. Hasil eksperimen uji tekan statik dengan densitas yang berbeza seperti dalam rujukan [12]. Tabel 2. menunjukkan karakteristik parameter foam yang digunakan dalam simulasi unsur terhingga.

Tabel 2. Parameter bahan foam untuk simulasi [27]

Parameter	Nilai
Berat jenis	534 kg/m ³
Modulus elastisitas	0,625 GPa
Poison rasio	0,1

Hasil simulasi dan data eksperimen dalam literatur dipelajari untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan akurat agar dapat dieksplorasi untuk optimasi desain, terutama dalam simulasi tabung silinder ganda bebahan aluminium berisi

foam. Eksperimen ini mempelajari deformasi dan penyerapan energi tabung ganda di bawah pembebanan aksial statik. Gambar 3 menunjukkan grafik korelasi antara hasil percobaan dan simulasi numerik tabung silinder ganda aluminium-foam berkenaan dengan gaya perpindahan dan penghancuran. Tabel 3 menunjukkan perbedaan antara percobaan dan simulasi numerik, yang serupa dengan referensi [30-33]. Dari hasil ini, dapat diasumsikan bahwa model FE yang dikembangkan kompeten untuk eksplorasi optimasi desain.



Gambar 3. Perbandingan antara (a) hasil eksperimen dan (b) hasil simulasi

Tabel 3. Perbedaan hasil eksperimen dan simulasi

Parameter	Eksperimen	Simulasi	Error (%)
Crushing force	56,3	57,1	1,42
Energi absorption	2143	2140,8	0,11

Optimasi *Crashworthiness*

RBF adalah model pengganti yang mewakili hubungan antara fungsi obyektif individu dan variabel desain vektor. Dengan variabel vektor perancangan dan nilai respon pada titik n acak (pelatihan), pendekatan RBF terhadap fungsi respon $f'(x)$ berasal dari simulasi FE, sebagai ungkapan berikut:

$$f'(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(\|x - x_i\|) \quad (1)$$

Dimana, x adalah vektor dari variabel desain (input) yang dinormalisasi dengan x_i yang merupakan koordinat normal dari titik pelatihan tersebut, $r_i = \|x - x_i\| = \sqrt{(x - x_i)^T (x - x_i)}$, ϕ adalah fungsi dasar simetris radial, dan $i = 1$ adalah koefisien interpolasi yang tidak diketahui.

Optimasi multi-tujuan dengan menggunakan analisis elemen hingga (FEA) dan menghasilkan kode untuk RBF dan NSGA II menggunakan MATLAB. Namun, NSGA II, digunakan disini untuk menghitung formula untuk optimasi multi-obyektif dalam Persamaan (2). Beberapa peneliti telah menyelidiki secara simultan optimalisasi kelayakan crash dua kriteria. Ini adalah skema

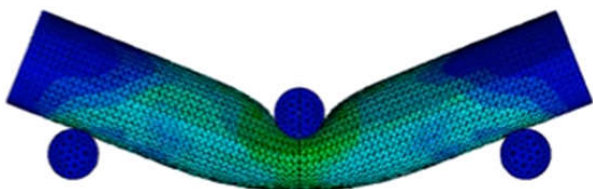
optimasi multi-tujuan. Secara umum, matematika multi-tujuan dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} \text{Min } F(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ \text{s. t. } x &\in R^m \text{ and } x^L \leq x \leq x^U \\ g_u(x) &\geq 0, u = 1, \dots, s \\ h_v(x) &= 0, v = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (2)$$

Dimana x adalah variabel vektor desain, n adalah bilangan fungsi tujuan, $f_n(x)$ adalah fungsi objektif dari tujuan, $x_L = (x_{L1}, x_{L2}, \dots, x_{L1})$ menunjukkan batas bawah, dan $x_U = (x_{U1}, x_{U2}, \dots, x_{U1})$ batas atas dari variabel desain m , s dan p adalah jumlah batasan yang tidak sama dan sama.

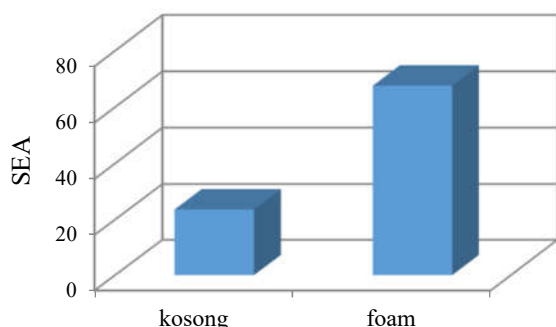
Hasil dan Pembahasan

Gambar 5 memperlihatkan deformasi akibat pembebanan lentur kuasi-statis pada tabung bulat berbahan aluminium berisi foam yang dimodelkan.



Gambar 5. Hasil deformasi struktur dengan kondisi pembebanan lentur statik

Gambar 6 tabung berisi foam aluminium mempunyai nilai SEA lebih tinggi daripada tabung ganda kosong karena interaksi gesekan antara pengisi foam dan tabung dalam / luar [25]. Dengan demikian, kemampuan tabung berisi foam bulat untuk menyerap energi lebih besar daripada tabung kosong.

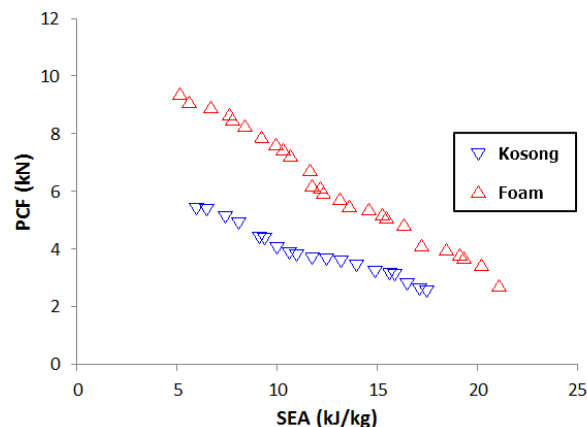


Gambar 6. Komparasi SAE isi tabung

Persamaan pengoptimalan tabung ganda diturunkan dengan mempertimbangkan parameternya. Hasilnya diharapkan bisa menentukan SEA yang maksimal dan minimum *peak crushing force* (PCF). Persamaan optimasi ditunjukkan di bawah ini:

$$\begin{aligned} \text{Min}\{SEA(t, d), PCF(t, d)\} \\ \text{s. t. } 1.5 \text{ mm} \leq t \leq 3 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \leq d \leq 25 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3)$$

Gambar 7 menunjukkan bahwa hasil pengoptimalan titik melingkar mewakili solusi Pareto, yang menjelaskan *trade-off* antara SEA dan PCF. Dari hasil ini dapat dilihat bahwa struktur yang mengandung foam memiliki PCF yang lebih rendah dan kapasitas penyerapan energi lebih banyak daripada tabung ganda kosong, seperti pada referensi [26].



Gambar 7. Hasil optimasi

Kesimpulan

Makalah ini mempresentasikan model dan optima-lisasi tabung ganda silinder aluminium *foam* di bawah pembebanan lenturan tiga titik dengan mempertimbangkan dua struktur tabung. Model FE memprediksi parameter *crashworthiness* tabung dengan akurasi tinggi. Persentase perbedaan PCF dan penyerapan energi antara eksperimental dan simulasi adalah 1,42% dan 0,11%.

Persamaan optimasi multi obyektif diformulasikan untuk menentukan SEA dan PCF dengan variabel desain yang berbeda, seperti ketebalan dan diameter dinding tabung. Dengan menggunakan NSGA II, hasil optimum menunjukkan bahwa kemampuan *crashworthiness* tabung bulat ganda berisi *foam* (SEA = 22,67 kJ / kg) lebih baik dari pada kosong (SEA = 17,83 kJ / kg). Hasil ini bisa menjadi dasar bagi perancang untuk menerapkan tabung yang berisi *foam*, terutama sebagai peredam energi dalam struktur mobil.

Referensi

- [1] Wenguo Qi, X.L.Jin, x.Y. Zhang, "Improvement of Energy-Absorbing structures of a commercial vehicle for crashworthiness using finite element method", *Int J Adv Manuf Techol* (2006) 30: 1001-1009
- [2] Tso Liang Teng, Kuan Chun Chang, Chien Hsun Wu, "Development and Validation of Side Impact Crash and Sled Testing Finite

- Element Models”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 45, No10, Oct 2007, 925- 937
- [3] Hou S, Li Q, Long S, Yang X, Li W. Crashworthiness design for foam filled thinwall structures. *Mater Des* 2009;30:2024–32.
- [4] Zhang Y, Sun G, Li G, Luo Z, Li Q. Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria. *Mater Des* 2012;38:99–109.
- [5] Yin H, Wen G, Hou S, Chen K. Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes. *Mater Des* 2011;32:4449
- [6] Aktay L, Kröplin BH, Toksoy AK, Güden M. Finite element and coupled finite element/smooth particle hydrodynamics modeling of the quasi-static crushing of empty and foam-filled single, bitubular and constraint hexagonal- and square-packed aluminum tubes. *Mater Des* 2008;29:952–62.
- [7] Daneshi GH, Hosseini-pour SJ. Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression. *Mater Des* 2002;23:611–7.
- [8] Zarei H, Kröger M. Optimum honeycomb filled crash absorber design. *Mater Des* 2008;29:193–204.
- [9] Hou S, Li Q, Long S, Yang X, Li W. Multiobjective optimization of multi-cell sections for the crashworthiness design. *Int J Impact Eng* 2008;35:1355–67.
- [10] Sun G, Li G, Zhou S, Li H, Hou S, Li Q. Crashworthiness design of vehicle by using multiobjective robust optimization. *Struct Multidisc Optim* 2011;44:99–110.
- [11] Hou S, Han X, Sun G, Long S, Li W, Yang X, et al. Multiobjective optimization for tapered circular tubes. *Thin-Walled Struct* 2011;49:855–63.
- [12] Kim D-K, Lee S. Impact energy absorption of 6061 aluminum extruded tubes with different cross-sectional shapes. *Mater Des* 1999;20:41–9.
- [13] Aktay L, Toksoy AK, Güden M. Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes: experimental and numerical analysis. *Mater Des* 2006;27:556–65.
- [14] Tasdemirci A. The effect of tube end constraining on the axial crushing behavior of an aluminum tube. *Mater Des* 2008;29:1992–2001.
- [15] Alavi Nia A, Badnava H, Fallah Nejad K. An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes. *Mater Des* 2011;32:3594–607.
- [16] Santosa S, Wierzbicki T. Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns. *Int J Mech Sci* 1999;41:995–1019.
- [17] Santosa S, Banhart J, Wierzbicki T. Experimental and numerical analyses of bending of foam-filled sections. *Acta Mech* 2001;148:199–213.
- [18] Guo LW, Yu JL. Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam. *Int J Impact Eng* 2011;38:85–94.
- [19] Guo LW, Yu JL. Bending behavior of aluminum foam-filled double cylindrical tubes. *Acta Mech* 2011;222:233–44.
- [20] Li ZB, Yu JL, Guo LW. Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading. *Int J Mech Sci* 2012;54:48–56.
- [21] Zarei HR, Kröger M. Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application. *Thin-Walled Structures*. 2008;46:214-21.
- [22] Acar E, Guler MA, Gerçeker B, Cerit ME, Bayram B. Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations. *Thin-Walled Structures*. 2011;49:94-105.
- [23] Nariman-zadeh N, Darvizeh A, Jamali A. Pareto optimization of energy absorption of square aluminium columns using multi-objective genetic algorithms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2006;220:213-24.
- [24] Hou S, Li Q, Long S, Yang X, Li W. Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures. *Materials & Design*. 2009;30:2024-32.
- [25] Sun G, Li G, Stone M, Li Q. A two-stage multi-fidelity optimization procedure for honeycomb-type cellular materials.

Computational Materials Science.
2010;49:500-11.

- [26] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms: John Wiley & Sons; 2001.
- [27] Guo LW, Yu JL. Bending behavior of aluminum foam-filled double cylindrical tubes. *Acta Mechanical*. 2011;222:233-44.
- [28] Guo L, Yu J. Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam. *International Journal of Impact Engineering*. 2011;38:85-94.
- [29] Li Z, Yu J, Guo L. Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012;54:48-56.
- [30] Djamaluddin F, Abdullah S, Ariffin AK, Nopiah ZM. Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions. *Thin-Walled Structures*. 2015;87:1-11.
- [31] Djamaluddin F, Abdullah S, Ariffin AK, Nopiah ZM. Multi objective optimization of foam-filled tubular circular tubes for quasi-static and dynamic responses. *Latin American Journal of Solids and Structures, an ABCM Journal*. 2014;12.
- [32] Djamaluddin F, Abdullah S, Arrifin AK, Nopiah ZM. Multi-Objective optimization of aluminum foam double tube subjected to oblique impact loading for automobile bumper beam. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;663:93-7.
- [33] Djamaluddin F, Abdullah S, Ariffin A.K, Nopiah Z.M. Finite Element Analysis and Crashworthiness Optimization of Foam-filled Double Circular under Oblique Loading. *Latin American Journal of Solids and Structures, an ABCM Journal*. 2015;12.