

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Verifikasi Penelitian

Pada penelitian ini verifikasi digunakan untuk membandingkan permodelan *crash box* menggunakan simulasi dengan eksperimental yang dilakukan oleh Velmurugan (Velmurugan, 2009). *Crash box* yang digunakan dalam eksperimen mempunyai ukuran diameter sebesar 75 mm, panjang 150 mm, dan tebal 1.6 mm. Kecepatan tumbuk yang digunakan adalah sebesar 7.67 m/s dengan *frontal crash test*. Berikut hasil perbandingan hasil permodelan *crash box* dengan simulasi dan eksperimental seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Verifikasi *Crash Box* Hasil (a) Eksperimental, (b) Simulasi

Sumber : Fauza, 2015

Tabel 4.1 Verifikasi Penelitian

Variabel	Eksperimental	Simulasi
\varnothing (mm)	75	75
L (mm)	150	150
m (kg)	103	103
t (mm)	1,6	1,6
v (m/s)	7,67	7,67
δL (mm)	37,2	37,2002
Ea (J)	2.395,30	2.527,71

Sumber : Fauza, 2015

$$\delta_{error} = \left[\frac{(\ddot{a}-a)}{\ddot{a}} \right] \times 100 \% = \frac{(37,2002-37,2)}{37,2002} \times 100 \% = 5,38 \times 10^{-4} \% \quad (4-1)$$

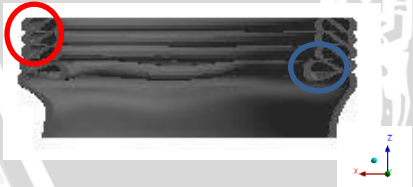


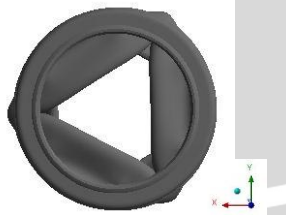


$$Ea_{error} = \left[\frac{(\ddot{a}-a)}{\ddot{a}} \right] \times 100 \% = \frac{(2.527,71-2.395,30)}{2.527,71} \times 100 \% = 5,24 \% \quad (4-2)$$

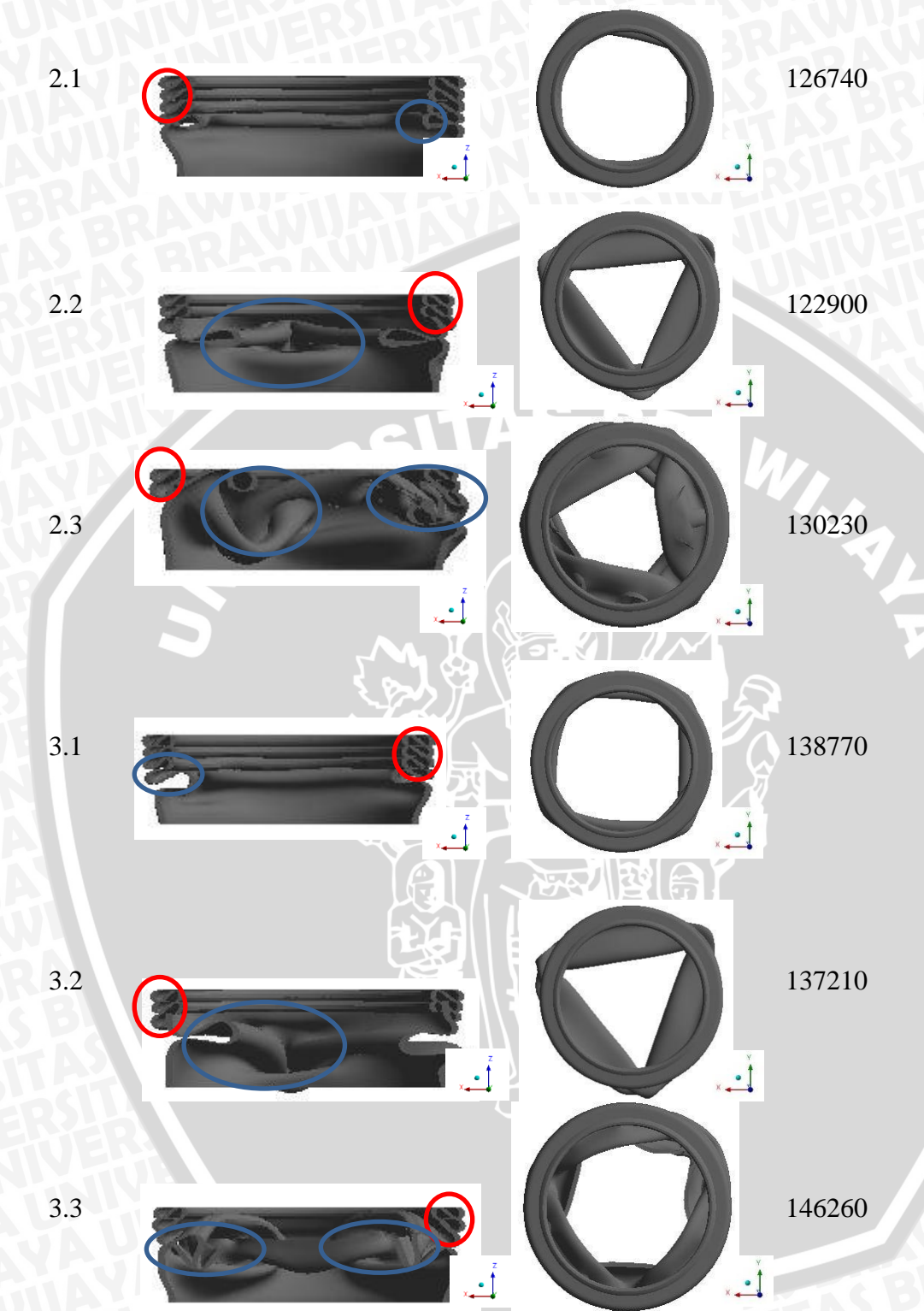
Dari hasil perhitungan (4-1) dan (4-2) diperoleh bahwa nilai persentase *error* pada deformasi adalah sebesar $5,38 \cdot 10^{-4} \%$ dan untuk energi penyerapan adalah sebesar $5,24 \%$. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi dan eksperimen tidak terjadi penyimpangan yang cukup besar sehingga pemodelan *crash box* dengan *software* FEM bisa diterima.

4.2 Pola Deformasi pada *Multi Segment Crash Box*

Berdasarkan tinjauan pustaka, pola deformasi dapat diklasifikasikan menjadi *axisymmetric (concertina)*, *non-axisymmetric (diamond)*, *mixed mode* (gabungan *concertina* dan *diamond mode*) dan *Euler-type buckling*. Pada penelitian ini pola deformasi dianalisis dengan menggunakan pengamatan visual. Pola deformasi pada MSCB dapat dilihat pada Tabel 4.2.

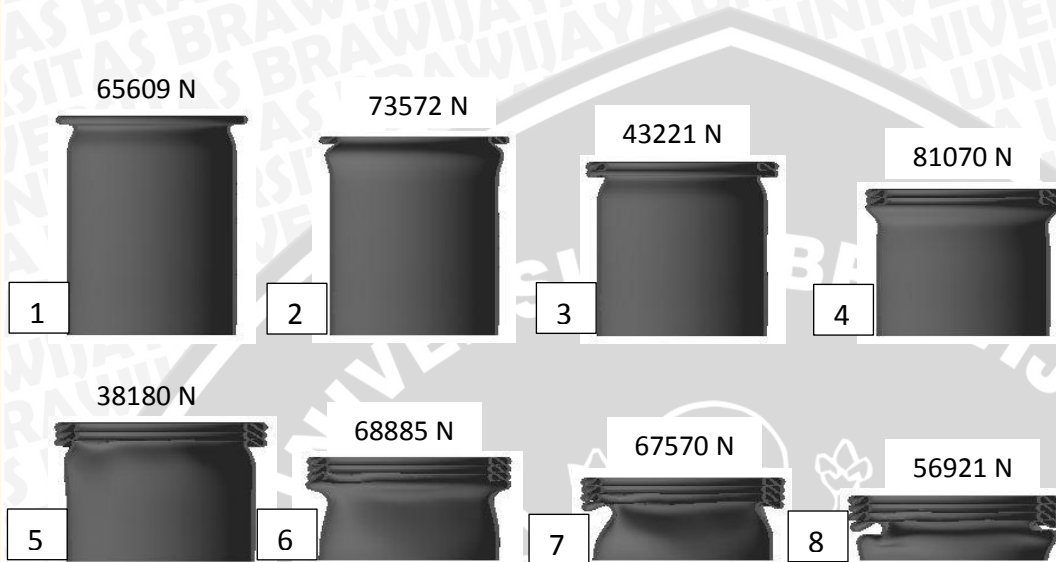
Tabel 4.2 Hasil Visualisasi Pola Deformasi

Model	Potongan Tampak Samping (mode <i>concertina</i> lingkaran merah dan mode <i>diamond</i> lingkaran biru)	Tampak Atas	Pmax (N)
1.1			110080
1.2			105410
1.3			112300



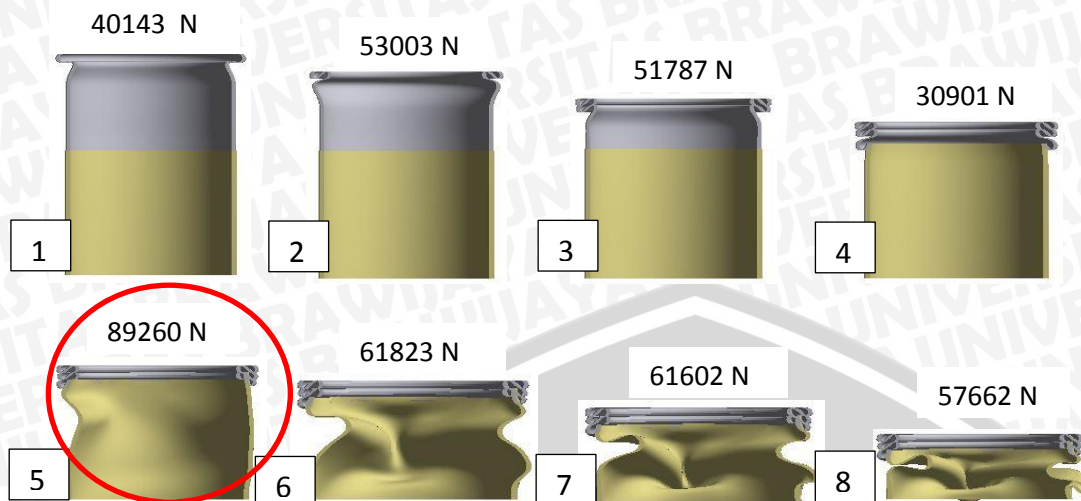
Terlihat bahwa pola deformasi pada MSCB pada semua model memiliki pola deformasi *mixed mode*. Pada model MSCB satu segmen pola deformasi adalah cenderung *concertina mode* dengan *diamond mode* hanya di akhir deformasi. Pada *crash box* satu segmen memiliki kestabilan yang baik dalam menerima beban, hal ini karena pada *crash*

box satu segmen hanya memiliki satu titik beban. Nilai P_{max} pada *crash box* satu segmen cenderung naik seiring dengan bertambahnya nilai diameter. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya nilai diameter maka beban kritis semakin besar sehingga kestabilan *crash box* dalam menerima beban untuk melawan energi *impact* semakin baik. Langkah deformasi pada *crash box* satu segmen dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Langkah Deformasi pada Model 3.1

Pada *crash box* dua segmen pola deformasi yang terjadi adalah *mixed mode*, dimana pada segmen satu pola deformasi yang terjadi adalah *concertina mode*, kemudian memasuki segmen dua terjadi pola deformasi *diamond mode*. Hal ini disebabkan pada *crash box* dua segmen antara segmen satu dan segmen dua memiliki titik beban yang berbeda, sehingga terjadi ketidakstabilan. Ketidakstabilan pada *crash box* dua segmen dapat ditunjukkan dengan Gambar 4.3, dimana pola deformasi tempat terjadinya ketidakstabilan diberi tanda lingkaran. Nilai P_{max} *crash box* dua segmen bila dibandingkan dengan *crash box* satu segmen mengalami penurunan karena ketidakstabilan yang terjadi. Sedangkan dengan diameter yang semakin besar juga nilai P_{max} menunjukkan kecenderungan yang naik. Hal ini karena nilai beban kritis juga semakin besar sehingga kemampuan dalam melawan energi *impact* semakin baik.



Gambar 4.3 Langkah Deformasi pada Model 3.2

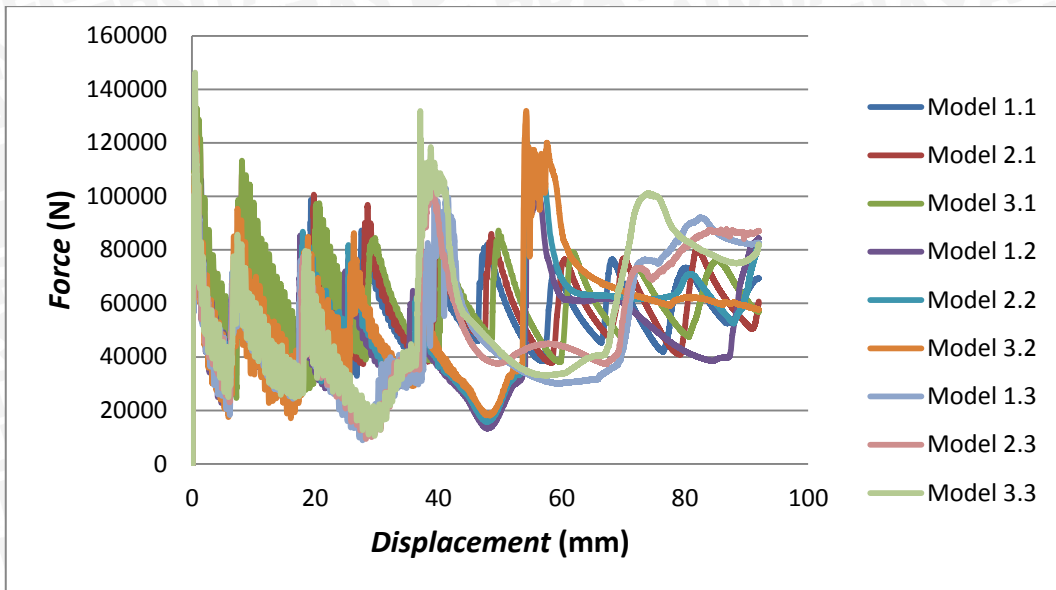
Pada *crash box* tiga segmen pola deformasi yang terjadi adalah *mixed mode*, dimana pada segmen satu pola deformasi yang terjadi adalah *concertina mode*, ketika memasuki segmen dua terjadi ketidakstabilan dalam menerima beban sehingga terbentuk pola deformasi *diamond mode*, begitu juga saat memasuki segmen tiga ketidakstabilan dalam menerima beban menyebabkan pola deformasi yang terbentuk adalah *diamond mode*. Ketidakstabilan pada *crash box* tiga segmen dapat dilihat pada Gambar 4.4, dimana lokasi ketidakstabilan dilingkari dengan tanda merah. Nilai P_{max} *crash box* tiga segmen bila dibandingkan dengan *crash box* satu segmen dan dua segmen memiliki nilai paling besar, hal ini disebabkan oleh beban kritis yang semakin besar karena panjang kolom yang pendek. Sedangkan dengan diameter yang semakin besar juga nilai P_{max} menunjukkan kecenderungan yang naik. Hal ini karena nilai beban kritis juga semakin besar sehingga kemampuan dalam melawan energi *impact* semakin baik.



Gambar 4.4 Langkah Deformasi pada Model 3.3

4.3 Grafik Hubungan Force dan Displacement pada Multi Segment Crash Box

Pada saat *crash box* ditumbuk oleh *impactor*, maka terjadi gaya reaksi pada tumpuan *crash box* sebagai akibat dari gaya aksi yang diberikan oleh *impactor*. Dengan adanya pembebanan pada *crash box* maka terjadi deformasi plastis pada *crash box*. Karena deformasi tersebut terjadi pada selang waktu tertentu, maka gaya reaksi yang disebabkan oleh beban dari *impactor* berfluktuasi. Terjadinya fluktuasi tersebut disebabkan karena perubahan bentuk *crash box* berbeda pada selang waktu tertentu. Hal ini dapat dijelaskan melalui grafik hubungan antara *force* dan *displacement* seperti pada Gambar 4.5, grafik tersebut diperoleh dengan menggabungkan grafik gaya reaksi terhadap waktu dan grafik deformasi terhadap waktu yang diperoleh dari *software*.



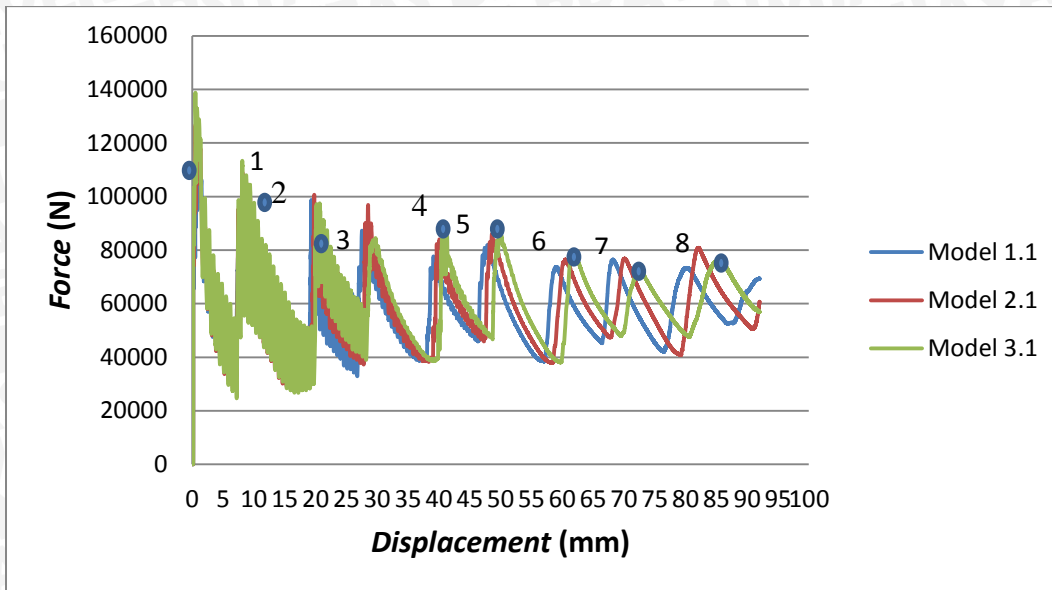
Gambar 4.5 Grafik Hubungan *Force* dan *Displacement* MSCB Semua Model

Dari grafik hubungan *force* dan *displacement* dapat ditentukan nilai P_{max} dan P_{mean} pada *crash box* seperti pada Tabel 4.3. Didapatkan bahwa nilai P_{max} tertinggi pada model 3.3 dan terendah pada model 1.2.

Tabel 4.3 Data Hasil *Force* MSCB

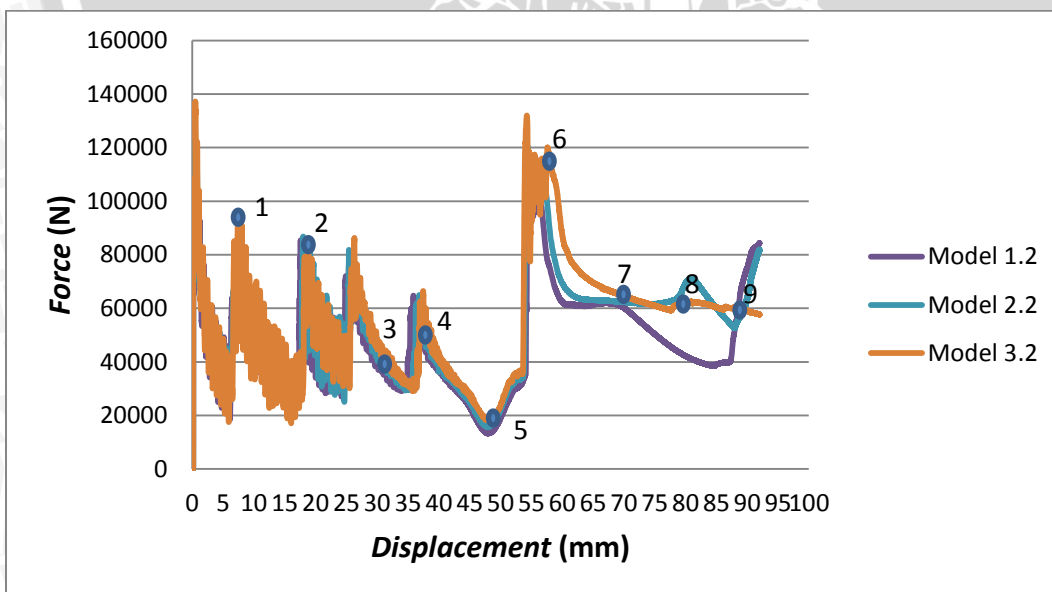
Model Ke-	$P_{max}(N)$	$P_{mean}(N)$
1.1	110080	58318.06
1.2	105410	48782.65
1.3	112300	53916
2.1	126740	58785.04
2.2	122900	55853.68
2.3	130230	56917.32
3.1	138770	60451.63
3.2	137210	56857.54
3.3	146260	59802.2

Berdasarkan grafik hubungan antara *force* dan *displacement* pada MSCB satu segmen pada Gambar 4.6. Didapatkan bahwa hubungan *force* dan *displacement* memiliki kecenderungan yang sama. Hal ini disebabkan oleh kestabilan pada *crash box* satu segmen yang cukup baik karena hanya memiliki satu titik tumpu.

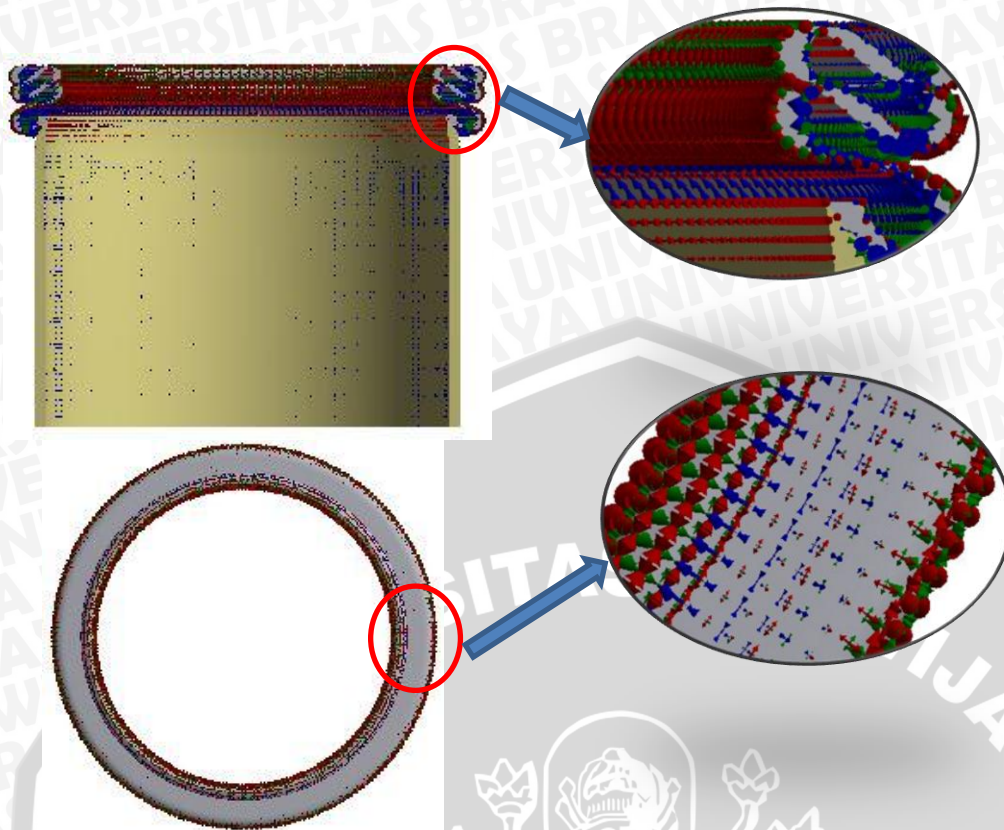


Gambar 4.6 Grafik Hubungan antara *Force* dan *Displacement* pada MSCB Satu Segmen

Pada *crash box* dua segmen, grafik hubungan antara *force* dan *displacement* dapat dilihat pada Gambar 4.7. Dapat dilihat bahwa *force* yang terjadi pada segmen pertama cenderung stabil. Namun ketika memasuki segmen kedua yang diberi angka 5 pada Gambar 4.7 terjadi ketidakstabil, hal ini disebabkan oleh letak titik beban antara segmen pertama dan kedua berbeda. Ketidakstabilan tersebut dapat dilihat pada gambar *vector* tegangan seperti yang terlihat pada Gambar 4.8.

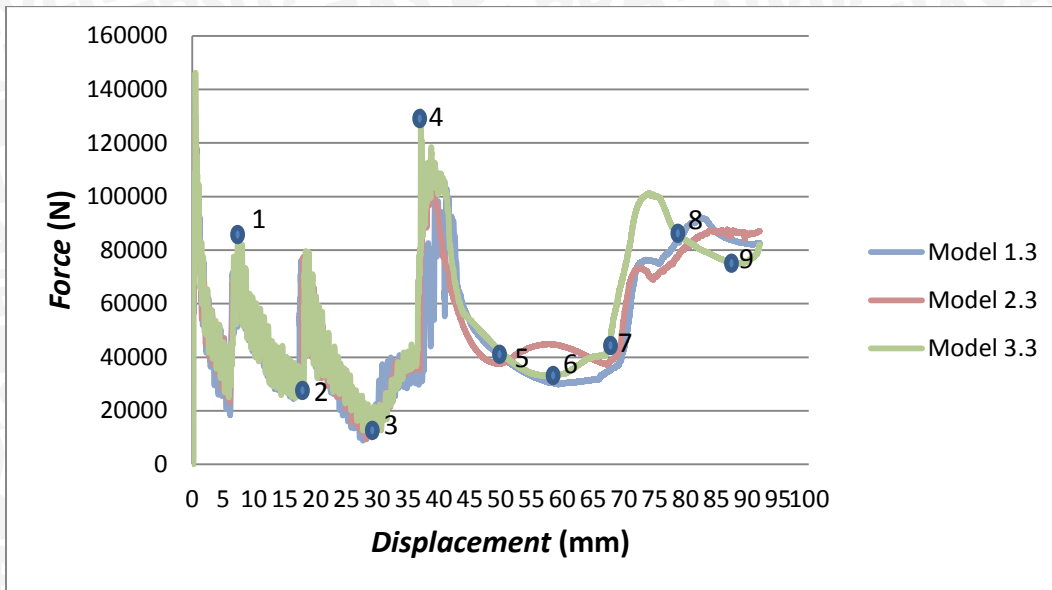


Gambar 4.7 Grafik Hubungan antara *Force* dan *Displacement* pada MSCB Dua Segmen

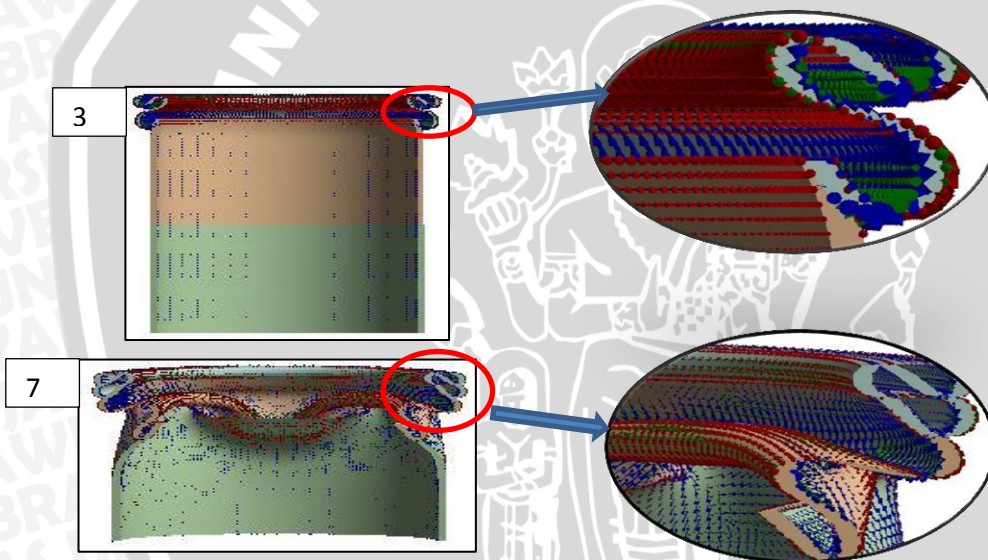


Gambar 4.8 *Vector* Tegangan pada Model 3.2 Berdasarkan *Force* pada Titik 5

Pada Gambar 4.9 ditunjukkan grafik hubungan antara *force* dan *displacement* pada MSCB tiga segmen. Dapat dilihat bahwa *force* yang terjadi pada segmen pertama cenderung stabil. Namun ketika memasuki segmen kedua yaitu pada titik 3 dan ketiga yaitu titik 7 terjadi ketidakstabil, hal ini disebabkan oleh letak titik beban antara segmen pertama, segmen kedua dan segmen ketiga berbeda. Ketidakstabilan tersebut dapat dilihat pada gambar *vector* tegangan seperti yang terlihat pada Gambar 4.10.



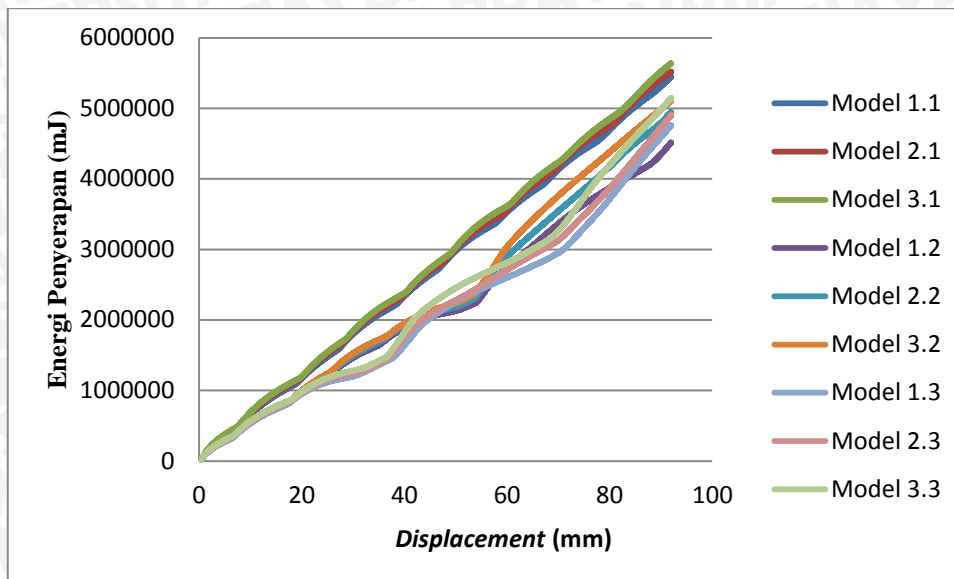
Gambar 4.9 Grafik Hubungan antara *Force* dan *Displacement* pada MSCB Tiga Segmen



Gambar 4.10 *Vector* Tegangan pada Model 3.3 Berdasarkan *Force* pada Titik 3 dan Titik 7

4.4 Energi Penyerapan *Multi Segment Crash Box*

Dengan pembagian segmen pada *crash box* mempengaruhi besar energi penyerapan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh perubahan diameter dan panjang antar segmen, sehingga beban kritis semakin semakin besar.



Gambar 4.11 Grafik Hubungan *Displacement* dan Energi Penyerapan pada Semua Model

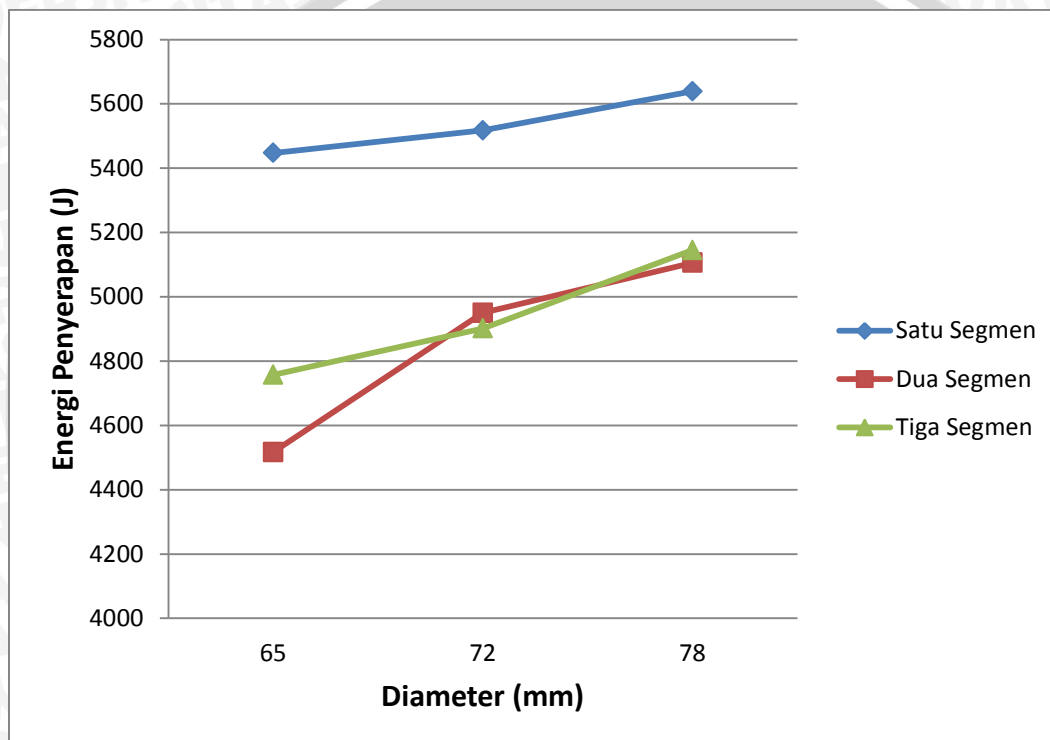
Tabel 4.4 Data *Force* dan Energi Penyerapan MSCB

Model Ke-	Pmax(N)	Pmean(N)	Eabs(J)
1.1	110080	58318.06	5447.1
1.2	105410	48782.65	4516.8
1.3	112300	53916	4757.3
2.1	126740	58785.04	5517.7
2.2	122900	55853.68	4950.1
2.3	130230	56917.32	4901.6
3.1	138770	60451.63	5639.1
3.2	137210	56857.54	5105.6
3.3	146260	59802.2	5145

Gambar 4.11 menunjukkan grafik hubungan *displacement* dan energi penyerapan pada MSCB. Grafik tersebut dibuat dengan menggabungkan grafik energi penyerapan terhadap waktu dan grafik *displacement* terhadap waktu yang didapatkan pada *software* berbasis metode elemen hingga. Dapat dilihat pada grafik energi penyerapan semakin meningkat seiring dengan pertambahan *displacement*. Pada *crash box* satu segmen kenaikan yang terjadi cenderung lurus. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya perbedaan titik beban pada *crash box*, sehingga energi penyerapan cenderung stabil. Pada *crash box* dua segmen kecenderungan kenaikan energi penyerapan lurus, namun pada saat mencapai *displacement* 60 mm terjadi lengkungan. Hal ini disebabkan oleh adanya ketidakstabilan akibat titik beban yang berbeda pada *crash box* segmen satu dan segmen dua. Pada *crash box* tiga segmen kecenderungan kenaikan energi penyerapan lurus, namun pada saat mencapai

displacement 40 mm dan 80 mm terjadi lengkungan. Hal ini disebabkan oleh titik beban yang berbeda antar segmen, sehingga menyebabkan ketidakstabilan.

Pada Gambar 4.12 menunjukkan grafik energi penyerapan pada variasi diameter. Dapat dilihat bahwa dengan jumlah segmen yang sama nilai energi penyerapan pada *crash box* berbanding lurus dengan diameter. Hal ini disebabkan pada diameter yang semakin besar nilai beban kritis juga semakin besar. Sehingga kemampuan *crash box* dalam melawan energi *impact* juga besar.



Gambar 4.12 Grafik Energi Penyerapan pada MSCB

4.5 Specific Energy Absorption

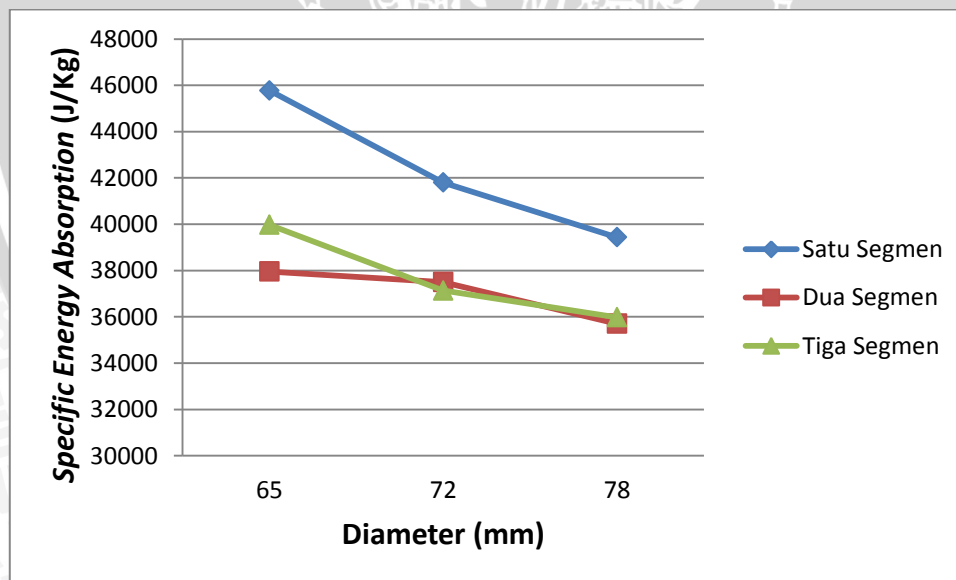
Specific energy absorber (SEA) merupakan perbandingan antara energi penyerapan terhadap massa dari *crash box*. Dalam penelitian ini massa dari *crash box* dengan diameter yang sama dibuat sama. Perhitungan nilai SEA diperlukan untuk mengetahui efek pembagian segmen pada *crash box*. Pada Tabel 4.5 menunjukkan penyerapan energi spesifik pada MSCB semua model.

Tabel 4.5 Energi Penyerapan Spesifik

Model Ke-	Pmax(N)	Pmean(N)	Eabs(J)	massa (Kg)	SEA(J/Kg)
1.1	110080	58318.06	5447.1	0.122	45773.95
1.2	105410	48782.65	4516.8	0.122	37956.3
1.3	112300	53916	4757.2	0.122	39976.47
2.1	126740	58785.04	5517.7	0.135	41800.76
2.2	122900	55853.68	4950.1	0.135	37500.76
2.3	130230	56917.32	4901.5	0.135	37132.58
3.1	138770	60451.63	5639.1	0.146	39434.27
3.2	137210	56857.54	5105.2	0.146	35700.7
3.3	146260	59802.2	5144.8	0.146	35977.62

Dari Tabel 4.5 dapat di buat diagram hubungan antara energi penyerapan spesifik terhadap diameter Gambar 4.13.

Pada Gambar 4.13 nilai energi penyerapan spesifik mengalami penurunan seiring dengan penambahan diameter dari *crash box*. Hal ini disebabkan oleh rentang kenaikan energi penyerapan lebih kecil yaitu 1.28 % dibandingkan dengan rentang kenaikan massa yaitu sekitar 9.63 %. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan semakin besar diameter *crash box* maka efektifitas energi penyerapan menurun.



Gambar 4.13 Diagram Hubungan antara Energi Penyerapan Spesifik terhadap Diameter

4.6 Crash Force Efficiency

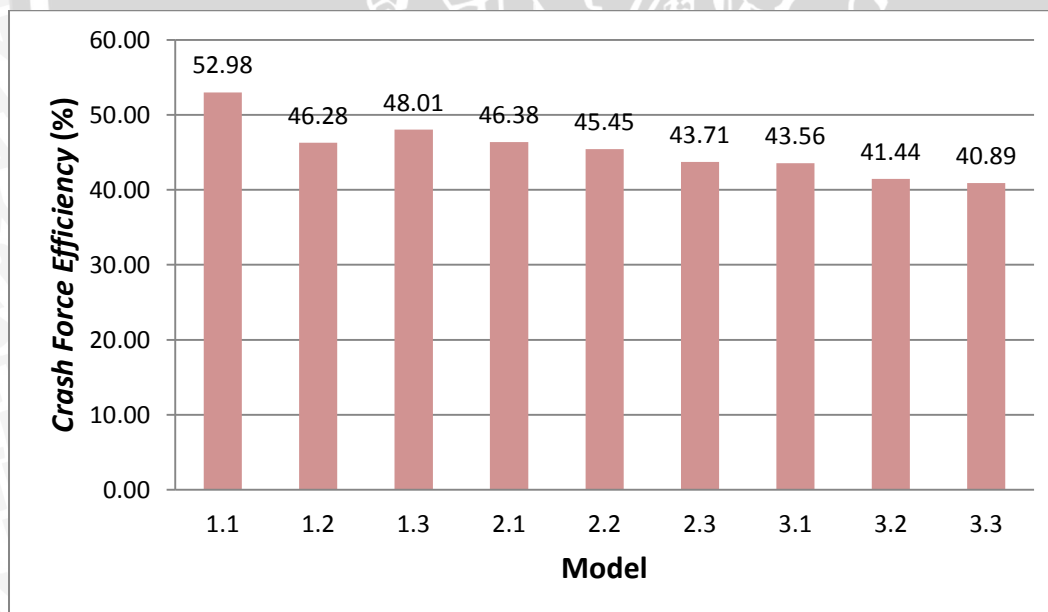
Kemampuan suatu *crash box* dalam menyerap energi dinyatakan sebagai *crash force efficiency* (CFE). CFE dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara *force reaction* rata-

rata (P_{mean}) yang merupakan rata-rata *force reaction* sepanjang *displacement* dan *force reaction* maksimum (P_{max}) yang merupakan *force reaction* paling tinggi dalam kurva *load-displacement*.

Table 4.6 *Crush force efficiency*

Model Ke-	$P_{\text{max}}(\text{N})$	$P_{\text{mean}}(\text{N})$	$E_{\text{abs}}(\text{J})$	CFE (%)
1.1	110080	58318.1	5447.1	52.98
1.2	105410	48782.7	4516.8	46.28
1.3	112300	53916	4757.2	48.01
2.1	126740	58785	5517.7	46.38
2.2	122900	55853.7	4950.1	45.45
2.3	130230	56917.3	4901.5	43.71
3.1	138770	60451.6	5639.1	43.56
3.2	137210	56857.5	5105.2	41.44
3.3	146260	59802.2	5144.8	40.89

Data dari Tabel 4.6 dapat dibuat dalam bentuk diagram batang yang ditunjukkan pada Gambar 4.14.



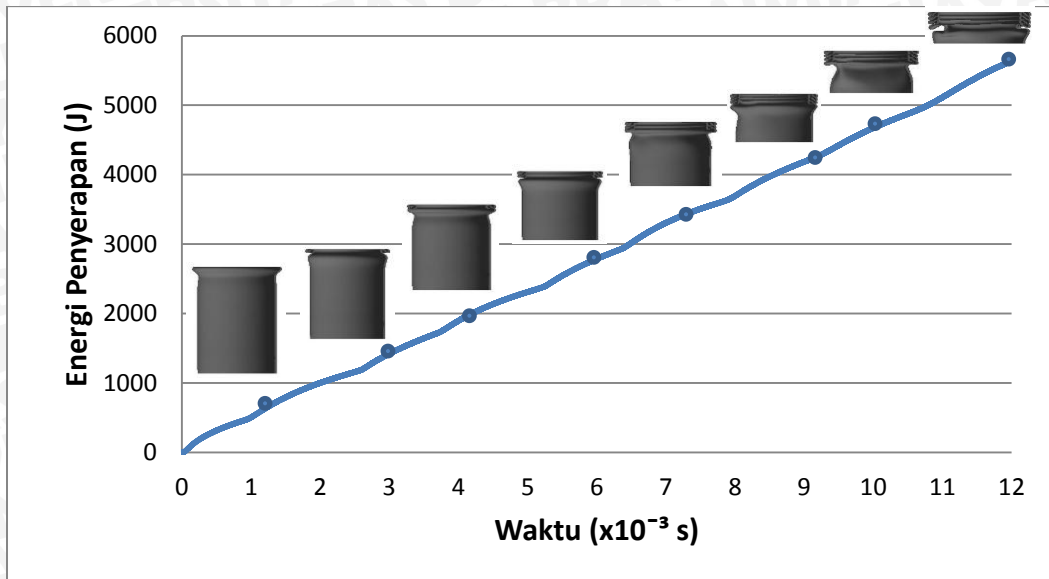
Gambar 4.14 Diagram Variasi Model MSCB Terhadap CFE

Berdasarkan Gambar 4.14 nilai tiga CFE terbesar berturut-turut yaitu pada model 1.1, model 1.3, dan model 1.2. Model-model tersebut merupakan model dengan jumlah segmen yang berbeda namun memiliki nilai diameter yang sama yaitu diameter 65 mm. Hal ini

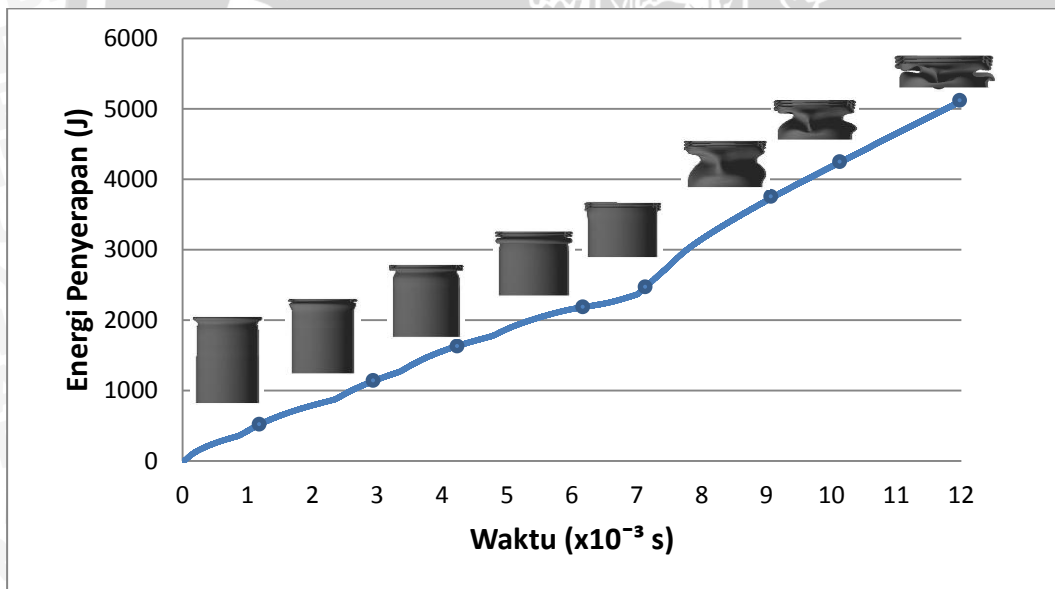
disebabkan karena diameter 65 mm memiliki kemampuan dalam melawan energi *impact* yang kecil, akibat dari kecilnya beban kritis apabila dibandingkan dengan diameter 72 mm dan diameter 78 mm. Sehingga P_{max} yang terjadi lebih kecil. Sedangkan nilai tiga CFE terkecil berturut-turut yaitu pada model 3.3, model 3.2, dan model 3.1. Model-model tersebut merupakan model dengan jumlah segmen yang berbeda namun memiliki nilai diameter yang sama yaitu diameter 82 mm. Kecilnya nilai CFE disebabkan oleh besarnya nilai P_{max} yang besar. Besarnya P_{max} disebabkan oleh beban kritis yang besar.

4.7 Hubungan Waktu dan Pembebanan terhadap Pola Deformasi dan Energi Penyerapan

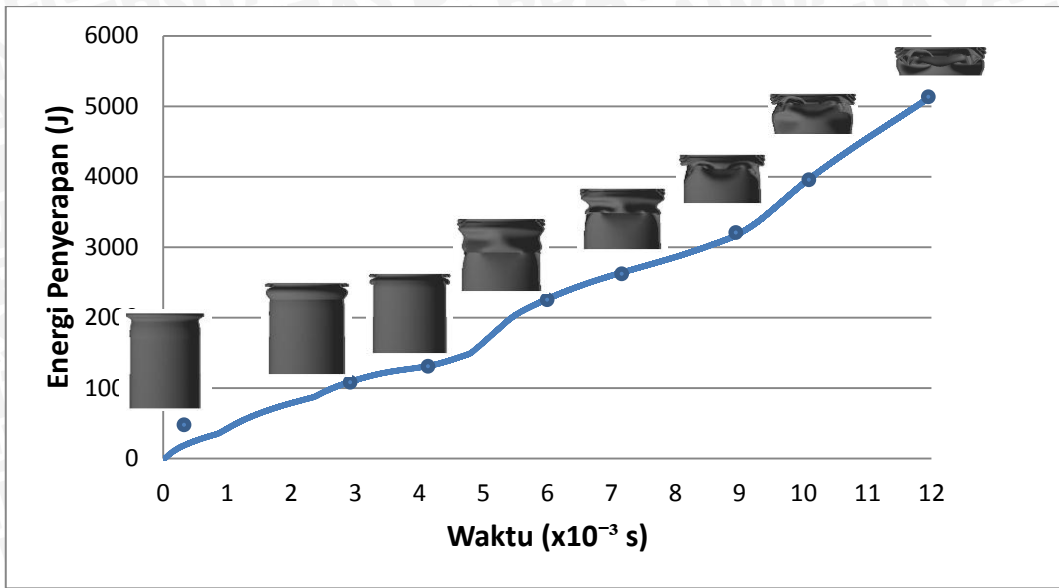
Pada Gambar 4.15 menunjukkan hubungan waktu dan pembebanan terhadap pola deformasi dan energi penyerapan model 1.3, dimana model 1.3 merupakan *crash box* satu segmen. Data pola deformasi diambil pada selang waktu 0.012 detik. Dari grafik dapat diketahui bahwa seiring dengan waktu pembebanan energi penyerapan cenderung meningkat secara linear. Namun pada model 2.3 ketika memasuki waktu 0.007 detik yaitu ketika masuk segmen berikutnya, terjadi lengkungan yang tajam. Hal ini menandakan bahwa adanya ketidakstabilan energi ketika memasuki segmen berikutnya. Begitu juga untuk model 3.3 dapat dilihat bahwa pada saat memasuki segmen berikutnya selalu terjadi lengkungan pada grafik. Sehingga karena lengkungan tersebut nilai energi penyerapan pada *crash box* dua segmen dan tiga segmen dengan diameter yang sama dengan *crash box* satu segmen, lebih rendah bila dibandingkan dengan *crash box* satu segmen.



Gambar 4.13 Grafik Hubungan Waktu dan Pembebanan terhadap Pola Deformasi dan Energi Penyerapan Model 3.1



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Waktu dan Pembebanan terhadap Pola Deformasi dan Energi Penyerapan Model 3.2



Gambar 4.15 Grafik Hubungan Waktu dan Pembebanan terhadap Pola Deformasi dan Energi Penyerapan Model 3.3

