

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Verifikasi Hasil Simulasi *Software* Terhadap Eksperimental

Verifikasi hasil dari simulasi *software* digunakan untuk mengetahui apakah hasil dari prosedur simulasi mendekati hasil hasil eksperimental yang ditunjukkan dengan nilai error. Pada gambar 4.1 terlihat perbandingan hasil antara simulasi (Fauza, 2015) dengan eksperimental (Velmurugan, 2009) melalui *Instrumented Drop Mass Setup* pada *Crash Box* dengan diameter 75 mm, panjang 150 mm, dan tebal 1,6 mm. Pada simulasi maupun eksperimental, beban yang diberikan sebesar 103 kg dengan kecepatan 7,67 m/s. Simulasi yang dilakukan menggunakan *software* berbasis Metode Elemen Hingga yaitu Ansys.



Gambar 4.1 : Verifikasi hasil uji *Crash Box* melalui (a) Simulasi (b) Eksperimental

Tabel 4.1 Data Verifikasi Perbandingan Hasil Simulasi dengan Eksperimental

Variabel	Simulasi <i>Software</i>	Eksperimental
Diameter (mm)	75	75
Panjang (mm)	150	150
Tebal (mm)	1,6	1,6
Deformasi (mm)	37,2002	37,2
Penyerapan Energi (J)	2527,7	2395,3

$$\delta_{error} = \left| \frac{37,2002 - 37,2}{37,2002} \right| \cdot 100 \% = 5,376 \cdot 10^{-4} \%$$

$$E_{error} = \left| \frac{2527,7 - 2395,3}{2527,7} \right| \cdot 100 \% = 5,237 \%$$

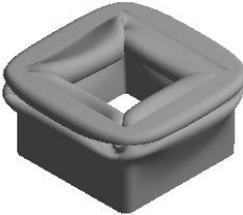
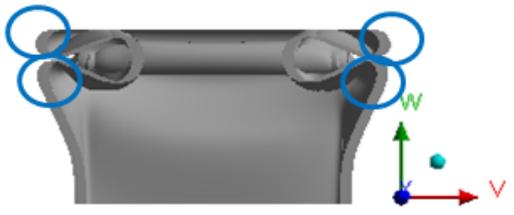
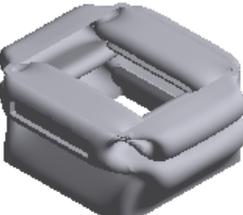
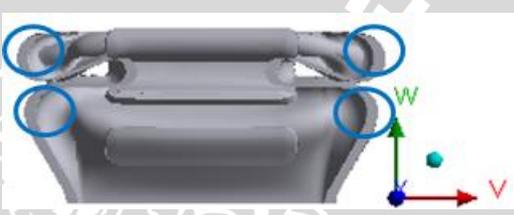
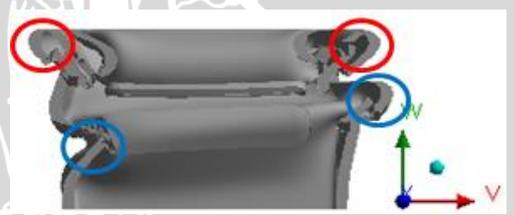
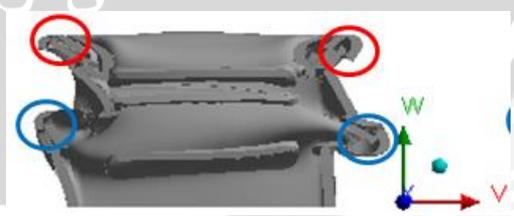
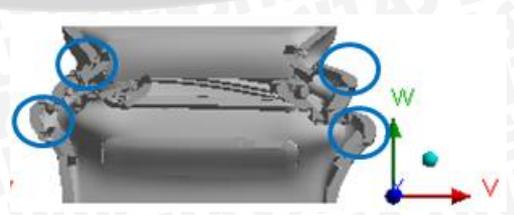
Dari hasil perhitungan didapatkan persentase *error* dari deformasi dan penyerapan energi pada uji *Crash Box* sebesar  $5,376 \cdot 10^{-4}\%$  dan  $5,237\%$ . Terjadinya *error* pada simulasi *software* dapat dikarenakan beberapa hal antara lain ukuran elemen model, tipe kontak pada *face Impactor* dengan *Crash Box*, dan cara penerapan model material. Ukuran elemen pada pendiskritisasian suatu model memiliki efek yang besar terhadap hasil suatu simulasi. Jika ukuran elemen semakin besar maka permodelan yang dihasilkan semakin jauh dari geometri sebenarnya, begitu juga sebaliknya jika ukuran elemen semakin kecil maka permodelan yang dihasilkan semakin mendekati bentuk geometri sebenarnya. Dari permodelan yang semakin mendekati atau menjauhi kondisi kenyataan akan mempengaruhi hasil perhitungan simulasi. Tipe kontak pada simulasi diatur *bonded* sedangkan pada referensi tidak ditemukan. Permodelan material *Crash Box* pada simulasi menggunakan *Bilinear Isotropic Hardening* yang bentuk kurvanya berupa garis lurus pada kondisi daerah elastis dan plastis, sehingga dengan asumsi model material tersebut akan memberikan perbedaan nilai. Dari hasil perhitungan simulasi yang mendekati eksperimental, maka prosedur langkah-langkah penggunaan simulasi *software* dapat digunakan pada permodelan simulasi dengan variabel penelitian, dimensi *Crash Box*, dan *properties* material yang berbeda.

#### 4.2 Pola Deformasi Pada *Crash Box*

Menurut tinjauan pustaka, terdapat 2 mode deformasi sebuah *Crash Box* yaitu mode aksial dan mode *bending* sedangkan pada pola deformasi *Crash Box* terbagi menjadi 3 macam yaitu *symmetric*, *asymmetric*, dan *mixed* mode. Pada penelitian ini, dilakukan pengamatan pada mode dan pola deformasi *Crash Box* dengan melihat bentuk akhir pada seluruh hasil simulasi *Crash Box*.

Dari analisa pengamatan deformasi *Crash Box* pada hasil simulasi, diketahui bahwa seluruh model simulasi mengalami mode deformasi aksial. Sedangkan pada pola deformasi, terdapat model yang mengalami pola deformasi secara *asymmetric* dan ada yang mengalami pola deformasi *mixed* (data mode dan pola deformasi akhir *Crash Box* dapat dilihat pada tabel 4.2 dan tabel 4.3).

Tabel 4.2 Gambar Pola Deformasi Akhir *Crash Box*

Model ke-n	Tampak Isometri	Tampak Potongan Melintang (lingkaran merah = <i>symmetric</i> ; lingkaran biru = <i>asymmetric</i> )
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

Tabel 4.3 Data Mode dan Pola Deformasi Akhir *Crash Box*

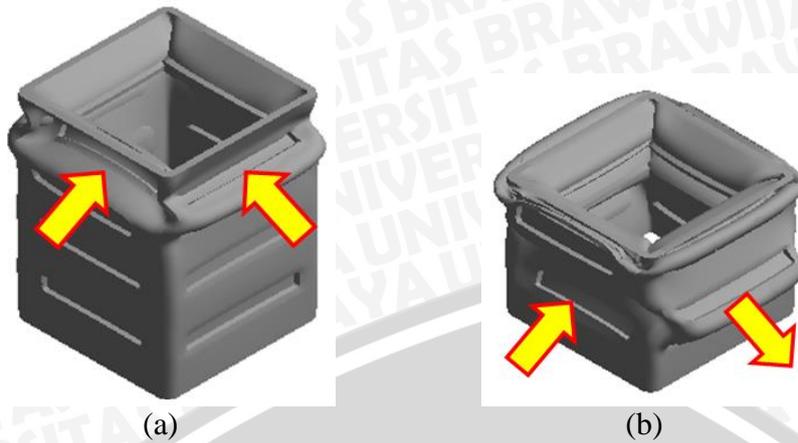
Model ke-n	Aksial		
	<i>Symmetric</i>	<i>Asymmetric</i>	<i>Mixed</i>
1	-	√	-
2	-	√	-
3	-	√	-
4	-	√	-
5	-	-	√
6	-	-	√
7	-	√	-

Dari tabel 4.2 terlihat bahwa pola deformasi pada *Crash Box* dengan konfigurasi peletakan *beads* pada 2 sisi dengan variasi jumlah *beads* cenderung hampir sama, sedangkan pada konfigurasi peletakan *beads* pada 4 sisi dengan variasi jumlah *beads* memiliki perbedaan pada jumlah *beads* 3 dan 4 dengan jumlah *beads* 5. Berdasarkan hal tersebut, maka akan dibandingkan pola deformasi pada konfigurasi peletakan *beads* pada 4 sisi dengan jumlah *beads* 4 dengan konfigurasi peletakan *beads* pada 4 sisi dengan jumlah *beads* 5 dan konfigurasi peletakan *beads* pada 2 sisi dengan jumlah *beads* 4.

#### 4.2.1 Pengaruh Jumlah Beads Terhadap Pola Deformasi *Crash Box*

Pada gambar 4.2 menunjukkan proses deformasi pada konfigurasi peletakan *beads* ke 4 sisi *Crash Box* dengan jumlah *beads* sebanyak 4 buah. Terlihat bahwa pada *Crash Box* mengalami lipatan pada *beads* pertama menuju ke arah dalam secara *symmetric* pada seluruh sisi. Seiring dengan proses deformasi, pada lipatan kedua *Crash Box* mengalami perbedaan dengan lipatan pertama di mana terjadi pola *asymmetric* yaitu pada sisi samping *Crash Box* mengalami lipatan ke arah luar sedangkan sisi depan dan belakang *Crash Box* mengalami lipatan ke arah dalam (gambar 4.3).

Gambar 4.2 : Proses deformasi *Crash Box* model ke-6



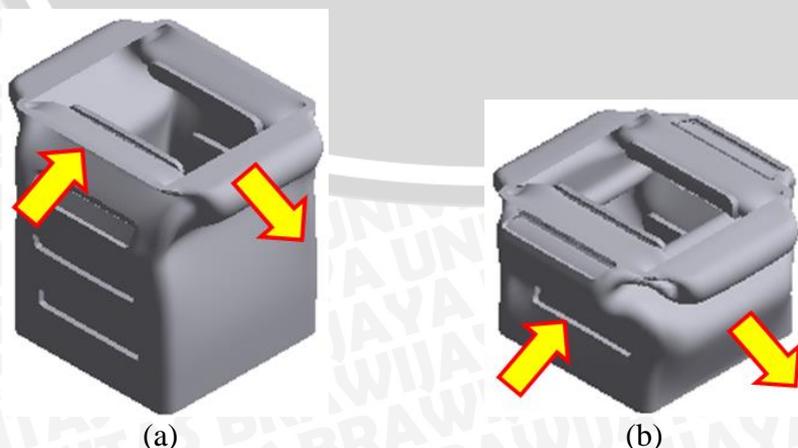
Gambar 4.3 : Arah lipatan pada *Crash Box* model ke-6 (a) pertama (b) kedua

#### 4.2.2 Pengaruh Peletakan Beads Terhadap Pola Deformasi *Crash Box*

Pada gambar 4.4 memperlihatkan proses deformasi pada konfigurasi peletakan *beads* pada 2 sisi *Crash Box* dengan jumlah *beads* sebanyak 4 buah. Dengan peletakan *beads* hanya pada 2 sisi *Crash Box* menunjukkan bahwa pola deformasi yang dialami *Crash Box* secara keseluruhan adalah *asymmetric*. Pada lipatan pertama *Crash Box*, sisi samping mengalami lipatan ke arah dalam sedangkan sisi depan dan belakang mengalami lipatan ke arah luar. Akibatnya pada lipatan kedua terjadi arah lipatan yang berkebalikan di mana sisi samping *Crash Box* mengalami lipatan ke arah luar sedangkan sisi depan dan belakang mengalami lipatan ke arah dalam (gambar 4.5).



Gambar 4.4 : Proses Deformasi *Crash Box* model ke-3

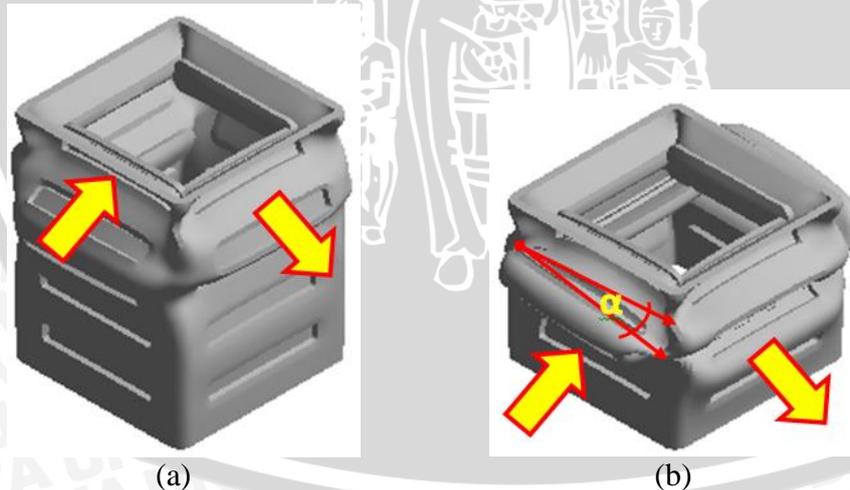


Gambar 4.5 : Arah Lipatan pada *Crash Box* model ke-3 (a) pertama (b) kedua

Pada gambar 4.6 adalah proses deformasi pada konfigurasi peletakkan *beads* ke 4 sisi *Crash Box* dengan jumlah *beads* sebanyak 5 buah. Dengan adanya penambahan jumlah *beads* pada *Crash Box* akan memudahkan terjadinya lipatan namun penambahan jumlah *beads* juga perlu mempertimbangkan alokasi panjang *Crash Box* yang tersisa setelah diberikan penambahan *beads*. Pada *Crash Box* dengan konfigurasi peletakan *beads* ke 4 sisi dengan jumlah *beads* 5 buah mengalami pola deformasi *asymmetric* pada seluruh lipatannya, terlihat pada lipatan pertama *Crash Box* sisi samping mengalami lipatan ke arah dalam sedangkan sisi depan dan belakang mengalami lipatan ke arah luar. Pada bentuk lipatan pertama pada bagian depan *Crash Box* terdapat kemiringan bentuk lipatan sebesar  $\alpha$ , hal ini menunjukkan tidak seimbang nya proses pembentukan lipatan. Lalu saat pembentukan lipatan kedua terjadi arah lipatan yang berkebalikan di mana sisi samping *Crash Box* mengalami lipatan ke arah luar sedangkan sisi depan dan belakang mengalami lipatan ke arah dalam.



Gambar 4.6 : Proses Deformasi *Crash Box* model ke-7

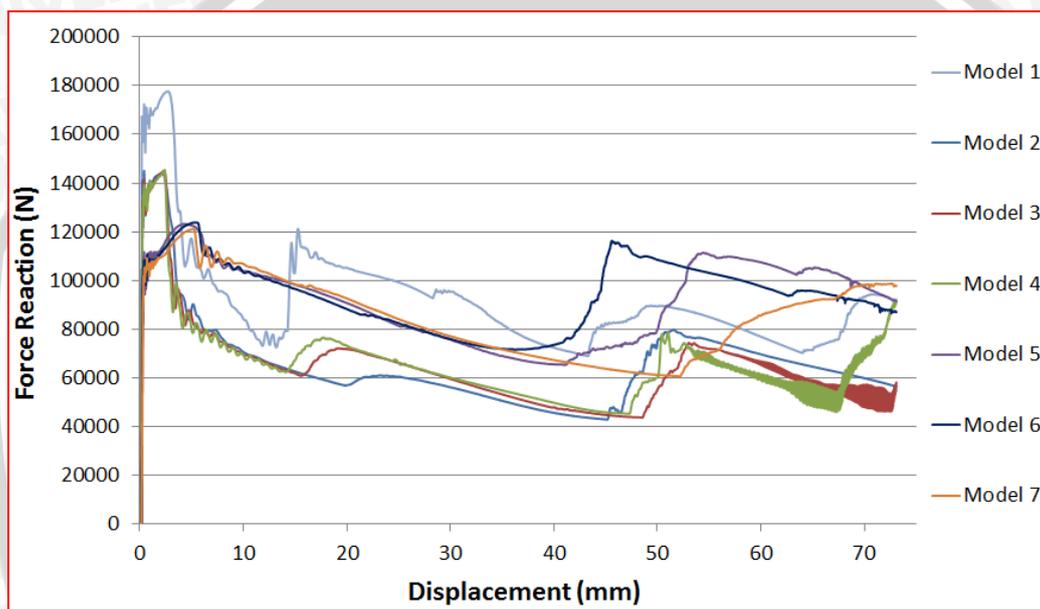


Gambar 4.7 : Arah Lipatan pada *Crash Box* model ke-7 (a) pertama (b) kedua

### 4.3 Penyerapan Energi pada *Crash Box*

Ketika *Impactor* tepat menumbuk *Crash Box*, terjadi gaya aksi-reaksi pada masing-masing komponen. Gaya aksi adalah gaya yang dihasilkan oleh *Impactor* sedangkan gaya reaksi adalah gaya yang dihasilkan oleh bagian dasar *Crash Box* yang dalam

kondisi ditumpu (*fixed*) sebagai akibat adanya gaya oleh *Impactor*. Dari tumbukan tersebut, terjadilah konversi energi kinetik yang dimiliki *Impactor* yaitu berupa fungsi massa dan kecepatan menjadi energi regangan yang dihasilkan *Crash Box* sebagai peredam dengan mengabaikan proses konversi energi yang lain. Energi regangan ini berupa deformasi plastis yang terjadi pada *Crash Box* atau biasa disebut energi internal. Nilai dari energi internal *Crash Box* didapatkan melalui persamaan pada Tinjauan Pustaka atau setara dengan menghitung luas di bawah kurva grafik *Force-Reaction* dengan *Displacement* pada gambar 4.2.



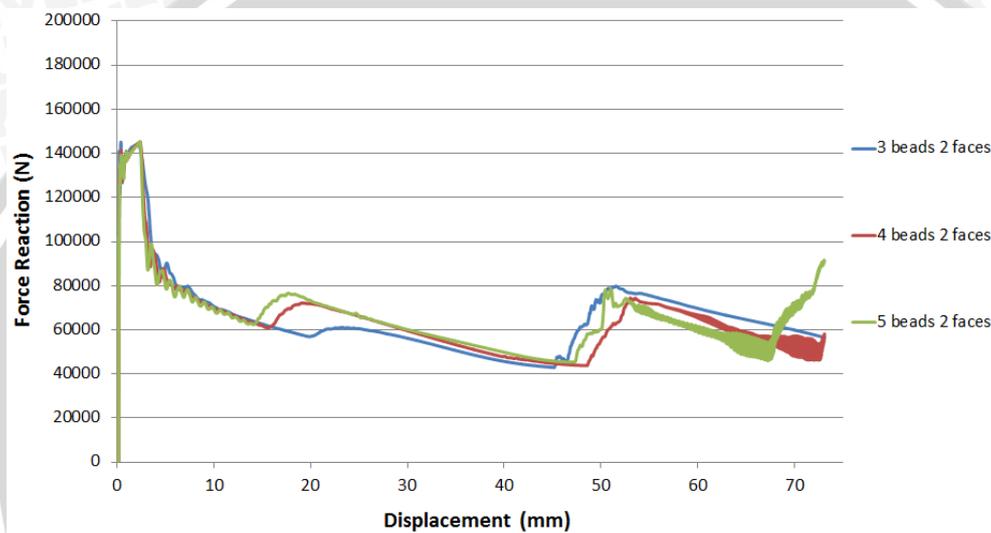
Gambar 4.8 : Grafik *Force-Reaction* Terhadap *Displacement* Seluruh Variasi Model

Data penyerapan energi *Crash Box* berdasarkan luas di bawah kurva grafik hubungan antara *Force-Reaction* dengan *Displacement* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Penyerapan Energi *Crash Box*

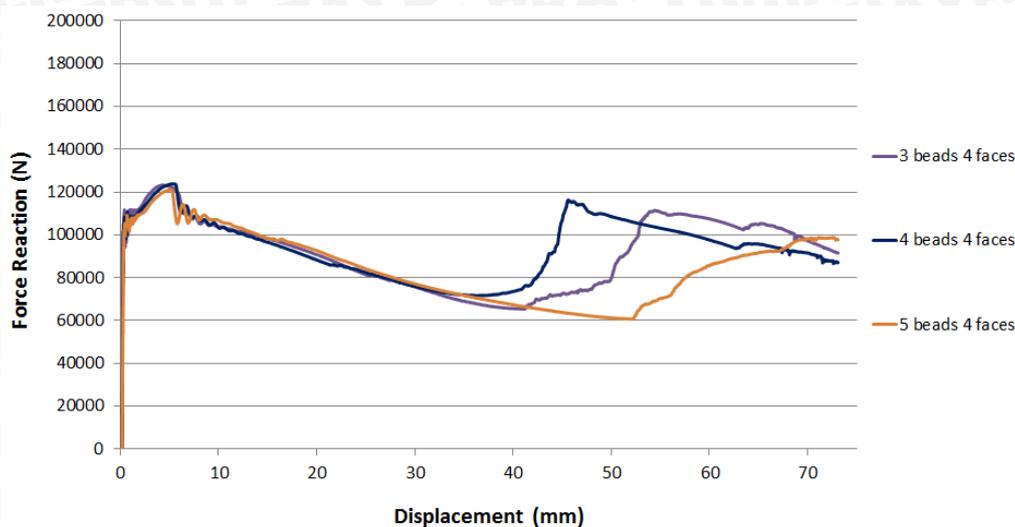
Model ke-n	$\delta$ (mm)	Pmax (N)	Pmean (N)	E (J)
1	73,095	177.710	88.251,96	6.771,7
2	73,095	145.080	65.483,53	4.876,2
3	73,095	145.160	64.130,18	4.821,7
4	73,095	145.370	65.911,49	4.993,2
5	73,095	123.240	91.552,10	6.813,6
6	73,095	123.830	93.598,80	6.949,3
7	73,095	121.060	84.954,20	6.319,7

Dari tabel 4.4 menunjukkan besar penyerapan energi yang terjadi pada masing-masing model variasi penelitian. Pada model ke-1 yang tidak menggunakan *beads* sebagai *crush initiator* memiliki penyerapan energi sebesar 6.771,7 J. Penyerapan energi yang tinggi pada model ke-1 dikarenakan proses deformasi pada pembentukan lipatan pertama *Crash Box* dibutuhkan gaya yang sangat besar. Berbanding lurus dengan gaya yang sangat besar, maka penyerapan energi yang dihasilkan pun akan besar hal ini dapat dilihat dari luasan area di bawah kurva Force Reaction-Displacement (gambar 4.8).



Gambar 4.9 : Grafik Force Reaction-Displacement pada Model ke-2 sampai 4

Berdasarkan data penyerapan energi tabel 4.4, pada *Crash Box* dengan konfigurasi peletakan *beads* pada 2 sisi dengan variasi jumlah *beads* memiliki penyerapan energi yang rendah bila dibandingkan dengan variasi model yang lain. Hal ini disebabkan pola deformasi yang dimiliki masing-masing model adalah *asymmetric*. Perbedaan arah masing-masing lipatan mempengaruhi kestabilan proses deformasi masing-masing sisi *Crash Box* dan keseragaman proses penyerapan energi sehingga tidak maksimal. Terlihat pada kurva gambar 4.9, setelah pembentukan lipatan pertama, gaya reaksi terus menurun secara signifikan lalu mengalami kenaikan pada saat proses pembentukan lipatan kedua lalu mengalami penurunan sekali lagi.

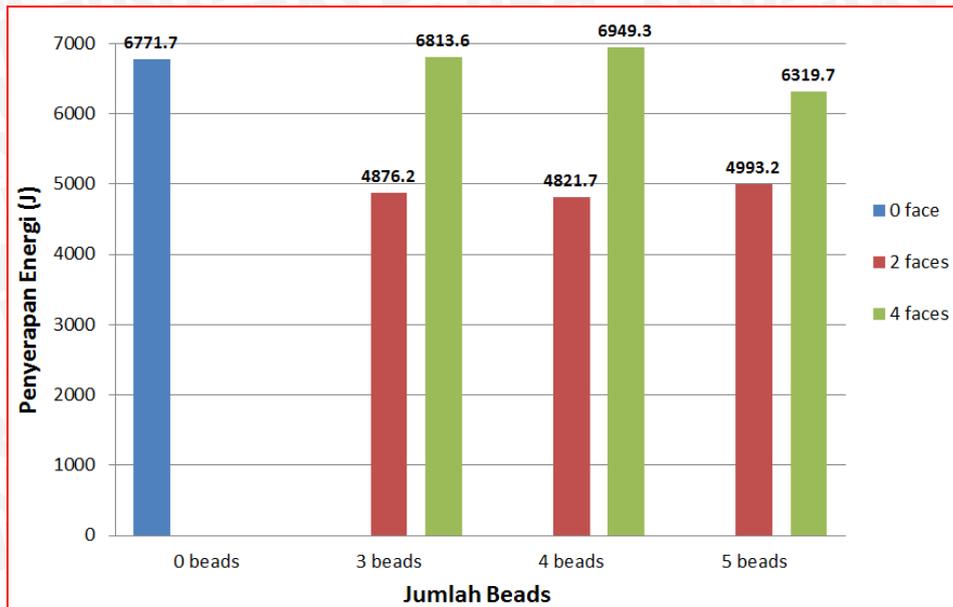


Gambar 4.10 : Grafik *Force Reaction-Displacement* pada Model ke-5 sampai 7

Pada data penyerapan energi tabel 4.4, *Crash Box* dengan konfigurasi peletakkan *beads* ke 4 sisi dengan variasi jumlah *beads* memiliki penyerapan energi yang lebih tinggi dibandingkan model lain. Penyerapan energi yang tinggi ini dikarenakan peletakkan *beads* pada ke 4 sisi *Crash Box* meningkatkan kestabilan pada proses deformasi terlihat pada pola deformasi yang dimiliki adalah *mixed*. Sesuai dengan tinjauan pustaka bahwa dengan adanya lipatan *symmetryc* pada pola deformasi *Crash Box* akan meningkatkan kestabilan proses deformasi dan keseragaman proses penyerapan energi pada masing-masing sisi *Crash Box*. Terlihat pada kurva gambar 4.10, setelah pembentukan lipatan pertama, gaya reaksi mengalami penurunan namun tidak terlalu signifikan bila dibandingkan *Crash Box* dengan konfigurasi peletakkan *beads* ke 2 sisi. Namun pada *Crash Box* dengan jumlah *beads* sebanyak 5 buah mengalami penurunan penyerapan energi. Penurunan penyerapan energi ini dapat disebabkan karena jumlah *beads* yang tidak seimbang dengan alokasi panjang *Crash Box* yang tersisa setelah penambahan *beads*, terlihat pada kurva gambar 4.10, kecenderungan pada bagian akhir kurva sebenarnya pada *Crash Box* dengan jumlah *beads* sebanyak 5 buah masih mengalami kenaikan gaya reaksi.

#### 4.3.1 Pengaruh Jumlah Beads Terhadap Penyerapan Energi Crash Box

Jumlah *beads* sebagai *crush initiator* pada *Crash Box* mempengaruhi nilai penyerapan energi pada saat terjadi tumbukan. Hal ini disebabkan, dengan adanya *beads* maka proses deformasi pada *Crash Box* akan terjadi lebih mudah sehingga penyerapan energi menjadi lebih maksimal.



Gambar 4.11 : Diagram Jumlah *Beads* Terhadap Penyerapan Energi *Crash Box*

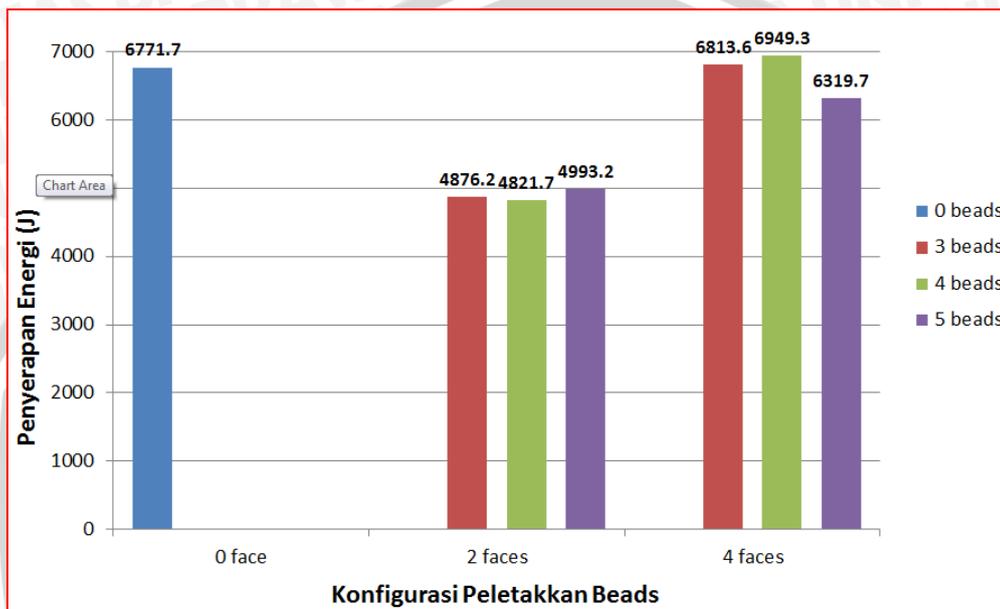
Pada gambar 4.11 menunjukkan besarnya penyerapan energi pada *Crash Box* dengan variasi jumlah *beads* 0, 3, 4, dan 5 buah *beads*. Pada model ke-1 yang tidak menggunakan *beads* sama sekali memiliki penyerapan energi yang tinggi dengan nilai 6771,7 J. Nilai penyerapan energi yang tinggi pada model 1 ini dikarenakan pada saat *folding* pertama terjadi pada *Crash Box* dibutuhkan gaya yang sangat tinggi untuk mendeformasi sehingga energi yang dibutuhkan pun juga ikut naik, hal ini dapat dilihat pada nilai  $P_{max}$  model ke-1 yang merupakan nilai tertinggi di antara model lainnya.

Dari diagram batang terlihat bahwa penyerapan energi naik seiring dengan pertambahan jumlah *beads* yaitu sebesar 6813,6 J dan 6949,3 J pada model 5 dan 6, namun penyerapan energi turun pada jumlah *beads* 5 buah yaitu sebesar 6319,7 J. Hal ini disebabkan karena seiring pertambahan jumlah *beads* maka jarak antar *beads* pun akan mengecil sehingga mempengaruhi keseimbangan proses deformasi pada *Crash Box* itu sendiri sehingga penyerapan energi akhirnya menurun. Dari nilai penyerapan energi tersebut, terlihat bahwa penyerapan energi *Crash Box* optimal pada saat jumlah *beads* 4 buah.

Selain itu pada diagram batang menunjukkan bahwa penyerapan energi *Crash Box* dengan pertambahan jumlah *beads* pada konfigurasi peletakkan jumlah *beads* 2 *faces* cenderung tidak mengalami perubahan terlalu signifikan dan cenderung turun jika dibandingkan dengan model 1. Hal ini disebabkan karena penggunaan *beads* pada 2 *faces* mengakibatkan proses deformasi yang tidak seimbang terlihat pada pola deformasinya berupa *asymmetric* sehingga proses penyerapan energi tidak maksimal.

### 4.3.2 Pengaruh Konfigurasi Peletakan Beads Terhadap Penyerapan Energi *Crash Box*

Konfigurasi peletakan *beads* pada sisi (*faces*) *Crash Box* berpenampang persegi mempengaruhi nilai penyerapan energi pada saat terjadi tumbukan. Hal ini disebabkan, peletakan *beads* mempengaruhi kestabilan pada proses deformasi dan proses penyerapan energi *Crash Box*.

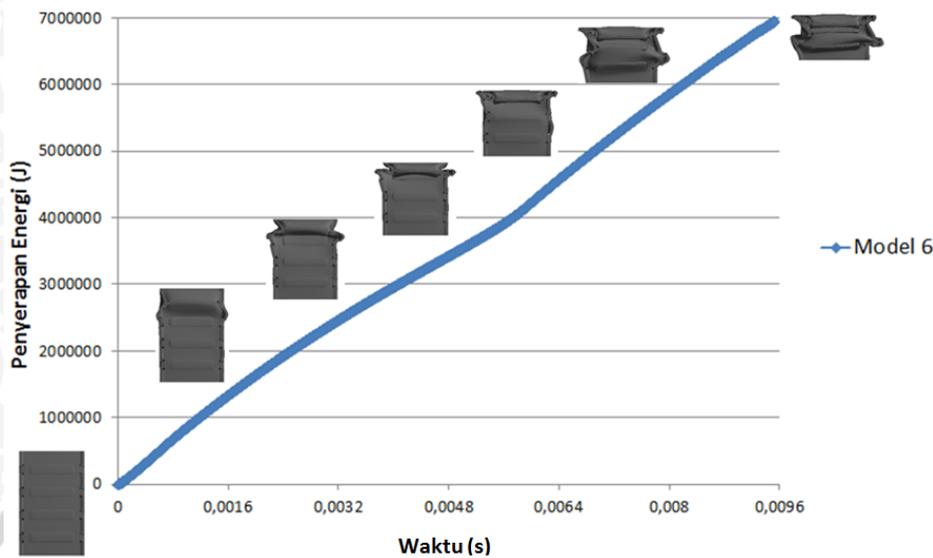


Gambar 4.12 : Diagram Konfigurasi Peletakan *Beads* Terhadap Penyerapan Energi *Crash Box*

Pada gambar 4.4 menunjukkan besarnya penyerapan energi pada *Crash Box* dengan variasi peletakan *beads* yaitu 0, 2, dan 4 sisi. Dari diagram batang terlihat penyerapan energi *Crash Box* dengan konfigurasi peletakan beads pada 4 sisi yaitu sebesar 6813,6 J, 6949,3 J, dan 6319,7 J pada model 5, 6, dan 7. Besar penyerapan energi model 5-7 ini lebih baik bila dibandingkan dengan *Crash Box* yang tidak menggunakan beads dan *Crash Box* yang peletakan beads-nya hanya pada 2 sisi

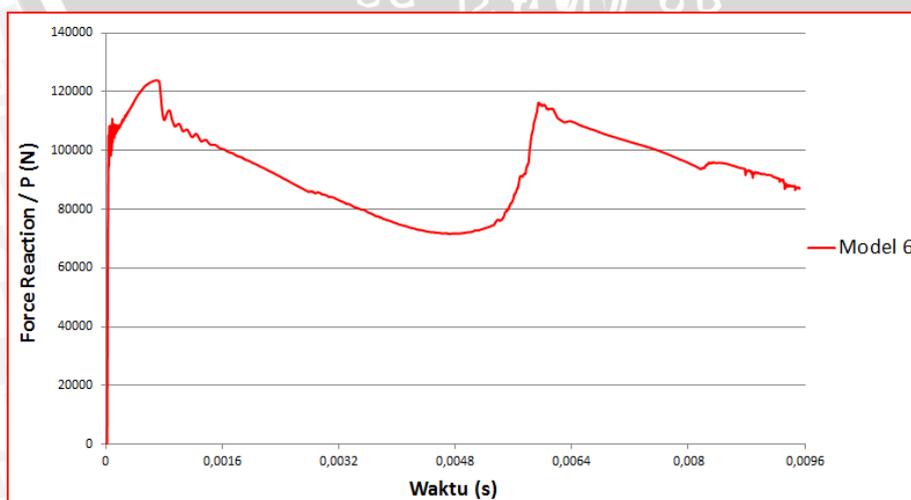
Peletakan *beads* pada 4 sisi *Crash Box* menyebabkan proses deformasi yang lebih stabil bila dibandingkan peletakan *beads* pada 2 sisi. Terlihat pada tabel 4.2, pola deformasi yang dialami *Crash Box* dengan peletakan beads pada 4 sisi adalah *mixed* sehingga proses penyerapan energi menjadi lebih baik bila dibandingkan dengan *Crash Box* dengan peletakan beads pada 2 sisi yang pola deformasinya *asymmetric*.

#### 4.4 Hubungan Pola Deformasi dan Penyerapan Energi



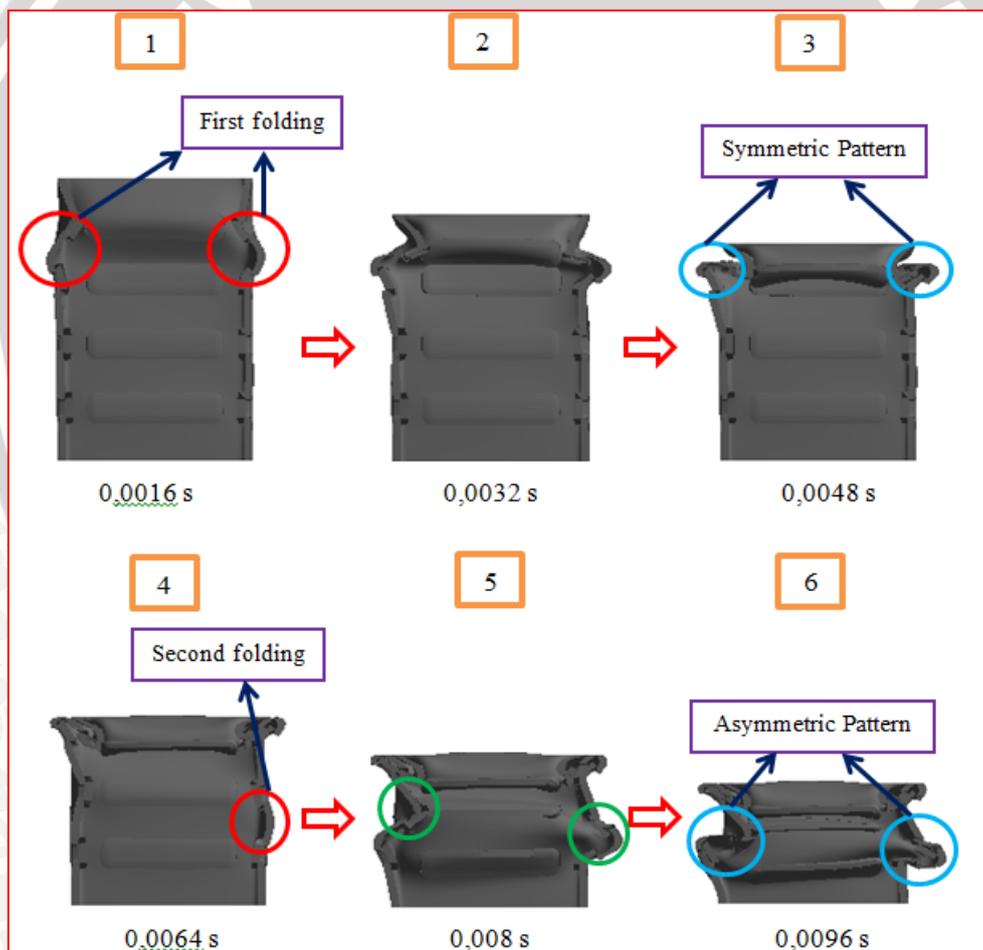
Gambar 4.13 : Grafik Waktu Terhadap Penyerapan Energi dan Pola Deformasi Model ke-6

Pada gambar 4.13 memperlihatkan grafik hubungan waktu terhadap penyerapan energi dan pola deformasi pada model ke-6 (Model Crash Box dengan peletakkan beads ke 4 sisi dengan penggunaan jumlah beads 4 buah). Pola Deformasi yang dialami *Crash Box* model ke-6 diamati pada selang waktu 0,0016 detik dan terlihat bahwa seiring dengan berjalannya waktu, proses deformasi terus berjalan dan penyerapan energi yang terjadi juga terus meningkat. Terlihat bahwa pada kurva grafik terbagi menjadi dua yaitu pada rentang 0 detik hingga sebelum mendekati 0,0064 detik dan rentang 0,0064 detik hingga 0,0096 detik.



Gambar 4.14 : Grafik Waktu Terhadap Force Reaction Model ke-6

Pada bagian pertama, saat membentuk lipatan (*folding*) pertama dibutuhkan gaya yang sangat besar (terlihat pada gambar 4.14), dengan peletakan *beads* pada 4 sisi *Crash Box* menghasilkan pola deformasi yang stabil sehingga lipatan pertama yang dihasilkan berupa pola *symmetric* pada seluruh sisi *Crash Box* dengan arah lipatan menuju keluar. Lalu mendekati rentang waktu kedua, pada salah satu sisi *Crash Box* mengalami lipatan kedua terlebih dahulu daripada sisi yang lain sehingga pola deformasi berlanjut dengan pola *asymmetric* dengan adanya arah lipatan menuju ke dalam dan ke luar. Pada proses pembentukan lipatan kedua, nilai *P* mengalami kenaikan kembali setelah sebelumnya turun (gambar 4.14) sehingga penyerapan energi pada rentang ke-2 naik kembali. Pada gambar 4.15 menampilkan pola deformasi yang dialami *Crash Box* model ke-6.



Gambar 4.15 : Pola Deformasi *Crash Box* model ke-6

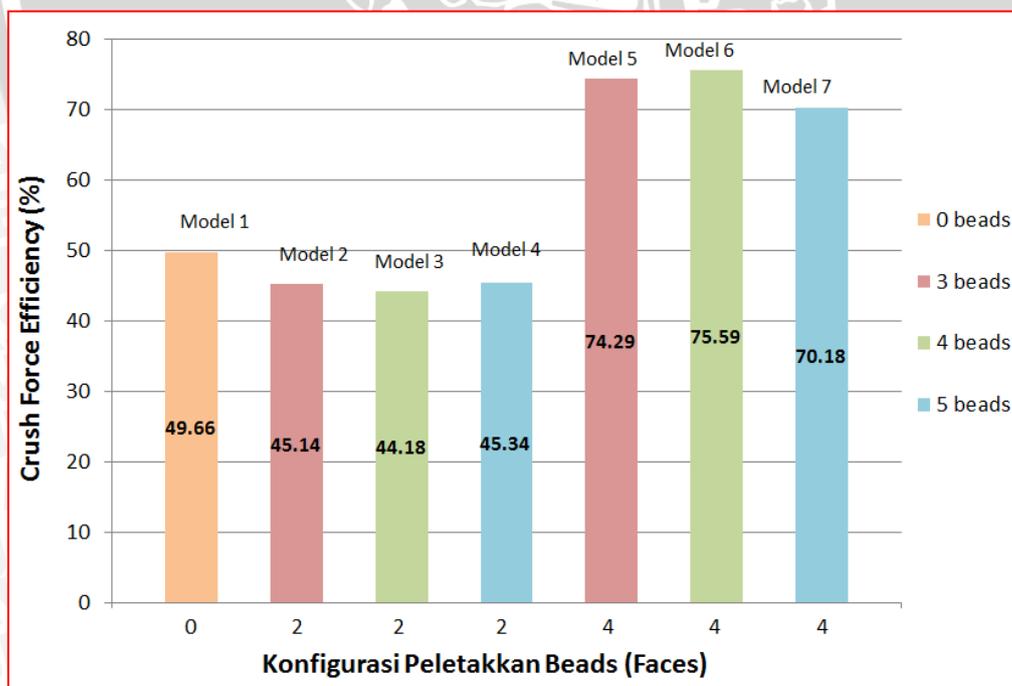
#### 4.5 Pengaruh *Beads* Terhadap *Crush Force Efficiency*

Nilai  $P_{max}$  dan  $P_{mean}$  adalah dua parameter yang mempengaruhi kestabilan dari *Crash Box* saat mengalami proses deformasi akibat adanya tumbukan dengan *Impactor*.

Bila nilai  $P_{max}$  terlalu tinggi maka saat terjadi tabrakan baik itu arah *frontal* maupun *oblique*, kemungkinan *Crash Box* akan mengalami *bending* sangat besar dan akan mengakibatkan penurunan signifikan pada proses penyerapan energi. Semakin tinggi nilai  $P_{mean}$  maka kestabilan suatu *Crash Box* saat mengalami proses deformasi akan meningkat atau dalam arti lain nilai *Crush Force Efficiency* (*CFE*) akan naik. Nilai *CFE* sendiri adalah besar persentase pembagian  $P_{mean}$  terhadap  $P_{max}$ . Semakin besar nilai *CFE* maka pengaplikasian suatu model *Crash Box* pada kendaraan lebih baik..

Tabel 4.5 Data *Crush Force Efficiency* (*CFE*) pada Variasi Model

Model ke-n	$\delta$ (mm)	$P_{max}$ (N)	$P_{mean}$ (N)	<i>CFE</i> (%)
1	73,095	177.710	88.251,96	49,66
2	73,095	145.080	65.483,53	45,14
3	73,095	145.160	64.130,18	44,18
4	73,095	145.370	65.911,49	45,34
5	73,095	123.240	91.552,10	74,29
6	73,095	123.830	93.598,80	75,59
7	73,095	121.060	84.954,20	70,18



Gambar 4.16 Diagram Batang Seluruh Variasi Model Terhadap Nilai *CFE*

Pada Tabel 4.5 terlihat bahwa nilai  $P_{max}$  tertinggi dimiliki oleh model 1 yaitu 177.110 N, sedangkan pada model lain mengalami penurunan nilai  $P_{max}$  secara signifikan terutama pada model 5 sebesar 123.240 N, model 6 sebesar 123.830 N, dan model 7 sebesar 121.060 N. Hal ini sesuai dengan hipotesis bahwa dengan penambahan *crush initiator* berupa *beads* akan memudahkan sebuah *Crash Box* untuk membentuk lipatan awal sehingga  $P_{max}$  yang diperlukan akan menurun. Model 1 adalah *Crash Box* yang tidak menggunakan *beads* sehingga  $P_{max}$  awal yang diperlukan untuk membentuk lipatan pertama sangat besar. Sedangkan pada model 2 sampai dengan model 7 yang menggunakan *beads*,  $P_{max}$  awal yang diperlukan untuk membentuk lipatan pertama cenderung rendah jika dibandingkan model 1.

Selain itu, pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa nilai  $P_{mean}$  dimiliki oleh model 6 diikuti model 5 dan model 7 sebesar 93.598,8 N, 91.552,1 N, dan 84.954,2 N. Nilai  $P_{mean}$  yang tinggi pada ketiga model ini disebabkan konfigurasi peletakan *beads* pada 4 sisi *Crash Box* meningkatkan kestabilan pada saat proses pembentukan lipatan. Terlihat pada kurva *Force Reaction-Displacement* (gambar 4.8) kestabilan proses deformasi *Crash Box* ditunjukkan dengan keseragaman (*uniform*) nilai gaya sepanjang deformasi yang terjadi. Dengan nilai  $P_{max}$  yang tidak terlalu tinggi tiap pembentukan lipatan dan penurunan gaya yang tidak terlalu signifikan menyebabkan nilai  $P_{mean}$  yang cenderung tinggi. Pada model 7 di mana jumlah *beads* yang digunakan sebanyak 5 buah terjadi penurunan nilai  $P_{mean}$  dikarenakan penggunaan jumlah *beads* yang sudah tidak optimal pada panjang *Crash Box* yang hanya 4,8 inci (121,92 mm). Berbeda dengan model 5 sampai dengan model 7, pada model 2 sampai dengan model 4 di mana konfigurasi peletakan *beads* hanya pada dua sisi *Crash Box* memiliki nilai  $P_{mean}$  yang cenderung rendah. Pada ketiga model ini penurunan nilai  $P_{mean}$  dikarenakan proses deformasi yang tidak stabil, terlihat pada kurva gambar 4.9 setelah pembentukan lipatan pertama nilai gaya reaksi terus menurun secara drastis lalu naik kembali pada saat pembentukan lipatan kedua.

Berdasarkan data nilai  $P_{max}$  dan  $P_{mean}$  masing-masing model pada tabel 4.5 dan gambar 4.16 memperlihatkan pengaruh konfigurasi peletakan *beads* dan jumlah *beads* terhadap nilai *CFE* suatu *Crash Box*. Tiga nilai *CFE* tertinggi secara berurutan adalah model ke-7, 5, dan 6 dengan nilai sebesar 70,18%, 74,29%, dan 75,58%. Hal ini sesuai dengan tinjauan pustaka bahwa nilai  $P_{mean}$  yang semakin naik dan  $P_{max}$  yang turun akan meningkatkan nilai *CFE* dan sebaliknya jika nilai  $P_{mean}$  turun dan nilai  $P_{max}$  yang naik maka nilai *CFE* akan semakin kecil. Selain itu, dapat disimpulkan dengan

adanya penambahan beads sebagai crush initiator pada *Crash Box* akan memudahkan terjadinya proses deformasi pada *Crash Box* sehingga menurunkan nilai  $P_{max}$  pada saat pembentukan lipatan pertama dan konfigurasi peletakkan beads pada 4 sisi *Crash Box* mampu menyeragamkan (meningkatkan ke-*uniform-an*) nilai gaya reaksi sepanjang deformasi yang terjadi sehingga nilai  $P_{mean}$  yang dihasilkan tinggi.

