

# PENGEMBANGAN DESAIN CIRCULAR DAN SQUARE CRASHBOX DENGAN PENAMBAHAN HONEYCOMB SEBAGAI FILLER PADA MODEL BEBAN FRONTAL DAN OBLIQUE

Bayu Agung Wicaksono <sup>1)</sup> ✉, Moch. Agus Choiron <sup>1)</sup>, Anindito Purnowidodo <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Mesin  
Universitas Brawijaya  
bayuagung.cak@gmail.com  
agus\_choiron@ub.ac.id  
anindito@ub.ac.id

## Abstract

*In the previous study, several researchers had developed circular and square crash box designs to enhance energy absorption. In this study, circular and square honeycomb filled crash box is investigated by varying the honeycomb cell dimension. Honeycomb filled is selected due to lightweight and high strength to weight ratio. The crash box modelling was carried out using the finite element method with a frontal and oblique load model. Honeycomb cell dimensions vary by using five models, which are 0%, 25%, 50%, 75% and 100%. This ratio compares the size of honeycomb pitch cell with the inner diameter of crash box. The inner diameter and the crash box thickness are 40 mm and 2 mm, respectively. The single cell wall and the double wall honeycomb thickness are 0,5 mm and 1 mm, respectively. The load model used is an impactor mass of 600 kg with a speed of 15 m/s. For oblique load model, the angle for the load is 300. In this study, energy absorption, deformation pattern and efficiency of the collision force (CFE) were observed, based on the results of computer simulations. The results show that square model with 25% honeycomb filled ratio (S25) has the highest energy absorption, both on frontal and oblique loading. Otherwise, the circle model with 25% honeycomb filled ratio (C25) has the highest CFE value for frontal loading, and S50 has the highest CFE value for oblique loading. The high CFE value is due to the reaction-displacement curve, which is quite stable. The deformation pattern on S25 model due to frontal load model is a diamond mode with five folds. This pattern shows a higher number fold than other square models. Whereas, on oblique load model, the S25 model generates a greater number of folding due to the number of honeycomb cells.*

**Keywords:** Circular Crash Box, Square Crash Box, Honeycomb Filled, Deformation Pattern, Energy Absorption.

## 1. PENDAHULUAN

*Crashbox* adalah salah satu sistem keamanan pasif dalam kendaraan, khususnya kendaraan roda empat, yang mampu menyerap energi ketika kendaraan mengalami kecelakaan. Beberapa peneliti telah mengembangkan *crashbox* untuk memperbaiki kemampuan penyerapan energi, CFE, mean crush force dan poin-poin penting lain yang masuk dalam kriteria *crashworthiness*. Untuk meningkatkan kemampuan *crashbox*, terdapat 2 cara, yaitu dengan modifikasi struktur (seperti *multi-cell/nested tube*, *fillings*, *functionally graded thickness*, dan lain sebagainya) dan penambahan mekanisme *trigger* (seperti *corrugated*

Corresponding Author:  
✉ Bayu Agung Wicaksono  
Received on: 2022-07-06  
Revised on: 2022-07-11  
Accepted on: 2022-07-12

*tube, crashbox with hole trigger*, dan lain sebagainya) <sup>[1]</sup>. Sebelum dikembangkan, beberapa peneliti meng-investigasi bentuk dinding luar *crashbox* terhadap kemampuan penyerapan energinya. Hasilnya menunjukkan bahwa geometri luar berbentuk lingkaran, heksagonal dan persegi memiliki kemampuan penyerapan energi yang unggul dibandingkan bentuk lainnya, seperti persegi panjang, segitiga, *pyramidal* dan *frusta* <sup>[2]</sup>.

Pada penelitian ini, pemilihan *honeycomb* disebabkan karena keunggulannya. *Honeycomb* memiliki berat yang ringan dan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi <sup>[3-4]</sup>. Lebih lanjut, beberapa peneliti juga telah melakukan penelitian tentang *honeycomb filled crashbox*. Hasilnya menunjukkan bahwa *honeycomb filled crashbox* mampu meningkatkan kemampuan penyerapan energi, baik pada model beban frontal ataupun oblique <sup>[3-4]</sup>. Selain itu, penelitian tentang modifikasi parameter pada *honeycomb* juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Adapun parameter yang di-modifikasi adalah ukuran sel dan ketebalan sel *honeycomb*. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran sel *honeycomb*, kemampuan penyerapan energi semakin tinggi <sup>[5]</sup>. Lebih lanjut, dengan model beban frontal, semakin besar ukuran sel *honeycomb*, maka terjadi penurunan terhadap *mean crushing force* dan *peak force* <sup>[6]</sup>.

Pemilihan model beban frontal disebabkan karena kondisi riil yang menunjukkan bahwa lebih dari 50% kecelakaan kendaraan terjadi secara frontal <sup>[7]</sup>. Sedangkan, pemilihan model beban oblique disebabkan karena terjadi penurunan kemampuan penyerapan energi pada *crashbox* hingga 80% jika dibandingkan dengan pembebanan frontal <sup>[8]</sup>.

Dari penjelasan di atas menunjukkan bahwa beberapa peneliti telah mengembangkan *crashbox* untuk meningkatkan kemampuan penyerapan energinya. Namun, penelitian yang mengkombinasikan variasi sel *honeycomb* dengan *crashbox* dengan dinding luar lingkaran dan persegi, masih belum banyak dilakukan, sehingga penelitian ini dilakukan. Penelitian ini menitik-beratkan pada kemampuan penyerapan energi dan nilai CFE pada *honeycomb filled crashbox*. *Honeycomb* tersebut nantinya divariasikan, sehingga menghasilkan lima model pada masing-masing geometri dinding luar. Adapun rasio yang dihasilkan yaitu 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%.

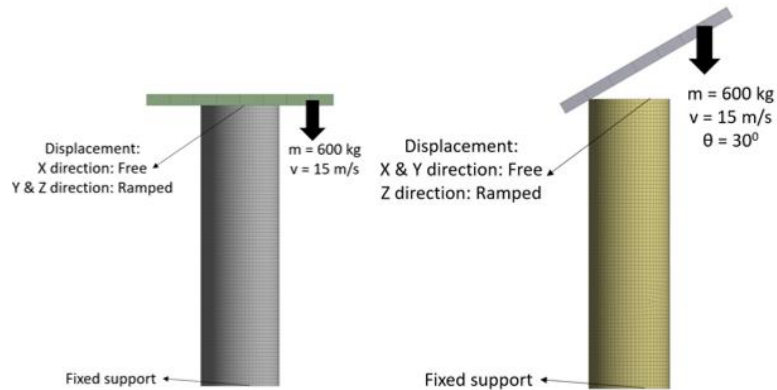
## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan simulasi komputer dengan bantuan *software* ANSYS 18.1. Adapun material yang digunakan untuk *crashbox* pada penelitian ini adalah AA6061. Material AA6061 dipilih karena memiliki ketangguhan dan *modulus resilien* yang tinggi dibandingkan material AA6060 dan AA6063. Selain itu, pemilihan material AA6061 juga karena ketahanan terhadap korosi yang cukup baik. Di ANSYS, material AA6061 dimodelkan dengan *bilinear isotropic hardening*. Tabel 1 menunjukkan sifat mekanik dari material AA6061.

**Tabel 1.** Sifat mekanik AA6061 <sup>[9-10]</sup>

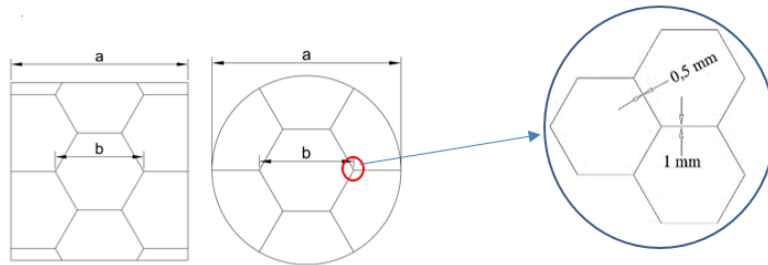
Densitas	2700	kg/m <sup>3</sup>
Modulus elastisitas	68,9	GPa
Poisson's ratio	0,33	
<i>Yield strength</i>	276	MPa
<i>Tangent modulus</i>	562	MPa
<i>Ultimate tensile strength</i>	319	MPa

Pada penelitian, impaktor memiliki massa sebesar 600 kg dengan kecepatan 15 m/s dan dimodelkan *rigid*. Sudut beban pada model pembebanan *oblique* adalah 300. Lebih lanjut, gambar 1 menunjukkan pemodelan pembebanan pada penelitian ini.



**Gambar 1.** Pemodelan pembebanan frontal dan *oblique* beserta kondisi batasnya

*Crashbox* yang digunakan, dinding luarnya berbentuk lingkaran dan persegi. Nantinya, *honeycomb* akan ditambahkan sebagai struktur pengisi pada *crashbox* tersebut. Ukuran *honeycomb* akan divariasikan sehingga menghasilkan rasio 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%. Rasio tersebut membandingkan antara *cell pitch honeycomb* beserta diameter dalam dinding luar *crashbox*. Gambar 2 menunjukkan lokasi perbandingan tersebut.


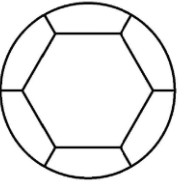
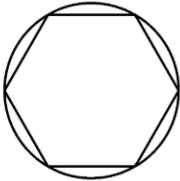
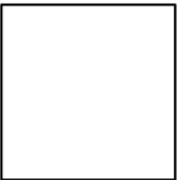
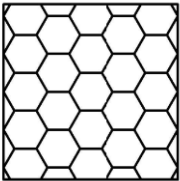
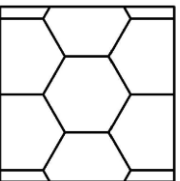
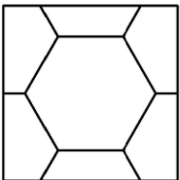
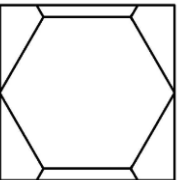


**Gambar 2.** Ukuran yang dijadikan acuan sebagai pembanding (a: diameter dalam dinding luar; *cell pitch honeycomb*) beserta ketebalan *honeycomb* yang digunakan.

Pada penelitian ini, *crashbox* memiliki panjang 150 mm dengan ketebalan dinding luar 2 mm. Sedangkan, ketebalan sel tunggal (*single cell*) dan sel ganda (*double cell*) *honeycomb*, masing-masing 0,5 mm dan 1 mm, seperti ditunjukkan pada gambar 2. Lebih lanjut, tabel 2 menunjukkan ukuran *cell pitch* beserta pengkodean model *crashbox*.

**Tabel 2.** Kodefikasi model *crashbox* beserta detail ukuran *cell pitch honeycomb* dan rasionya

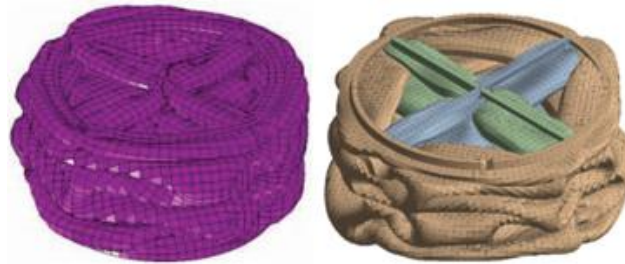
Kode	Gambar	Ukuran a (mm)	Ukuran b (mm)	Rasio b/a
C0		40	0	0%
C25		40	10	25%

Kode	Gambar	Ukuran a (mm)	Ukuran b (mm)	Rasio b/a
C50		40	20	50%
C75		40	30	75%
C100		40	40	100%
S0		40	0	0%
S25		40	10	25%
S50		40	20	50%
S75		40	30	75%
S100		40	40	100%

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Verifikasi penelitian

Untuk memastikan validitas hasil penelitian, perlu dilakukan verifikasi penelitian dengan penelitian sebelumnya untuk memastikan hasil yang didapatkan tidak jauh berbeda dengan penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini, verifikasi penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Pirmohammad pada tahun 2021<sup>[11]</sup> dengan model yang dibuat oleh Pirmohammad. Hasilnya menunjukkan bahwa besarnya perbedaan antara penelitian Pirmohammad dengan hasil simulasi pada penelitian ini adalah berkisar antara 4,5% - 4,8%. Pola deformasi yang dihasilkan pada hasil simulasi, hampir sama dengan pola deformasi pada penelitian Pirmohammad. Gambar 3 menunjukkan perbandingan pola deformasi antara penelitian Pirmohammad dengan hasil simulasi saat ini. Lebih lanjut, hasil verifikasi tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi saat ini hampir sama dengan penelitian Pirmohammad karena besarnya penyimpangan yang cukup kecil.



**Gambar 3.** Pola deformasi yang terbentuk pada penelitian Pirmohammad (kiri) dan penelitian saat ini (kanan)

#### 3.2. Kemampuan penyerapan energi

Besarnya kemampuan penyerapan energi, didapatkan dari luas di bawah kurva gaya reaksi-displacement yang didapatkan dari hasil simulasi. Adapun hasil penyerapan energi, pada model pembebanan frontal tercantum pada tabel 3. Sedangkan, untuk model pembebanan *oblique*, tercantum pada tabel 5.

**Tabel 3.** Kemampuan penyerapan energi pada model pembebanan frontal

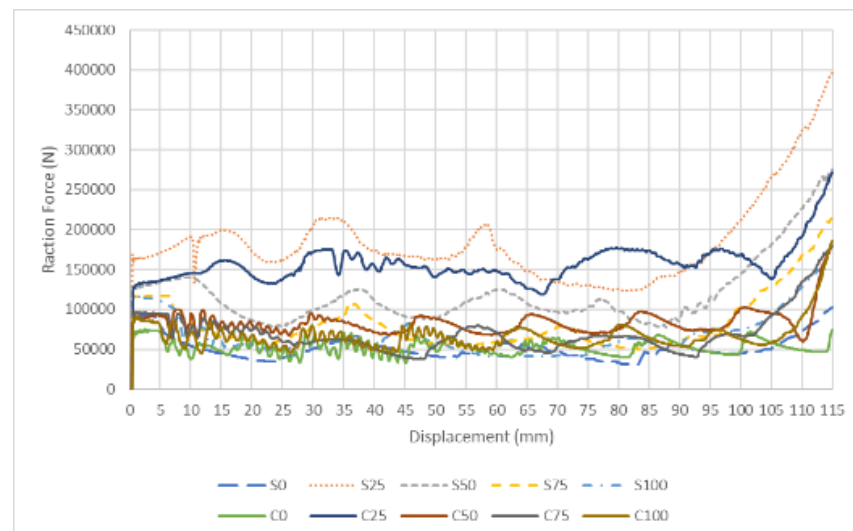
<i>Kode Model Crashbox</i>	<i>Penyerapan Energi (kJ)</i>	<i>Peningkatan Penyerapan Energi Terhadap Rasio 0%</i>
<i>C0</i>	6,04	-
<i>C25</i>	17,98	198%
<i>C50</i>	9,54	58%
<i>C75</i>	7,98	32%
<i>C100</i>	7,63	26%
<i>S0</i>	5,90	-
<i>S25</i>	21,02	256%
<i>S50</i>	13,60	131%
<i>S75</i>	9,30	58%
<i>S100</i>	7,77	32%

Dari tabel 3, nampak bahwa semakin kecil ukuran sel *honeycomb*, kemampuan penyerapan energi juga ikut meningkat. Selain itu, dari tabel 3, juga nampak bahwa pada pembebanan frontal, model S25 memiliki kemampuan penyerapan energi paling tinggi dibandingkan model yang lain, yaitu sebesar 21,02 kJ. Hal tersebut disebabkan karena model S25 memiliki nilai inersia yang paling tinggi dibandingkan model yang lain. Dengan

menggunakan persamaan *buckling*, dengan kondisi support dan nilai modulus elastisitas yang sama, didapatkan bahwa semakin besar nilai inersia sebuah struktur, maka beban yang mampu diterima oleh struktur tersebut juga semakin besar. Lebih lanjut, dengan menggunakan persamaan energi regangan, dengan nilai *displacement* yang sama, didapatkan bahwa semakin besar beban yang mampu diterima oleh sebuah struktur, maka semakin besar pula energi regangannya. Untuk memperjelasnya, tabel 4 menunjukkan besarnya momen inersia dari setiap model, sedangkan gambar 4 menunjukkan kurva gaya reaksi-*displacement* dari tiap model.

**Tabel 4. Momen inersia dari tiap-tiap model**

Kode Model <i>Crashbox</i>	Momen Inersia (mm <sup>4</sup> )
C0	43.215,7
C25	59.436,8
C50	48.096,1
C75	51.496,2
C100	51.080,7
S0	42.693,3
S25	69.841,9
S50	60.322,8
S75	52.746,6
S100	59.455,3



**Gambar 4.** Kurva gaya reaksi-*displacement* dari tiap-tiap model pada model pembebanan frontal

Dari tabel 4 nampak bahwa penurunan ukuran sel honeycomb, tidak serta merta meningkatkan momen inersia. Namun, dari tabel 3 nampak bahwa semakin kecil ukuran sel honeycomb, penyerapan energi semakin meningkat. Untuk meninjau hal tersebut, digunakan persamaan *buckling* untuk *honeycomb* ketika *honeycomb* menerima *simple compression* <sup>[12]</sup>. Persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan 1.

$$P_{cr} = \frac{KE_s \cdot t^3}{(1-\nu_s^2) D} \quad (1)$$

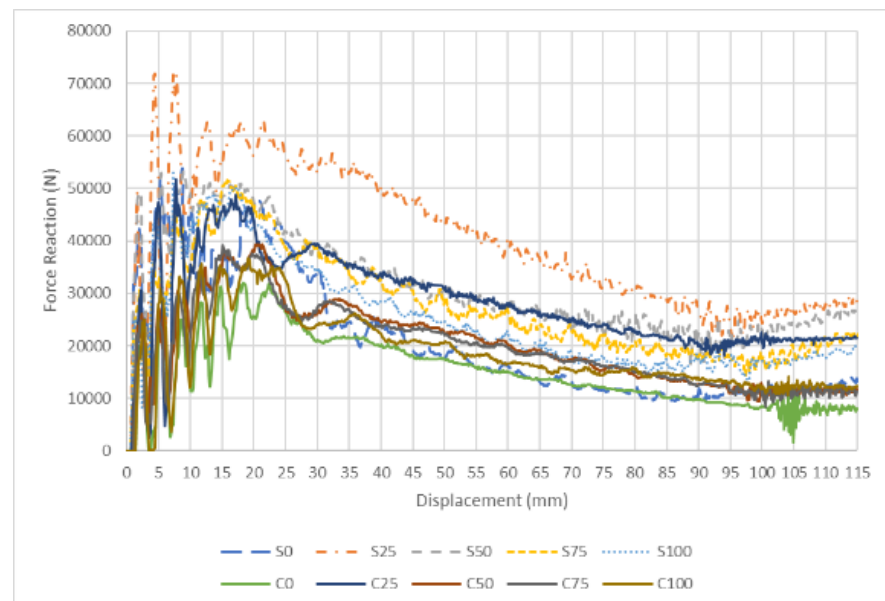
dengan:

- $P_{cr}$  : beban kritis *buckling*  
 $K$  : kondisi *support* pembebanan  
 $E_s$  : modulus elastisitas bahan yang digunakan  
 $\nu_s$  : *poisson's ratio*  
 $t$  : tebal dinding sel tunggal *honeycomb*  
 $D$  : panjang dinding sel *honeycomb*

Dari persamaan 1 nampak bahwa ketebalan sel dan ukuran sel mempengaruhi beban kritis. Hubungan antara ukuran sel dengan beban kritis adalah hubungan berbanding terbalik, sehingga, semakin besar ukuran sel *honeycomb*, maka semakin kecil nilai beban yang mampu diterima oleh struktur *honeycomb* tersebut. Hal tersebut menyebabkan kenaikan kemampuan penyerapan energi ketika ukuran sel *honeycomb* semakin kecil.

**Tabel 5.** Kemampuan penyerapan energi pada model pembebanan *oblique*

Kode Model <i>Crashbox</i>	Penyerapan Energi (kJ)	Peningkatan Penyerapan Energi Terhadap Rasio 0%	Penurunan Penyerapan Energi Terhadap Model Beban Frontal
C0	1,78	-	-71%
C25	3,34	88%	-81%
C50	2,34	32%	-76%
C75	2,28	29%	-71%
C100	2,21	24%	-71%
S0	2,42	-	-59%
S25	4,60	90%	-78%
S50	3,60	49%	-74%
S75	3,16	31%	-66%
S100	2,90	20%	-63%



**Gambar 5.** Kurva gaya reaksi-displacement dari tiap-tiap model pada model pembebanan *oblique*

Nampak pada tabel 5 bahwa peningkatan kemampuan penyerapan energi paling besar ialah model dengan rasio 25%. Lebih lanjut, model S25 merupakan model paling unggul

dalam menyerap energi, yakni sebesar 4,60 kJ. Namun, di sisi lain, akibat terjadi perubahan pola deformasi pada model pembebanan *oblique*, yang semula berupa *axial progressive folding* menjadi *global bending*, terjadi penurunan penyerapan energi yang sangat signifikan. Adapun besarnya penurunan penyerapan energi pada model persegi berkisar antara 59% - 78%, sedangkan pada model lingkaran, penurunan penyerapan energi berkisar antara 71% - 81%. Besar penurunan pada penelitian saat ini, menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan penelitian sebelumnya <sup>[8]</sup>. Lebih lanjut, kurva gaya reaksi *displacement* tiap-tiap model pada model pembebanan *oblique*, ditunjukkan pada gambar 5.

### 3.3. Pola deformasi

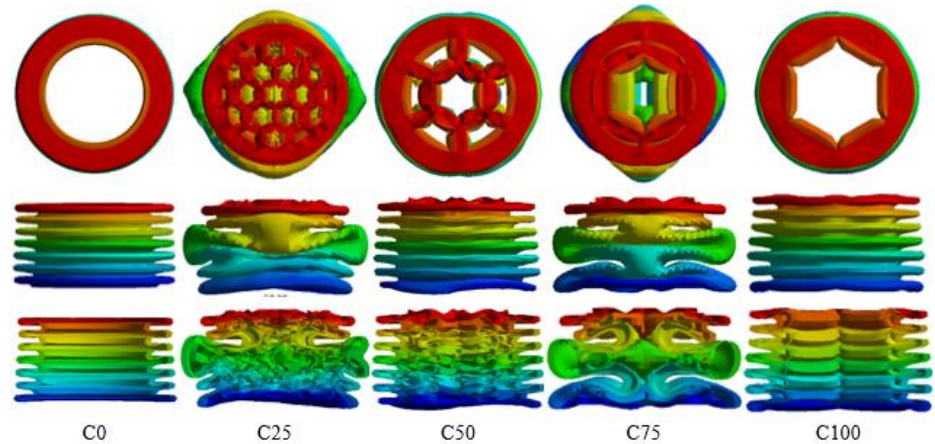
Secara umum, pola deformasi yang terbentuk pada *crashbox* terdiri dari 4 macam bentuk, yaitu pola deformasi simetris (*concertina mode*), pola deformasi non-simetris (*diamond mode*), pola deformasi campuran (*mixed mode*, gabungan deformasi *concertina* dan *diamond*) serta pola deformasi *euler* <sup>[14]</sup>. Adapun pola deformasi yang terbentuk pada tiap-tiap model pada pembebanan frontal, ditunjukkan pada tabel 6.

**Tabel 6.** Pola deformasi dari tiap-tiap model pada model pembebanan frontal

Model Crashbox	Pola Deformasi	Jumlah Lipatan
C0	<i>Concertina</i>	7 lipatan
C25	<i>Mixed mode</i>	4 lipatan <i>Concertina</i> , 2 lipatan <i>Diamond</i>
C50	<i>Concertina</i>	7 lipatan
C75	<i>Mixed mode</i>	3 lipatan <i>Concertina</i> , 3 lipatan <i>Diamond</i>
C100	<i>Concertina</i>	7 lipatan
S0	<i>Concertina</i>	3 lipatan
S25	<i>Diamond</i>	5 lipatan
S50	<i>Concertina</i>	4 lipatan
S75	<i>Diamond</i>	4 lipatan
S100	<i>Diamond</i>	4 lipatan

Pada model lingkaran, pola deformasi didominasi dengan pola deformasi *concertina*, yakni pada model C0, C50 dan C75. Sedangkan pada model C25, pola deformasi yang terjadi sama dengan model C75, namun lipatan didominasi dengan lipatan *concertina*. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran sel *honeycomb*, mampu menghasilkan pola deformasi yang diinginkan, yakni pola deformasi *concertina*. Lebih lanjut, gambar 6 menunjukkan hasil akhir deformasi yang terjadi pada model lingkaran akibat model pembebanan frontal, dengan susunan gambar dari baris atas ke bawah, yakni tampak atas, tampak samping serta potongan melintang *crashbox*.

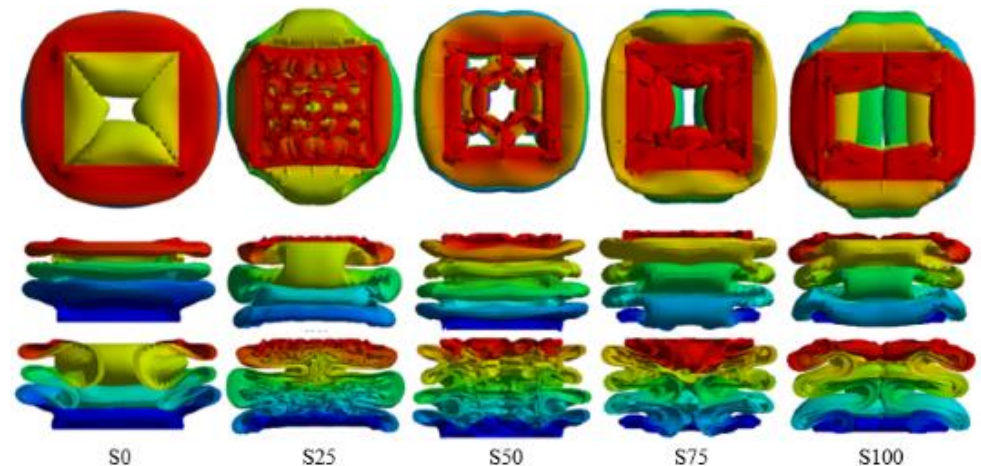




**Gambar 6.** Deformasi akhir model lingkaran akibat model pembebanan frontal; tampak atas (gambar atas), tampak samping (gambar tengah), potongan (gambar bawah)

Pada beberapa penelitian, banyaknya lipatan mempunyai hubungan yang erat terhadap kemampuan penyerapan energi pada *crashbox*. Semakin banyak jumlah lipatan, menunjukkan peningkatan terhadap kemampuan penyerapan energi <sup>[8][15]</sup>. Pada gambar 6, nampak bahwa pada model C25, jumlah lipatan yang terjadi semakin banyak akibat semakin rapatnya sel *honeycomb* di dalam *crashbox*. Hal tersebut menyebabkan peningkatan kemampuan penyerapan energi pada model C25. Lebih lanjut, pada tabel 6, jumlah lipatan yang dijelaskan, hanyalah jumlah lipatan yang nampak dari luar *crashbox*.

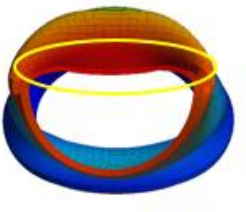
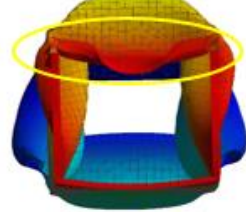
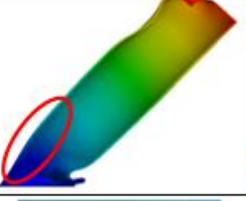
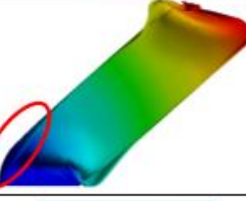


Pada model persegi, seiring dengan mengecilnya ukuran sel *honeycomb*, jumlah lipatan yang nampak dari luar, mengalami peningkatan dibandingkan *unfilled crashbox* (model S0), seperti dijelaskan pada tabel 6. Hal tersebut disebabkan karena ketika akan terbentuk lipatan ke dalam, *honeycomb* menahannya sehingga membentuk lipatan baru. Selain itu, jumlah lipatan yang terjadi pada *honeycomb* sendiri, mengalami peningkatan pada model dengan ukuran sel yang paling kecil. Hal tersebut menyebabkan peningkatan kemampuan penyerapan energi pada *honeycomb filled crashbox*. Lebih lanjut, gambar 7 menunjukkan hasil akhir deformasi yang terjadi pada model persegi akibat model pembebanan frontal, dengan susunan gambar dari baris atas ke bawah, yakni tampak atas, tampak samping serta potongan melintang *crashbox*.



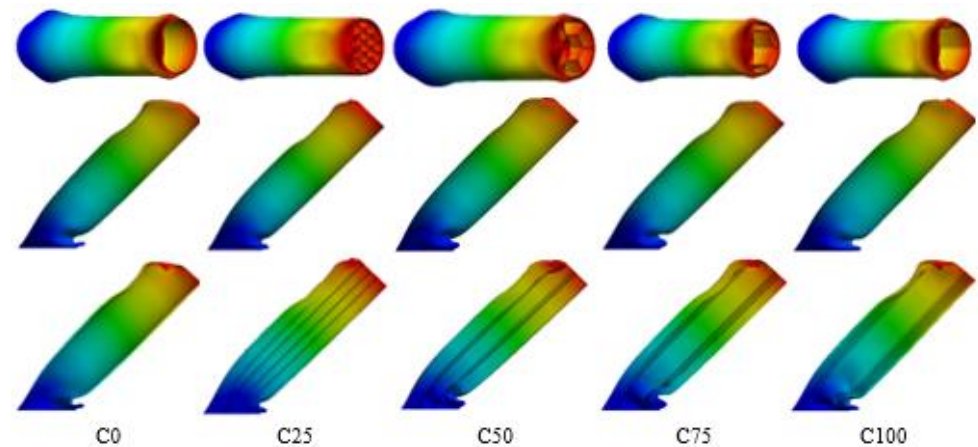
**Gambar 7.** Deformasi akhir model persegi akibat model pembebanan frontal; tampak atas (gambar atas), tampak samping (gambar tengah), potongan (gambar bawah)

Pada model pembebanan *oblique*, secara umum, terdapat 3 bentuk deformasi yang terjadi, yakni *deflection*, *bending* dan *folding* [16]. Tabel 7 menunjukkan 3 bentuk deformasi tersebut yang terjadi pada model C0 dan S0.

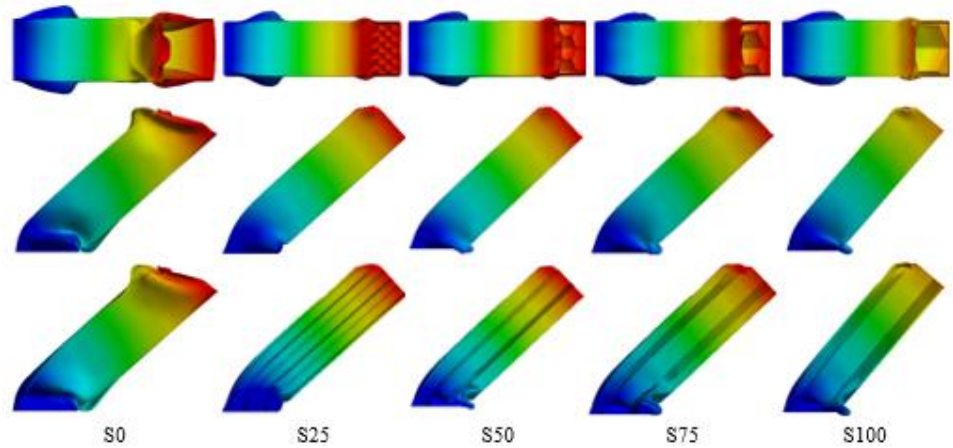
**Tabel 7.** Pola deformasi dari tiap-tiap model pada model pembebanan frontal

Bentuk Deformasi	Model C0	Model S0	Keterangan
<i>Deflection</i> (lingkaran warna kuning)			Gambar tampak atas
<i>Bending</i> (lingkaran warna merah)			Gambar tampak samping
<i>Folding</i> (lingkaran warna jingga)			Gambar tampak depan

Lebih lanjut, pada pembebanan *oblique*, penambahan *honeycomb* menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan. Untuk mengetahui pengaruh penambahan *honeycomb* pada model lingkaran dan persegi dengan model pembebanan *oblique*, gambar 8 dan 9 menunjukkan deformasi akhir dari tiap-tiap model.

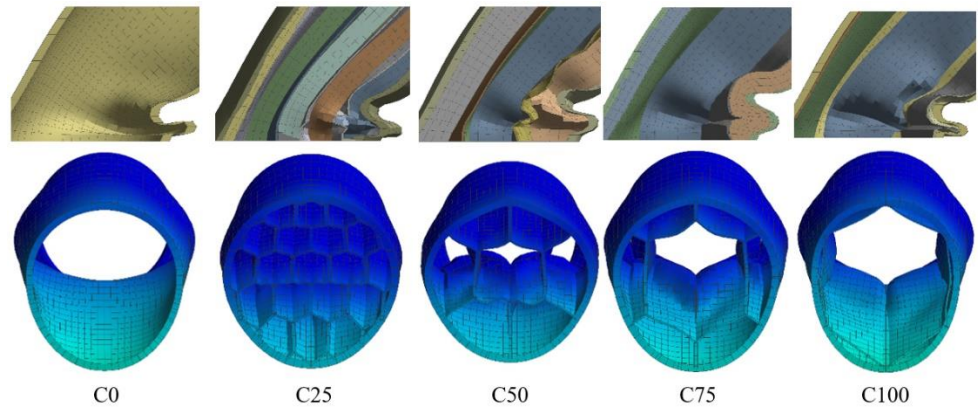


**Gambar 8.** Deformasi akhir model lingkaran akibat model pembebanan *oblique*; tampak atas (gambar atas), tampak samping (gambar tengah), potongan (gambar bawah)

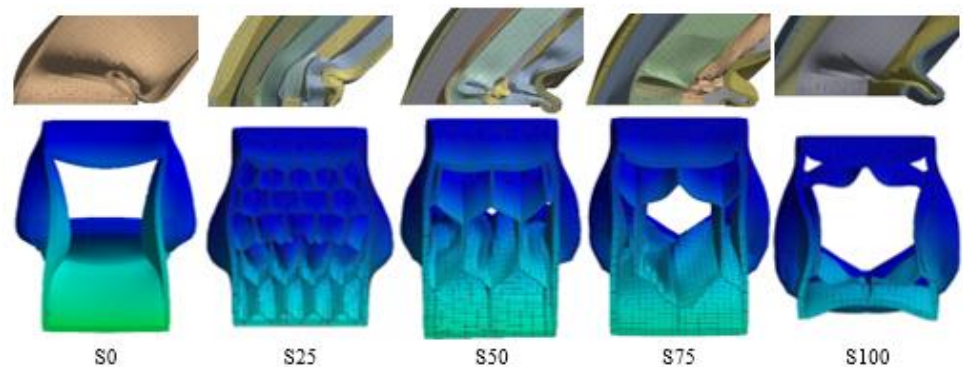


**Gambar 9.** Deformasi akhir model persegi akibat pembebanan oblique; tampak atas (gambar atas), tampak samping (gambar tengah), potongan (gambar bawah)

Dari gambar 8 dan 9, terlihat bahwa semakin kecil rasio *honeycomb filled*, jumlah lipatan yang terbentuk pun semakin banyak, sebagai akibat dari jumlah sel yang terdapat di dalam *crashbox*. Untuk memperjelas lipatan yang terjadi pada daerah deformasi yang terletak di sisi bawah *crashbox* dekat *fixed support*, dilakukan pemotongan gambar di atas daerah deformasi. Gambar 10 dan 11 menunjukkan gambar tersebut.



**Gambar 10.** Lipatan yang terjadi pada lokasi deformasi di sisi dekat dengan *fixed support* pada model lingkaran; potongan tampak samping (gambar atas), potongan dilihat dari atas (gambar bawah)



**Gambar 11.** Lipatan yang terjadi pada lokasi deformasi di sisi dekat dengan *fixed support* pada model persegi; potongan tampak samping (gambar atas), potongan dilihat dari atas (gambar bawah)

Dari gambar 10 dan 11, nampak bahwa jumlah lipatan semakin bertambah pada *honeycomb filled crashbox*, dibandingkan dengan *unfilled crashbox*. Dengan meningkatnya jumlah lipatan, sama seperti pada pola deformasi pada model pembebanan frontal, terjadi peningkatan kemampuan penyerapan energi pada *honeycomb filled crashbox*. Selain itu, kemampuan penyerapan energi juga meningkat akibat proses deformasi pada struktur *honeycomb*. Nampak pada gambar 10 dan 11 pula, struktur *honeycomb* juga ikut terdeformasi sehingga mengalami perubahan bentuk.

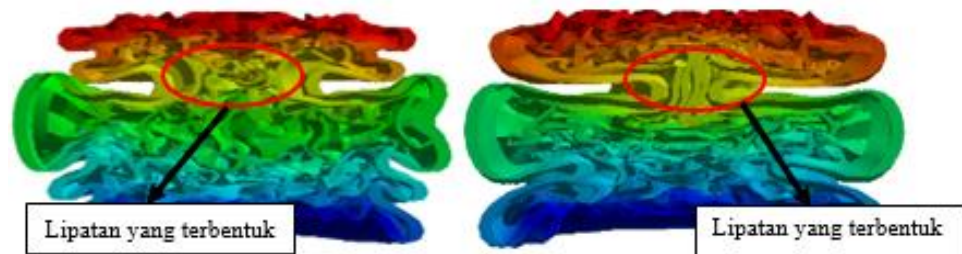
### 3.4. CFE (*crushing force efficiency*)

*Crushing force efficiency* adalah salah satu parameter dalam *crashbox crashworthiness* yang mengindikasikan efisiensi kemampuan penyerapan energi pada *crashbox*. Semakin besar nilai CFE, maka kemampuan *crashbox* dalam menyerap energi semakin baik sehingga probabilitas penumpang selamat semakin besar<sup>[13]</sup>. Nilai CFE didapatkan dari hasil bagi antara nilai *mean crushing force* dengan *peak force*. Nilai *peak force* didapatkan dari kurva gaya reaksi-*displacement*, sedangkan nilai *mean crushing force* didapatkan dari hasil bagi antara besarnya penyerapan energi dengan *displacement*. Besarnya *displacement* umumnya 2/3 dari panjang *crashbox* keseluruhan<sup>[8]</sup>. Pada penelitian ini, besarnya nilai *displacement* adalah 115 mm. Adapun nilai *peak force*, *mean crushing force* dan CFE pada masing-masing model, ditunjukkan pada tabel 8.

**Tabel 8.** Nilai CFE, *peak force* dan *mean crushing force* pada model pembebanan frontal

Kode Model <i>Crashbox</i>	MCF (kN)	F <sub>max</sub> (kN)	CFE
C0	52,51	74,72	70%
C25	156,38	161,14	97%
C50	82,94	99,54	83%
C75	69,35	96,25	72%
C100	66,38	91,34	73%
S0	51,30	93,23	55%
S25	182,80	214,92	85%
S50	118,30	140,04	84%
S75	80,84	117,58	69%
S100	67,57	117,24	58%

Untuk memperbesar nilai CFE, maka nilai MCF diperbesar atau nilai F<sub>max</sub> diperkecil. Dari tabel 8, nampak bahwa nilai CFE model C25 adalah yang paling besar dari model-model yang lain. Hal tersebut disebabkan karena fluktuasi gaya reaksi setelah *peak force*, tidak terlalu besar dan cenderung cukup stabil. Fluktuasi gaya reaksi yang cukup stabil tersebut disebabkan karena lipatan yang lebih banyak dibandingkan dengan model S25. Kestabilan gaya reaksi tersebut ditunjukkan lebih lanjut pada gambar 4, sedangkan untuk memperjelas fenomena tentang lipatan tersebut, gambar 12 menunjukkan hal tersebut. Lebih lanjut, pada penelitian sebelumnya dikemukakan bahwa semakin kecil ukuran sel *honeycomb*, mampu meningkatkan nilai MCF dan *peak force*<sup>[6]</sup>. Nampak dari tabel 8, bahwa nilai MCF dan F<sub>max</sub> pada model dengan rasio 25% adalah paling besar dibandingkan dengan rasio yang lain. Namun, pada model C25, selisih antara nilai MCF dan F<sub>max</sub>-nya tidak terlalu jauh dibandingkan dengan model S25. Hal tersebut disebabkan karena jumlah sel *honeycomb* pada model S25 lebih banyak dibandingkan dengan model C25, sehingga efek peningkatan MCF dan *peak force* lebih terlihat pada model S25.



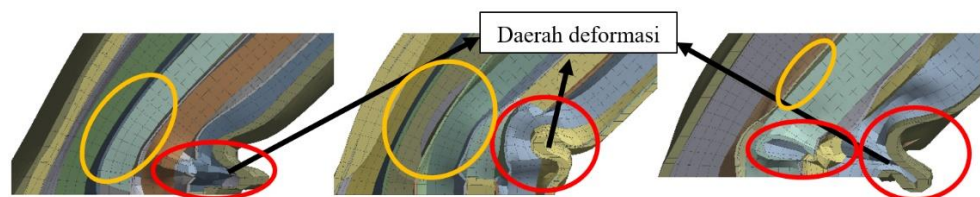
**Gambar 12.** Lipatan yang terbentuk pada struktur *honeycomb* pada model C25 (gambar kiri) dan model S25 (gambar kanan) akibat model beban frontal

Untuk model beban *oblique*, nilai *peak force*, *mean crushing force* dan CFE pada masing-masing model ditunjukkan pada tabel 9.

**Tabel 9.** Nilai CFE, *peak force* dan *mean crushing force* pada model pembebanan *oblique*

Kode Model <i>Crashbox</i>	MCF (kN)	$F_{max}$ (kN)	CFE
C0	15,44	32,03	48%
C25	29,03	51,73	56%
C50	20,31	39,38	52%
C75	19,86	39,19	51%
C100	19,22	36,68	52%
S0	18,67	53,78	39%
S25	19,98	71,89	56%
S50	19,90	53,48	58%
S75	19,19	51,62	53%
S100	17,60	53,01	48%

Dari tabel 9 nampak bahwa model S50 memiliki nilai CFE yang paling tinggi dari model lainnya, yaitu sebesar 58%. Sama seperti penjelasan pada pembebanan frontal, meningkatnya nilai CFE tersebut disebabkan karena gaya reaksi setelah *peak force* cenderung stabil. Hal tersebut nampak pada gambar 10. Tidak sama dengan model pembebanan frontal, pada pembebanan *oblique* nilai CFE pada rasio 25%, bukan nilai yang tertinggi. Hal tersebut disebabkan karena pada model dengan rasio 25% di bagian awal proses pembentukan lipatan (ketika *displacement* 0 – 10 mm), gaya reaksi berfluktuasi secara ekstrim. Lebih lanjut, fluktuasi gaya yang cukup stabil yang terjadi pada model S50 disebabkan karena lipatan yang terbentuk cukup banyak dibandingkan model S25. Pada model S25, lipatan terjadi hanya di daerah deformasi saja, sedangkan pada sel yang lainnya terjadinya bending. Sama seperti model S25, pada model C25, lipatan hanya terjadi di daerah deformasi saja. Pada model S50, lipatan tidak hanya terjadi di daerah deformasi, namun juga sel yang lain juga membentuk lipatan baru. Untuk memperjelasnya, gambar 13 menunjukkan fenomena tersebut.



**Gambar 13.** Lipatan yang terbentuk pada struktur *honeycomb* pada model C25 (gambar kiri), model S25 (gambar tengah) dan model S50 (gambar kanan) akibat model beban *oblique*.

(Keterangan: lingkaran merah menunjukkan lipatan yang terbentuk, lingkaran jingga menunjukkan bending yang terbentuk akibat beban *oblique*, panah hitam menunjukkan daerah deformasi)

#### 4. KESIMPULAN

Dari penjelasan di atas, kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Model S25 merupakan model yang paling unggul dalam menyerap energi, baik pada model pembebanan frontal maupun *oblique*. Besarnya peningkatan penyerapan energi jika dibandingkan dengan model S0 ketika menerima model beban frontal dan *oblique*, masing-masing adalah sebesar 256% dan 90%.
2. Ditinjau dari segi CFE, pada pembebanan frontal, model C25 memiliki nilai CFE yang paling tinggi. Sedangkan pada pembebanan *oblique*, model S50 memiliki nilai CFE yang paling tinggi. Hal tersebut disebabkan karena model tersebut, gaya reaksinya lebih stabil dibandingkan model lainnya.
3. Rentang penurunan penyerapan energi akibat model beban *oblique* adalah 59% - 81%. Penurunan penyerapan energi terbesar terjadi pada model dengan rasio 25% akibat pada rasio tersebut mampu menyerap energi yang lebih besar ketika menerima model beban frontal.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] ABDULLAH, N. A. Z., SANI, M. S. M., SALWANI, M. S., & HUSAIN, N. A. (2020). *A review on crashworthiness studies of crash box structure*. *Thin-Walled Structures*, 153(May), 106795. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795>
- [2] NIA, A. A., & HAMEDANI, J. H. (2010). *Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin-walled tubes with various section geometries*. *Thin-Walled Structures*, 48(12), 946–954. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.07.003>
- [3] ZAREI, H., & KRÖGER, M. (2008). *Optimum honeycomb filled crash absorber design*. *Materials and Design*, 29(1), 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.10.013>
- [4] CHOIRON, M. A. (2020). *Characteristics of deformation pattern and energy absorption in honeycomb filler crash box due to frontal load and oblique load test*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7–104), 6–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200020>
- [5] PARTOVI MERAN, A., TOPRAK, T., & MUĞAN, A. (2014). *Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures*. *Thin-Walled Structures*, 78, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.12.012>
- [6] KHOSHRAVAN, M. R., & NAJAFI POUR, M. (2014). *Numerical and experimental analyses of the effect of different geometrical modelling on predicting compressive strength of honeycomb core*. *Thin-Walled Structures*, 84, 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.07.016>
- [7] FRANK, T., & GRUBBER, K. (1992). *Numerical simulation of frontal impact and offset collisions*. CRAY Channel, Cray Research Inc.
- [8] QIU, N., GAO, Y., FANG, J., FENG, Z., SUN, G., & LI, Q. (2015). *Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases*. *Finite Elements in Analysis and Design*, 104, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2015.06.004>

- [9] THOTA, J., TRABIA, M. B., & O'TOOLE, B. J. (2015). *Computational prediction of low impact shock propagation in a lab-scale space bolted frame structure. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 3(2), 139–149. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V3-N2-139-149>
- [10] SINGH, K., TRIPATHI, V., SARKAR, P., SHINDE, P. S., SINGH, K. K., TRIPATHI, V. K., SARKAR, P. K., & KUMAR, P. (2012). *Critical J-Integral of Thin Aluminium Sheets Employing a Modified Single Edge Plate Specimen. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) www.ijmer.Com*, 2(3), 1360–1365. [www.ijmer.com](http://www.ijmer.com)
- [11] PIRMOHAMMAD, SADJAD. (2021). *Crashworthiness performance of concentric structures with different cross-sectional shapes under multiple loading conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(2–3), 417–435. <https://doi.org/10.1177/0954407020961885>
- [12] ZHANG, J., & ASHBY, M. F. (1992). *The out-of-plane properties of honeycombs. International Journal of Mechanical Sciences*, 34(6), 475–489. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(92\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0020-7403(92)90013-7)
- [13] TRAN, T. N., & BAROUTAJI, A. (2018). *Crashworthiness optimal design of multi-cell triangular tubes under axial and oblique impact loading. Engineering Failure Analysis*, 93(May), 241–256. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.07.003>
- [14] ANDREWS, K., ENGLAND, G., & GHANI, E. (1983). *Classification of The Axial Collapse of Cylindrical Tubes Under Quasi-Static Loading. International Journal of Mechanical Science*, 25, 687–696.
- [15] FANG, J., GAO, Y., SUN, G., QIU, N., & LI, Q. (2015). *On design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. Thin-Walled Structures*, 95, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.07.002>
- [16] CHOIRON, M. A., HAPPY, H. K., PURNOWIDODO, A., & RIVAI, A. (2019). *Deformation Pattern and Energy Absorption Analysis on Initial Fold Crash Box by Oblique Crash Test. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 494(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/494/1/012087>