

Analisis Kapasitas Penyerapan Energi Crash Box dengan Variasi Geometri Penampang dan Jumlah Silinder Menggunakan Metode Elemen Hingga

Musthafa Akbar¹, Idznur Rizky², Eky Putrawani³, Dedi Rosa Putra Cupu⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau
JL. H.R. Subrantas, Pekanbaru, Riau
e-mail: ¹akbarmust@eng.unri.ac.id

Abstrak

Penerapan desain kendaraan dengan memperhatikan aspek crashworthiness merupakan hal yang harus dilakukan untuk menjamin faktor keamanan pengguna. Salah satu komponen yang berfungsi sebagai penyerap energi dampak di kendaraan adalah crash box. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui konstruksi geometri penampang crash box yang paling optimal dalam menyerap energi dampak tabrakan kendaraan. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga explicit dynamic yang divalidasi dengan data eksperimen. Model yang dianalisis berupa single-walled, double-walled, dan triple-walled thin cylinder untuk setiap penampang berbentuk circular, square, dan rectangle. Berdasarkan hasil simulasi elemen hingga, ditemukan bahwa crash box dengan penampang circular memiliki kapasitas penyerapan energi dampak yang paling besar. Hasil analisis disimpulkan bahwa secara umum terjadi peningkatan kapasitas penyerapan energi dengan penambahan jumlah dinding cylinder. Akan tetapi, ditemukan munculnya fenomena euler-buckling pada penampang square dan rectangle sehingga tidak layak diaplikasikan sebagai struktur crash box.

Kata kunci: crash box, energi dampak, explicit dynamic, crashworthiness, finite element

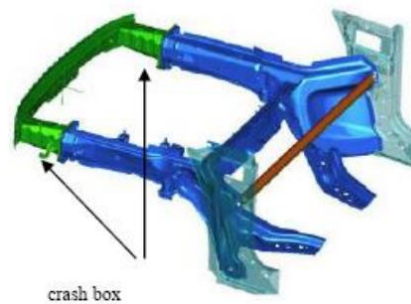
Abstract

The application of crashworthiness in vehicle design is a standard that must be complied to ensure safety of passengers. Crash box is one of safety equipment in the vehicle which its main function is as impact energy absorber. This research was conducted in order to determine the most optimum design of crash box based on variation of its cross section geometries. An explicit dynamic module in finite element method was used as the tool for analyses which the results were validated with experimental data. Analyses were conducted for crash box with single-walled, double-walled, and triple-walled for each circular, square, and rectangle cross section. Based on results of the analysis it was found that circular crash box has maximum energy absorption capabilities rather than other cross section. Generally, using multi-walled thin cylinder as crash box can improve energy absorption capabilities with some limitations. It was found that euler-buckling phenomena will appear for multi-walled square and rectangle crash box. It can be concluded that multi-walled crash box with both cross section are not recommended to be applied as energy absorber in the vehicle.

Keywords: crash box, impact energy, explicit dynamic, crashworthiness, finite element

1. Pendahuluan

Pada kendaraan penumpang, khususnya mobil, crashbox digunakan sebagai bagian utama kendaraan yang akan menerima dan menyerap beban dampak pertama sekali sebelum mengenai struktur utama kendaraan dan tubuh penumpang. Crashbox didesain untuk sebesar mungkin menyerap energi dampak dan pada saat yang sama mengurangi energi dampak yang diteruskan ke penumpang. Penyerapan energi yang tinggi pada crashbox diharapkan dapat mengurangi tingginya perlambatan yang diterima oleh penumpang dan pada saat yang sama dapat menjaga ketersediaan ruang yang cukup pada kabin penumpang saat terjadi tabrakan. Crashbox dipasang pada bagian depan kendaraan yaitu pada posisi horizontal di belakang bumper (Gambar 1). Berdasarkan riset, tabrakan arah frontal memiliki persentase kejadian paling banyak dibandingkan tabrakan arah lainnya [1]. Tabrakan arah frontal bisa terjadi tepat pada bagian tengah kendaraan ataupun dengan persentase offset tertentu terhadap bagian tengah depan dari kendaraan.



Gambar 1. Posisi Pemasangan Crashbox Pada Frame Kendaraan [2]

Konstruksi dari *crashbox* umumnya terbuat dari struktur ber dinding tipis berbentuk *prismatic* dikarenakan kemampuannya yang baik dalam penyerapan energy serta memiliki rasio kekuatan terhadap massa yang tinggi. Dalam desain *crash box*, faktor material dan dimensi menjadi *variable* yang penting karena disamping pada satu sisi diinginkan energi yang diserap besar, disisi lain kendaraan membutuhkan massa struktur se-ringan mungkin untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar. Dalam menyerap energi impact, *crashbox* diharapkan bisa berdeformasi dengan pola yang teratur (*sequentially*) atau tidak acak [3]. Sebagian besar komponen kendaraan dibuat menggunakan struktur ber dinding tipis, dengan tujuan untuk mengurangi bobot kendaraan serta efisiensi dalam penggunaan bahan bakar. Material *crashbox* umumnya terbuat dari bahan baja, aluminium dan komposit. Penggunaan bahan baja dan aluminium sudah sangat umum digunakan saat ini sedangkan penggunaan bahan komposit masih dalam tahap penelitian dan pengembangan [3].

Beberapa penelitian yang membahas mengenai perilaku impact *crashbox* diantaranya yang dilakukan oleh F.Ince dkk. [4]. Pada penelitiannya dilakukan analisis numerik dan eksperimen pada *crashbox* jenis bujur sangkar (*square*) yang terbuat dari material baja dan aluminium. Metode eksperimen dilakukan dengan *drop test* sedangkan secara numerik dengan menggunakan metode elemen hingga. Hasil kedua metode tersebut kemudian diperbandingkan dan menunjukkan hasil yang mendekati. Dalam rangka meningkatkan kapasitas penyerapan energy, modifikasi desain *crashbox* dilakukan dengan menambahkan konfigurasi pemicu pada struktur. Pemicu dibutuhkan untuk mendapatkan gaya yang diinginkan, energy dan pola deformasi pada *crash box*. Pada penelitian Nasir Husain dkk. [3], pengaruh dari konfigurasi pemicu terhadap pencapaian nilai peak force, energy absorber dan SEA ditinjau pada material komposit GFRP yang memiliki rasio berat terhadap kekuatan yang rendah. Model lain dari modifikasi desain *crash box* yang dilakukan adalah dengan penambahan ribs. Penelitian yang dilakukan oleh Adachi, dkk [5] melihat pengaruh penambahan *rib* pada silinder yang dikenai beban impact arah aksial.

Crashbox didesain sebagian besar menggunakan thin-walled member karena efisiensinya yang tinggi dalam penyerapan energy, massa yang ringan, murah, kemudahan untuk dimanufaktur serta kestabilannya ketika menerima beban impact. Secara umum desain yang banyak digunakan adalah tipe *circular*, *square/rectangular* dan *hat section*. Terdapat dua model kegagalan tabung *circular* ketika diberikan pembebanan pada arah aksial yaitu *axisymmetrically* maupun *non-symmetrically*. Mode kegagalan yang terjadi tergantung terutama dari rasio D/h dan L/h. Bentuk kegagalan *axisymmetrically* biasa disebut sebagai *mode ring* atau *concertina*, sedangkan bentuk *non-symmetrically* disebut sebagai *mode diamond*. Pada kasus-kasus dengan dimensi D/h tertentu, terjadi perubahan dari *mode ring* menjadi *mode diamond* yang disebut *mixed mode*. Berdasarkan referensi disebutkan bahwa *mode diamond* terjadi jika D/h besar dari 80, sedangkan *mode ring/concertina* terjadi jika D/h kecil dari 50 dan L/h juga kecil dari 2. Selanjtnya jika L/h lebih besar dari 2 maka akan terbentuk *mode mixed* dan jika digunakan tabung yang lebih panjang lagi akan terbentuk *euler-type buckling*.

Terdapat beberapa peneliti yang mencoba membuat model teoritis dari kasus *circular tube* yang dibebani secara aksial. Untuk kasus *axisymmetric collapse*, Alexander [6] adalah yang pertama kali membuat model teoritis dari *cylindrical shell* yang dikenai beban aksial. Berbeda dengan *axisymmetric collapse*, untuk kasus *non-symmetric mode* penurunan persamaan teoritis tidak terlalu berhasil walaupun ada beberapa peneliti yang memberikan persamaan teoritis untuk kasus ini [7]–[9]. Penelitian mengenai karakteristik deformasi dari thin

walled tube dengan geometri circular dan square antara lain dilakukan oleh Hsu dan Jones [10] pada tahun 2002 yang berhasil mendapatkan formula empiris dari eksperimen yang dilakukan.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model *crashbox* yang paling optimal dalam penggunaannya sebagai penyerap energi dampak tabrakan kendaraan. Diharapkan didapatkan pilihan model geometri penampang serta jumlah dinding silinder yang bisa digunakan sebagai *crashbox* pada kendaraan yang menerima beban dampak pada arah frontal.

2. Metode Penelitian

Analisis dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga untuk mendapatkan parameter dimensional maupun non-dimensional yang dapat digunakan dalam penilaian performa *crashbox*. Penelitian ini akan meninjau *crashbox* dengan jenis penampang *square*, *circular*, maupun *rectangular* dengan memberikan variasi jumlah silinder (*tube*) mulai dari *single*, *double*, hingga *triple*. Terdapat 9 variasi *crashbox* yang dimodelkan dengan beberapa variabel terikat dan variabel bebas. Variabel terikat dalam analisis ini adalah material, dimensi panjang, serta keliling total *crashbox*. Dengan menerapkan panjang serta keliling yang sama, maka akan didapatkan model *crashbox* dengan luas penampang, volume, serta massa yang relatif sama untuk *crashbox* dengan jumlah silinder yang sama. Hal ini penting dilakukan untuk menjamin validitas metode perbandingan antar *crashbox*. Variasi dimensi *crashbox* yang akan dianalisis dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Variable Desain *Crash Box* Dengan Variasi Geometri Penampang dan Jumlah *Tube*

Profil Penampang	Jumlah Tube	Nama Spesimen	Panjang (mm)	Tebal (mm)	Dimensi Utama (mm)	Keliling 1 tube (mm)	Luas Penampang Total (mm ²)	Volume (mm ³)	Massa (kg)
Square	1	S1_160	250	1	sisi x sisi	160	156	39000	0.30615
Square	2	S1_296	250	1	sisi x sisi	288	288	72000	0.5652
Square	3	S3_408	250	1	sisi x sisi	396	396	99000	0.77715
Circular	1	C1_160	250	1	sisi x sisi	156.86	156.86	39214.50	0.3078
Circular	2	C2_296	250	1	sisi x sisi	289.71	289.71	72427.50	0.5686
Circular	3	C2_408	250	1	sisi x sisi	398.57	398.57	99642.50	0.7822
Rectangle	1	R1_160	250	1	sisi x sisi	160	156	39000	0.30615
Rectangle	2	R2_296	250	1	sisi x sisi	288	288	72000	0.5652
Rectangle	3	R3_408	250	1	sisi x sisi	396	396	99000	0.77715

Material yang digunakan untuk *crashbox* yang akan dianalisis adalah *Mild Steel A36* dengan sifat mekanik yang didapatkan dari eksperimen [11]. Karakteristik model material untuk uji dampak menggunakan persamaan constitutive Johnson-Cook dengan isotropic hardening model [11,12]. Sifat mekanik material *Mild Steel A36* ditunjukkan pada Tabel 2. Analisis elemen hingga *explicit dynamic* dilakukan dengan mengasumsikan material *rigid* pada *impactor* dan *base plate*. Hal ini dilakukan untuk mempersingkat waktu komputasi. *Impactor* dimodelkan dengan massa 257 kg serta jatuh ke *crashbox* dengan kecepatan 56 km/jam. Nilai massa dan kecepatan dalam analisis ini disesuaikan dengan standar pengujian New Car Assessment Program (NCAP) oleh the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [13].

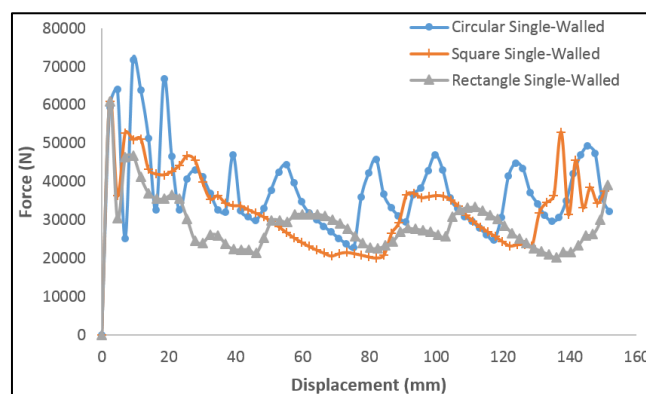
Tabel 2. Sifat Mekanik *Mild Steel A36* menggunakan Model Johnson-Cook [12]

Parameter	Nilai	Deskripsi
A	146.7 MPa	Material parameter
B	896.9 MPa	Material parameter
N	0.320	Strain power coefficient
C	0.033	Material parameter
M	0.323	Temperature power coefficient
$\dot{\epsilon}$	$1.0s^{-1}$	Reference strain rate
ρ	7850 kg/m ³	Density
T _m	1773 K	Melting temperature
C _p	486 J/kg.K	Specific heat

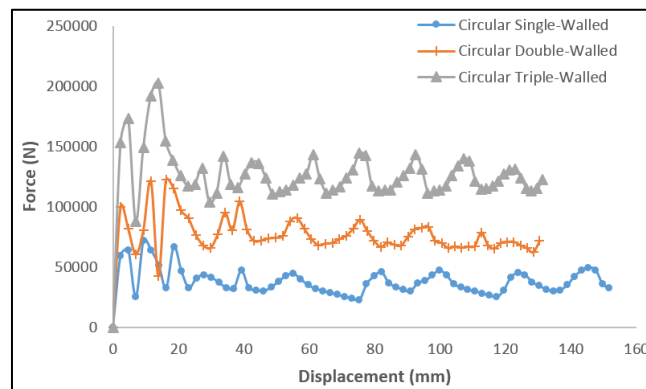
3. Hasil dan Pembahasan

Parameter *output* yang ditinjau dalam perancangan dan analisis *crash box* adalah berupa kurva *Force-Displacement* yang terjadi pada saat energi impact mengenai struktur hingga keseluruhan material habis terdeformasi. Kurva *force-displacement* kemudian bisa diturunkan untuk mendapatkan nilai yang berkaitan dengan performa *crashworthiness* pada *crash box*. Parameter tersebut antara lain *Energy Absorption* (EA), *Specific Energy Absorption* (SEA), *Peak Crushing Force* (PCF), *Mean Crushing Force* (MCF), dan pola deformasi yang terbentuk.

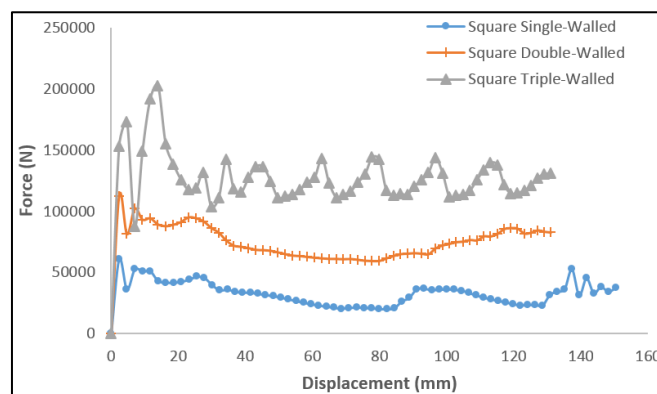
Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil berupa kurva *Force-Displacement* untuk masing-masing variasi geometri penampang *crash box*. Hasil simulasi elemen hingga untuk model dengan penampang yang berbeda ditampilkan pada Gambar 2, sedangkan untuk penampang yang sama tapi dengan jumlah *tube* yang berbeda ditampilkan pada Gambar 3 hingga Gambar 5.



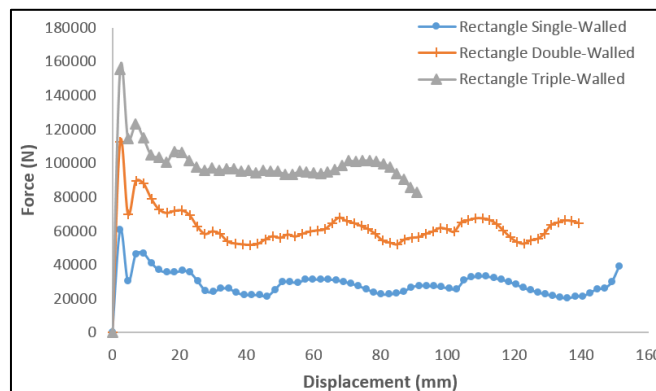
Gambar 2. Kurva *Force-Displacement* untuk Variasi Penampang *Crashbox*



Gambar 3. Kurva *Force-Displacement* untuk *Circular Crashbox* Dengan Variasi Jumlah *Tube*



Gambar 4. Kurva *Force-Displacement* untuk *Square Crashbox* Dengan Variasi Jumlah *Tube*



Gambar 5. Kurva *Force-Displacement* untuk *Rectangular Crashbox* Dengan Variasi Jumlah *Tube*

Kurva *Force-Displacement* yang dihasilkan dari 9 model elemen hingga diatas kemudian diolah untuk mendapatkan parameter *crashworthiness crashbox*. Parameter tersebut berupa *Energy Absorption (EA)*, *Mean Crushing Force (MCF)*, *Peak Crushing Force (PCF)*, *Crushing Force Efficiency (CFE)*, *Specific Energy Absorption (SEA)* dan *Stroke Efficiency (SE)* yang ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter *Crashworthiness* Dari *Crashbox* yang dihasilkan dari Analisis Elemen Hingga

No	Crash Box Spec.	EA (kJ)	MCF (kJ)	PCF (kJ)	CFE	SEA (kJ/kg)	SE (%)
1	Circular, Single-Walled	5.56	37.42	71.73	0.52	18.07	39.30
2	Circular, DoubleWalled	9.70	75.82	122.28	0.62	17.07	47.84
3	Circular, Triple-Walled	16.14	125.12	202.53	0.61	20.64	47.49
4	Square, Single-Walled	4.74	34.14	60.89	0.56	15.49	39.86
5	Square, Double-Walled	9.45	74.10	112.51	0.65	16.71	47.60
6	Square, Triple-Walled	18.60	127.89	175.57	0.72	23.94	39.91
7	Rectangle Single-Walled	4.15	28.49	60.83	0.46	13.56	39.50
8	Rectangle, Double-Walled	8.32	61.63	112.64	0.54	14.73	44.34
9	Rectangle, Triple-Walled	8.56	97.55	155.37	0.62	11.01	63.63

4. Kesimpulan

Berdasarkan data yang diperoleh dari analisis elemen hingga dapat disimpulkan beberapa fenomena pada uji *crashworthiness crashbox* dengan variasi penampang dan jumlah dinding silinder sebagai berikut:

- Crashbox* berpenampang *circular* memiliki kapasitas penyerapan energi yang lebih besar dibandingkan penampang *square* dan *rectangular*. Hal ini juga berlaku secara umum ketika penampang *circular* digunakan pada *crashbox* dengan *double-walled* maupun *triple walled*.
- Penggunaan *double* dan *triple walled* secara umum dapat meningkatkan penyerapan energi impact, kecuali pada model *rectangular* model dengan *multi-walled* ini tidak disarankan.
- Dari 9 model yang dianalisis disimpulkan bahwa model *square crashbox* dengan *triple-walled* adalah yang paling optimal dengan nilai CFE,EA dan MCF terbesar akan tetapi tetap dengan rasio terhadap berat (SEA) terbaik.

Daftar Pustaka

- [1] Kokkula, S., Langseth, M., Hopperstad, O. S., & Lademo, O. G. (2006). Offset impact behaviour of bumper beam—longitudinal systems: experimental investigations. *International Journal of Crashworthiness*, 11(4), 299-316.
- [2] Liu, Y., Ding, L., Yan, S., & Yang, Y. (2009, August). Computer simulations and experimental study on crash box of automobile in low speed collision. In *ICEM 2008: International Conference on Experimental Mechanics 2008* (Vol. 7375, p. 737562). International Society for Optics and Photonics.
- [3] Hussain, N. N., Regalla, S. P., & Rao, Y. V. D. (2017). Comparative study of trigger configuration for enhancement of crashworthiness of automobile crash box subjected to axial impact loading. *Procedia Engineering*, 173, 1390-1398.
- [4] Ince, F., Türkmen, H. S., Mecitoğlu, Z., Uludağ, N., Durgun, I., Altınok, E., & Örenel, H. (2011). A numerical and experimental study on the impact behavior of box structures. *Procedia Engineering*, 10, 1736-1741.
- [5] Adachi, T., Tomiyama, A., Araki, W., & Yamaji, A. (2008). Energy absorption of a thin-walled cylinder with ribs subjected to axial impact. *International journal of impact engineering*, 35(2), 65-79.
- [6] J. M. Alexander, "An Approximate Analysis Of The Collapse Of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading," *Q. J. Mech. Appl. Math.*, vol. 13, no. 1, pp. 10–15, Jan. 1960, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1093/qjmam/13.1.10>.
- [7] Johnson, W., Soden, P. D., & Al-Hassani, S. T. S. (1977). Inextensional collapse of thin-walled tubes under axial compression. *The Journal of strain analysis for engineering design*, 12(4), 317-330..
- [8] Singace, A. A. (1999). Axial crushing analysis of tubes deforming in the multi-lobe mode. *International Journal of Mechanical Sciences*, 41(7), 865-890.
- [9] A. Pugsley, "The Large-Scale Crumpling Of Thin Cylindrical Columns," *Q. J. Mech. Appl. Math.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, Jan. 1960, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1093/qjmam/13.1.1>.
- [10] Hsu, S. S., & Jones, N. (2002). Quasi-static and dynamic axial crushing of circular and square stainless steel tubes. *WIT Transactions on The Built Environment*, 63..
- [11] Lacy, J. M. (2010). *Optimization-based constitutive parameter identification from Sparse Taylor cylinder data* (No. INL/CON-10-19255). Idaho National Laboratory (INL).
- [12] Tarlochan, F., Samer, F., Hamouda, A. M. S., Ramesh, S., & Khalid, K. (2013). Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Thin-Walled Structures*, 71, 7-17.
- [13] Witteman, W. (1999). Improved vehicle crashworthiness design by control of the energy absorption for different collision situations. *Ph. D. Thesis, University of Technology, Automotive Engineering and Product Design Technology, Eindhoven, The Netherlands*.