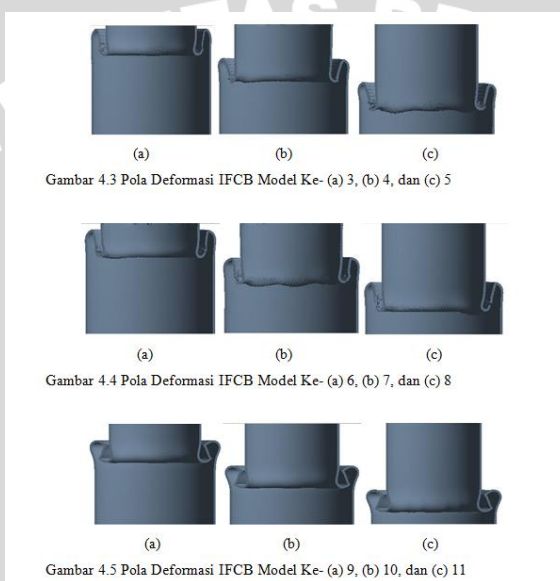


## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Verifikasi Penelitian

Ilman Fauza (2015) melakukan penelitian yang merujuk penelitian Velmurugan (2009) dengan melakukan validasi penelitian yakni membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimental sehingga dapat diketahui besarnya *error*. Berikut hasil verifikasi dari penelitian Fauza berupa pola deformasi dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan besar energi penyerapan pada Tabel 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Pola Deformasi *Crash Box* Fauza

Tabel 4.1 Data Perbandingan Verifikasi Hasil Simulasi

Variabel	Fauza (2015)	Verifikasi
$\varnothing$ (mm)	97,34	97,34
$L$ (mm)	115	115
$m$ (kg)	103	103
$t$ (mm)	1,6	1,6
$v$ (m/s)	7,67	7,67
$\delta L$ (mm)	37,002	37,2
<b><math>Ea</math> (J)</b>	<b>1.886,40</b>	<b>2.078,30</b>

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

$$Ea_{error} = \left[ \frac{(\ddot{a}-a)}{\ddot{a}} \right] \times 100 \% = \frac{(2.078,3-1.886,40)}{2.078,3} \times 100 \% = 9,23\% \quad (4-2)$$

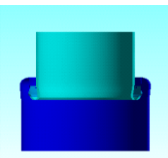


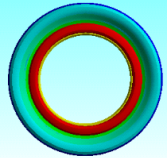
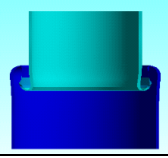
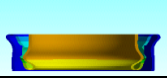

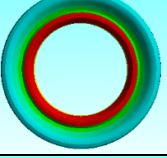
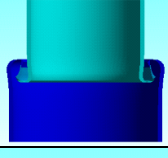
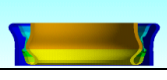

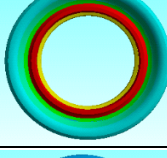
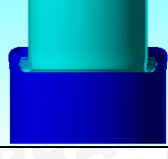


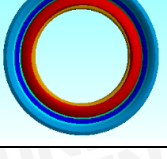


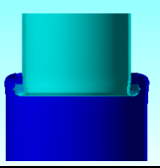
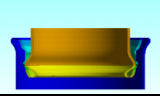

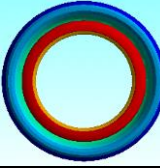
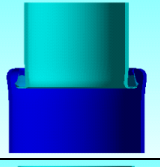
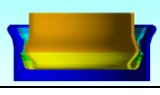

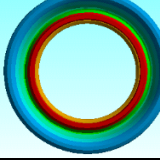
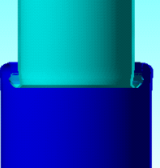
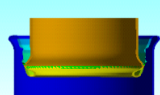
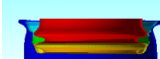
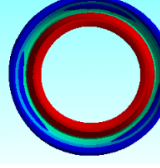
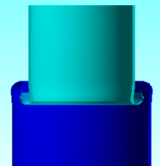


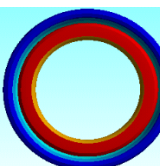
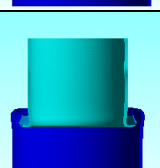


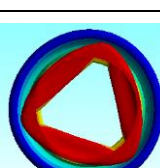
*Relative error* atau kesalahan *relative* dari energi yang diserap dan perpindahan ( $\delta$ ) pada *crash box* hasil verifikasi masing-masing sebesar 9,23% dan 0,000538%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tidak terjadi penyimpangan nilai yang cukup besar sehingga data masih bisa diterima.

#### 4.2 Pola Deformasi

*Crash box* ketika diberi pembebanan aksial mempunyai tiga peluang terjadinya pola deformasi, yaitu *concertina (axisymmetric)*, *diamond*, atau *mixed mode (axisymmetric-diamond)*. Pola deformasi pada masing-masing model didapatkan melalui pengamatan langsung yang dilakukan secara visual. Pada penelitian ini *impactor* dimodelkan menumbuk *crash box* dengan kecepatan sebesar 7,67 m/s. Dari Pada Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa pola deformasi yang terbentuk hingga akhir pembebanan yaitu hingga perpindahan sepanjang 97,71 mm didapatkan model ke-1 hingga ke-8 adalah *concertina mode*, sedangkan pola deformasi yang terbentuk pada model ke-9 adalah *diamond mode*.

Tabel 4.2 Pola Deformasi pada Masing-Masing Model

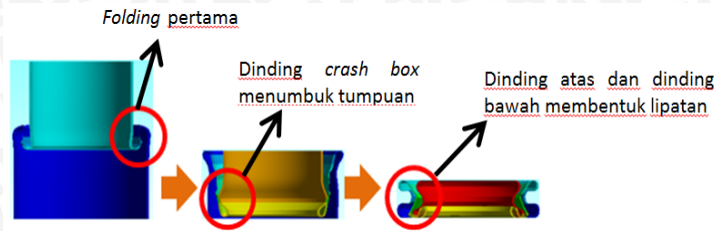
No.	Crash box	Deformasi (mm)			Tampak Atas	Pola Deformasi
		29,31	78,17	91,71		
1	Model 1 L = 115 mm t = 1,6 mm					<i>Concertina</i>
2	Model 2 L = 115 mm t = 2,0 mm					<i>Concertina</i>
3	Model 3 L = 115 mm t = 2,5 mm					<i>Concertina</i>
4	Model 4 L = 132,5 mm t = 1,6 mm					<i>Concertina</i>

5	Model 5 L = 132,5 mm t = 2,0 mm					Concertina
6	Model 6 L = 132,5 mm t = 2,5 mm					Concertina
7	Model 7 L = 150 mm t = 1,6 mm					Concertina
8	Model 8 L = 150 mm t = 2,0 mm					Concertina
9	Model 9 L = 150 mm t = 2,5 mm					Diamond

#### 4.2.1 Pola Deformasi pada Variasi Rasio Panjang dan Tebal *Initial fold Crash Box*

Penambahan *initial fold* pada *crash box* bertujuan untuk mempermudah terjadinya *folding* selama *crash* terjadi. Dengan adanya *initial fold* maka akan terjadi konsentrasi tegangan di daerah *initial fold* yang mengakibatkan *crash box* mudah mengalami *folding*. Gambar 4.2 merupakan proses terjadinya *folding* pada *crash box*. *Crash box* mengalami *folding* pertama dimulai dari bagian dalam *initial fold* yang selanjutnya diikuti oleh *folding* pada *initial fold* bagian luar. *Folding* yang terjadi pada dinding atas *initial fold crash box* menekan sisi bawah *crash box* sehingga dinding *crash box* akan membentur dan menumbuk tumpuan bawah. *Folding* kembali terjadi akibat tumbukan antar dinding *crash box* dilanjutkan dengan terjadinya *folding* bersamaan antara dinding bagian atas dan bagian bawah *crash box*.

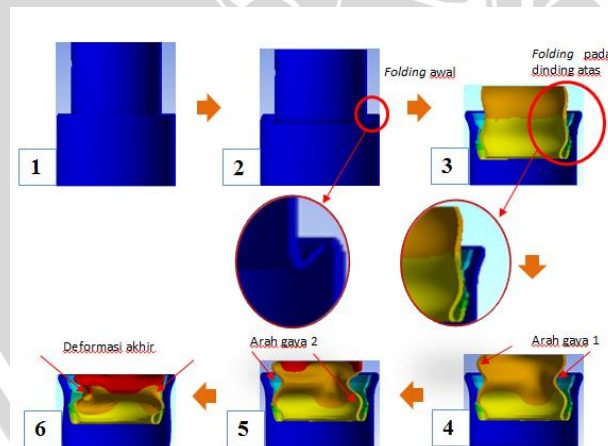




Gambar 4.2 Proses Terjadinya *Folding*

Dari Tabel 4.2 didapatkan model ke-9 memiliki pola deformasi yang berbeda dengan model yang lainnya. Pada model ke-9 pola deformasi yang terjadi adalah tipe *diamond*. Proses deformasi pada model ke-9 dapat dilihat pada gambar 4.3.

Pada saat awal pembebanan, *crash box* mengalami *folding* pada *initial fold* bagian dalam (Proses 2). Hal ini dikarenakan terjadinya konsentrasi tegangan pada daerah *initial fold*. Kemudian *crash box* akan mengalami deformasi aksial sehingga *initial fold* bagian dalam akan menarik *initial fold* bagian luar. Selanjutnya pada proses ke-3, dinding bagian atas *crash box* mulai mengalami *folding* ke arah dalam. Kemudian pada proses ke-4, arah gaya pada dinding bagian atas mulai berbeda di setiap sisinya. Ketika pembebanan dilanjutkan, kedua sisi *crash box* akan semakin tertekan dengan arah gaya yang berlainan (Proses 4). Sehingga pada saat akhir pembebanan, deformasi yang terjadi di kedua sisi dari dinding *crash box* menunjukkan pola berbeda (Proses 5).



Gambar 4.3 Proses Deformasi pada *Crash Box* Model ke-9

Pola yang berbeda pada sisi *crash box* dapat ditinjau melalui distribusi tegangan normal searah sumbu  $-x$ ,  $-y$ , dan  $-z$ . Distribusi tegangan normal yang berbeda yakni model ke-8 dengan tipe *concertina* dan model ke-9 dengan tipe *diamond* disajikan pada Tabel 4.3. Persebaran warna yang berbeda menunjukkan perbedaan nilai tegangan

normal. Pada penyajian data, distribusi tegangan normal pada arah sumbu  $-x$ ,  $-y$ , dan  $-z$  disajikan dalam bentuk potongan geometri dan tampak atas dari *crash box*. Dengan pengamatan secara visual, dapat dilihat persebaran warna yang menunjukkan besar tegangan normal pada sisi masing-masing geometri *crash box*. Pada *crash box* model ke-8 yang memiliki pola deformasi *concertina mode*, distribusi tegangan searah sumbu  $-x$  mulai dari awal terjadinya *folding* memiliki warna seragam pada tiap titik yang saling simetris atau saling berhadap. Begitu pun distribusi tegangan searah sumbu  $-y$  dan  $-z$  hingga mencapai akhir deformasi. Hal ini menunjukkan bahwa *crash box* terdeformasi secara *axysimetric*. Sedangkan pada model ke-9 yang memiliki pola deformasi *diamond* dapat dilihat bahwa persebaran warna yang berbeda pada tiap titik simetris baik searah sumbu  $-x$ ,  $-y$ , dan  $-z$  dimulai ketika mencapai deformasi mencapai 78,17 mm. Nilai tegangan normal pada tiap titik yang saling simetris atau saling berhadap berbeda sehingga pada akhir deformasi *crash box* terdeformasi secara *non-axysimetric*.

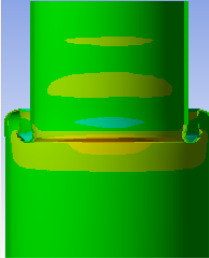
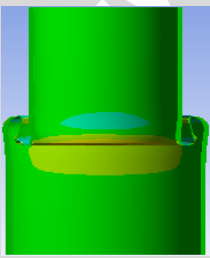
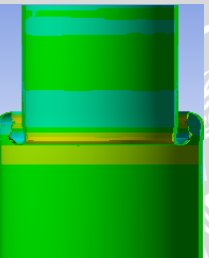
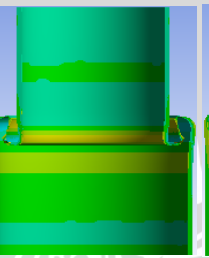
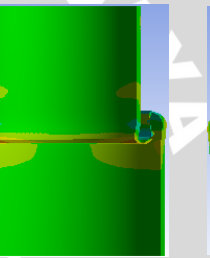
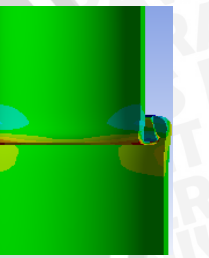
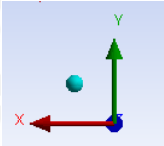
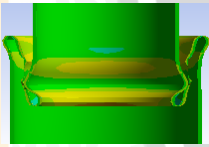
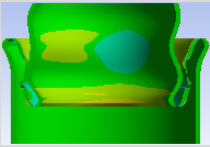
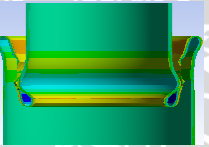
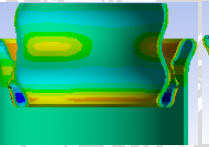
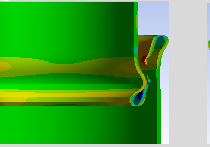
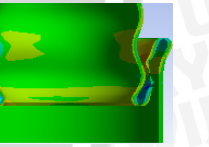
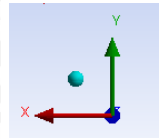
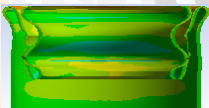
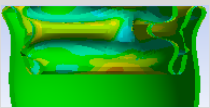

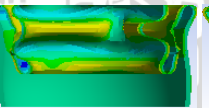
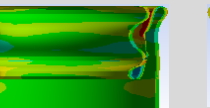
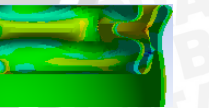
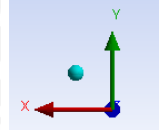
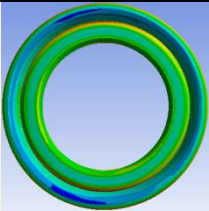
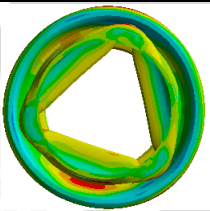
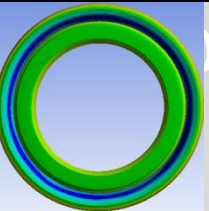
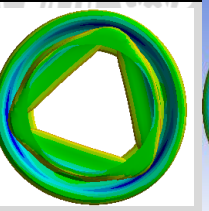
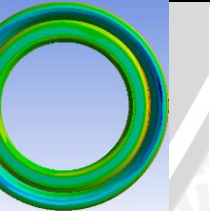
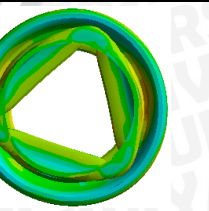
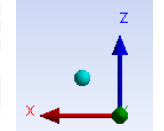
Selain distribusi tegangan pada tiap titik yang saling simetris, perbedaan pola deformasi dapat ditinjau melalui arah vektor dari tegangan yang menunjukkan arah gaya. Vektor tegangan disimbolkan oleh tanda panah yang memiliki warna berbeda. Warna merah menunjukkan bahwa pada daerah tersebut intensitas gaya tinggi, warna hijau menunjukkan intensitas gaya sedang, sedangkan warna biru menunjukkan intensitas gaya yang rendah. Data disajikan dalam bentuk potongan geometri serta tampak atas dari geometri *crash box*. Dari hasil, dapat diamati secara visual vektor dari tegangan serta intensitas tegangan.

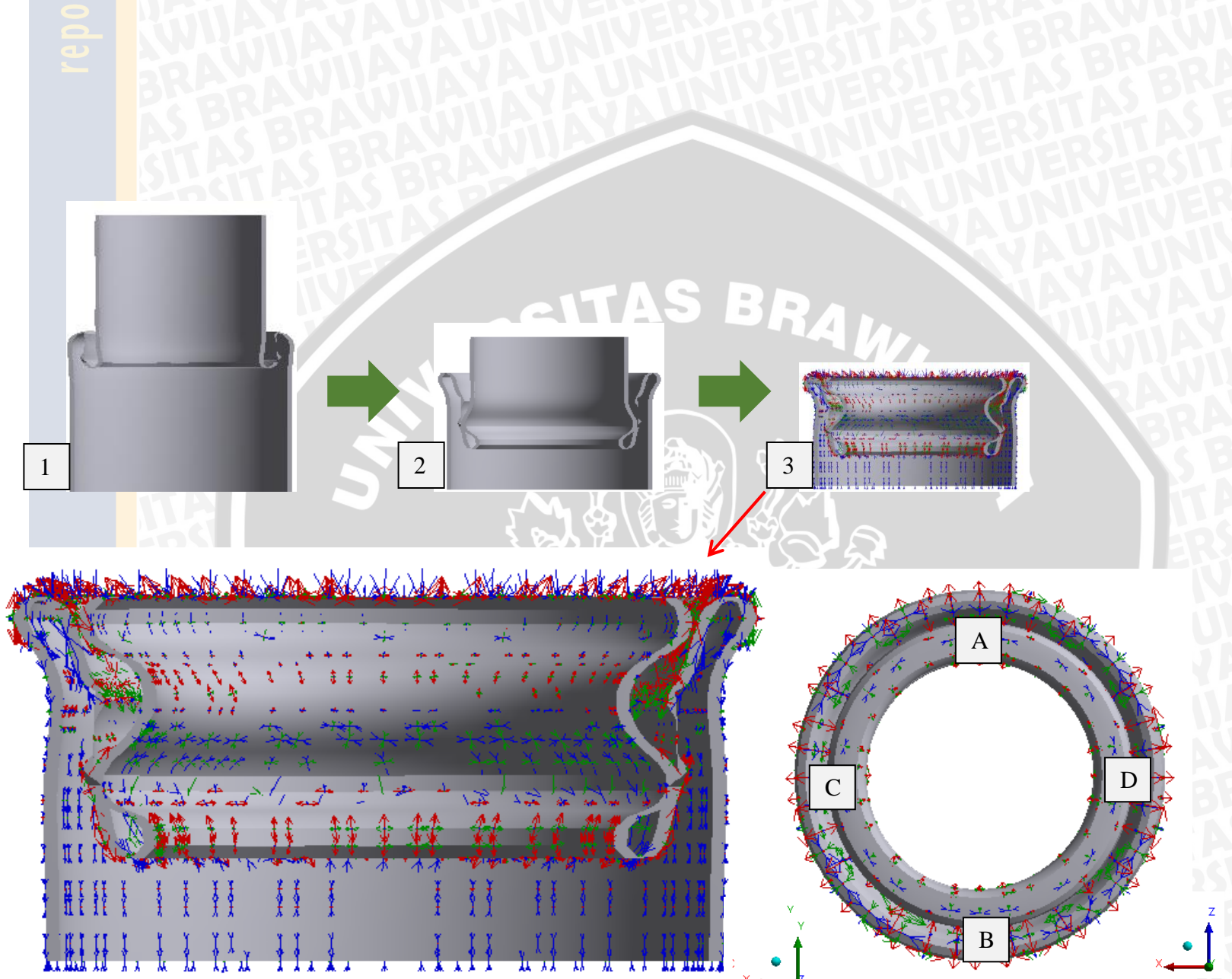
Gambar 4.4 merupakan vektor tegangan pada Model ke-8. Persebaran vektor tegangan ditandai dengan tanda panah beserta arah pada tiap titik geometri. Tampilan tampak atas geometri, ditandai dengan titik A, B, C, dan D menunjukkan sisi masing-masing geometri dengan persebaran vektor yang seragam pada tiap titik yang saling simetris. Sisi A dan B memiliki vektor tegangan yang sama namun berlawanan arah. Begitu pun dengan sisi C dan D pada masing-masing sisi memiliki vektor tegangan yang simetris sehingga memiliki pola deformasi *concertina mode*.

Berlainan dengan pola deformasi *concertina mode*, pada Gambar 4.4 merupakan vektor tegangan pada Model ke-9 dengan pola deformasi *diamond mode*. Sisi A dan B memiliki vektor tegangan yang tidak sama. Begitu pula pada sisi C dan D yang memiliki vektor tegangan berbeda.

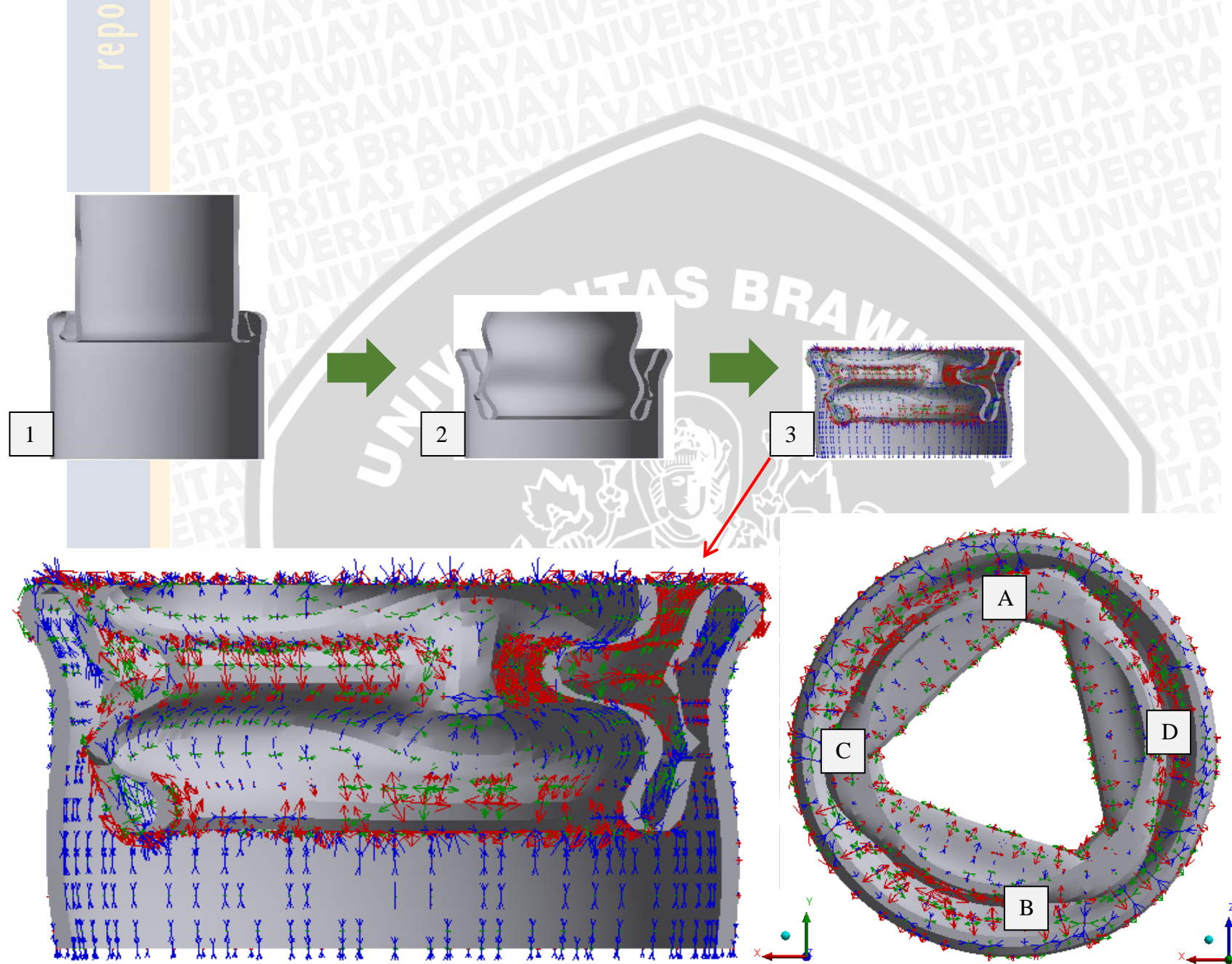


Tabel 4.3 Perbandingan Distribusi Tegangan Normal *Concertina Type* pada Model Ke-8 dan *Diamond Type* pada Model Ke-9

Deformasi ke-	Normal Stress						Sumbu Koordinat
	Sumbu -x		Sumbu -y		Sumbu -z		
	<i>Concertina</i> (Model 8)	<i>Diamond</i> (Model 9)	<i>Concertina</i> (Model 8)	<i>Diamond</i> (Model 9)	<i>Concertina</i> (Model 8)	<i>Diamond</i> (Model 9)	
29,31 mm							
78,17 mm							
97,17 mm							
Tampak Atas							



Gambar 4.4 *Vector Principle Stress* pada Model Ke-8 dengan Pola Deformasi *Concertina Mode*



Gambar 4.5 *Vector Principle Stress* pada Model Ke-9 dengan Pola Deformasi *Diamond Mode*



### 4.3 Energi Penyerapan

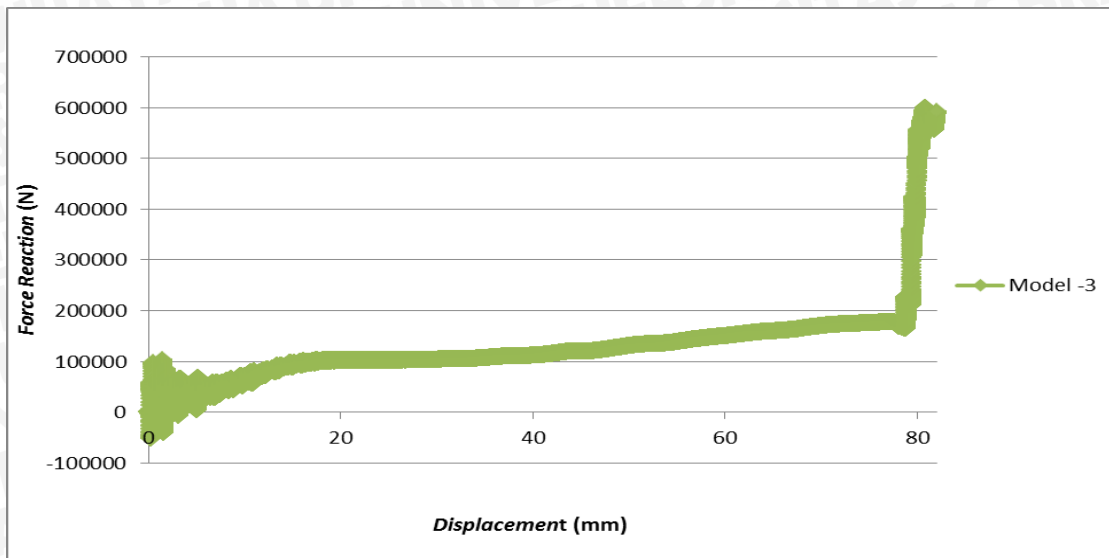
Ketika *impactor* menumbuk *crash box* maka akan terjadi gaya pada masing-masing komponen. Gaya tersebut berupa gaya aksi yang terjadi akibat pembebanan pada *impactor* dan gaya reaksi yang ditimbulkan oleh tumpuan *crash box* akibat adanya gaya aksi *impactor*. Penyerapan energi *impact* akibat tumbukan *impactor* dan *crash box* diubah menjadi deformasi plastis yang disebut sebagai energi kinetik karena dipengaruhi oleh fungsi massa dan kecepatan. Akibatnya, terjadi konversi energi *impact* menjadi energi regangan dengan mengabaikan perubahan energi ke bentuk lainnya. Besarnya energi regangan berupa deformasi plastis yang terjadi pada *crash box* disebut energi internal. Nilai dari energi internal didapatkan melalui luasan di bawah kurva hubungan gaya reaksi terhadap *displacement*, sesuai dengan persamaan (2-1). Dari hasil simulasi dengan variasi rasio panjang dan tebal *crash box* didapatkan hasil berupa internal energi, gaya reaksi, dan perpindahan akibat deformasi dari masing-masing model pada *software Ansys* dalam waktu tumbukan 0,012 detik. Data besar energi penyerapan *initial fold crash box* dengan variasi rasio panjang dan tebal ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi

<i>Crash box</i>	Perpindahan (mm)	Rasio (L/t)	Energi Penyerapan (J)
Model 1	78,17	71,88	4.715,28
Model 2	78,17	57,50	6.659,55
<b>Model 3</b>	<b>78,17</b>	<b>46</b>	<b>9.459,24</b>
Model 4	78,17	82,81	4.486,67
Model 5	78,17	66,25	6.457,83
Model 6	78,17	53	9.305,87
Model 7	78,17	93,75	4.485,7
Model 8	78,17	75	6.451,96
Model 9	78,17	60	9.249,97

Berdasarkan data pada Tabel 4.4 menunjukkan besar energi yang diserap pada masing-masing model. Nilai energi penyerapan terbesar terdapat pada *crash box* model ke-3 sebesar 4.715,28 Joule. Besarnya energi penyerapan dipengaruhi oleh peningkatan panjang dan tebal dari *crash box*. Model ke-3 memiliki panjang *crash box* sebesar 115 mm dan tebal sebesar 2,5 mm. Dari seluruh variasi model yang ada model ke-3 merupakan model terpendek dengan tebal yang paling besar. Hal ini menyebabkan kekakuan struktur pada model ke-3 lebih besar dibandingkan model lainnya sehingga pada saat terjadinya proses deformasi akan membutuhkan energi yang lebih besar.

Grafik hubungan antara *force reaction* dan *displacement* model ke-3 dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Hubungan *Force Reaction* dan *Displacement* Model ke-3

Dari Grafik 4.6 dapat dilihat gaya reaksi yang diberikan *crash box* semakin meningkat seiring dengan perpindahan yang terjadi. Kurva dimulai dengan naiknya gaya reaksi awal hingga mencapai maksimum awal ( $P_{peak}$ ) lalu turun kemudian mulai meningkat hingga akhir deformasi. Naiknya nilai gaya awal disebabkan karena adanya *folding* pertama, dibutuhkan gaya yang lebih besar untuk melakukan deformasi pada *crash box*. Pada grafik terjadi kenaikan gaya yang sangat signifikan saat perpindahan di atas 78,17 mm disebabkan terjadinya tumbukan antara dinding *crash box* dengan tumpuan. Hal ini menyebabkan gaya reaksi yang diberikan oleh tumpuan semakin besar. Untuk itu, data yang diambil berupa besar energi penyerapan adalah data sebelum terjadinya tumbukan dengan tumpuan agar didapatkan hasil yang valid.



#### 4.3.1 Pengaruh Variasi Rasio Panjang dan Tebal Terhadap Energi Penyerapan pada *Initial Fold Crash Box*

Seiring dengan pertambahan panjang dan tebal yang berbeda pada *crash box* maka didapatkan rasio panjang dan tebal yang berbeda pula pada masing-masing model. Semakin kecil rasio panjang dan tebal *crash box* maka struktur *crash box* akan semakin kaku sehingga energi penyerapan menjadi lebih maksimal.

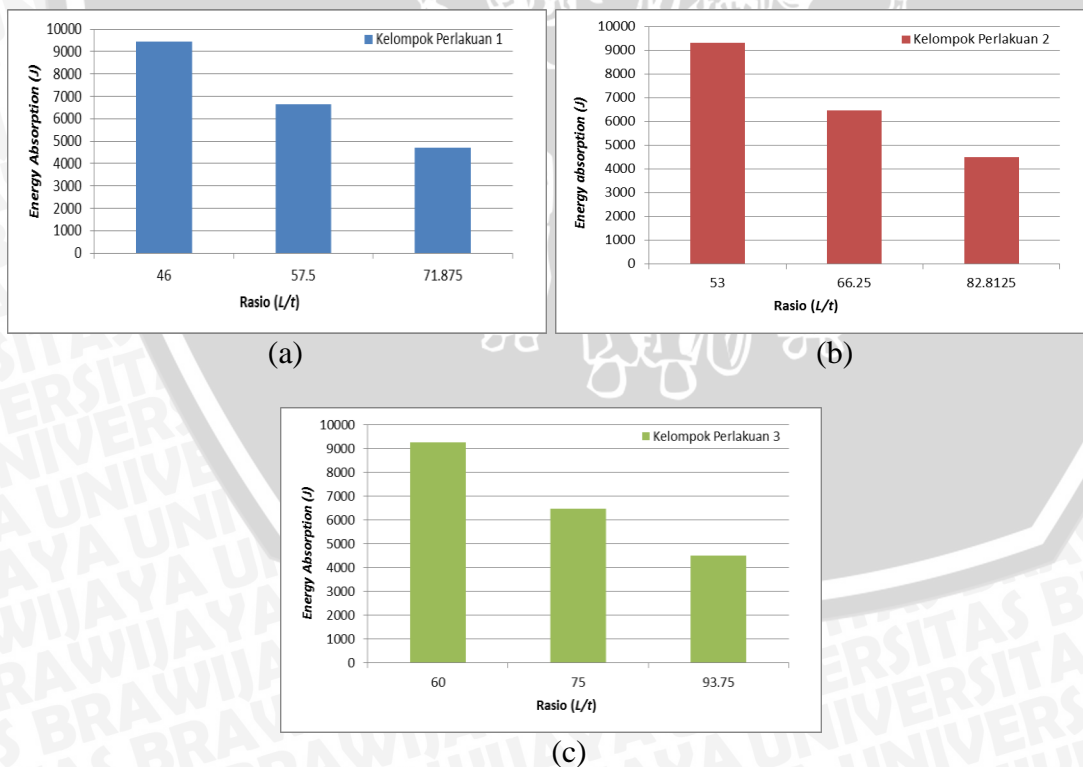
Pada penelitian ini, peletakan *initial fold* berada tepat di tengah panjang total dari *crash box*. Hal ini menyebabkan perhitungan rasio panjang dan tebal *crash box* terbagi menjadi tiga kelompok perlakuan data. Kelompok perlakuan pertama adalah rasio panjang dan tebal dari *crash box* dengan nilai panjang tetap sebesar 115 mm. Kelompok perlakuan kedua berupa rasio panjang dan tebal *crash box* dengan nilai panjang tetap sebesar 132,5 mm. Pada kelompok perlakuan ketiga berupa rasio panjang dan tebal dengan nilai panjang terbesar yaitu 150 mm. Selanjutnya besar energi penyerapan *crash box* akan dibandingkan pada masing-masing kelompok perlakuan sehingga didapatkan penarikan kesimpulan dari semua model. Perbandingan hasil energi penyerapan tidak dilakukan pada seluruh model secara bersamaan dikarenakan dimensi peletakan *initial fold* yang berbeda pada masing-masing panjang *crash box*. Untuk penelitian lebih lanjut disarankan menggunakan peletakan *initial fold* tetap dengan nilai dimensi yang sama. Data hasil energi penyerapan dengan rasio panjang dan tebal diurutkan dari nilai rasio terkecil pada masing-masing kelompok perlakuan dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Energi penyerapan *Crash Box* dengan Rasio Panjang dan Tebal pada Masing-Masing Kelompok Perlakuan

<i>Crash box</i>	Rasio (L/t)	Energi Penyerapan (J)	Kelompok perlakuan
Model 3	46	9.459,24	Panjang 115 mm (1)
Model 2	57,50	6.659,55	
Model 1	71,88	4.715,28	
Model 6	53	9.305,87	Panjang 132,5 mm (2)
Model 5	66,25	6.457,83	
Model 4	82,81	4.486,67	
Model 9	60	9.249,97	Panjang 150 mm (3)
Model 8	75	6.451,96	
Model 7	93,75	4.485,7	



Berdasarkan data pada Tabel 4.5 menunjukkan besar energi penyerapan pada masing-masing variasi. Dapat dilihat bahwa pada masing-masing kelompok perlakuan, semakin kecil nilai rasio ( $L/t$ ) maka nilai energi penyerapan semakin besar. Pada kelompok perlakuan pertama, nilai energi penyerapan dari yang terbesar adalah model dengan nilai rasio ( $L/t$ ) dari yang terkecil yaitu 46 ; 57,50 ; dan 71,88. Ketiga model tersebut secara berurutan adalah model ke-3, 2, dan 1. Nilai dari ketiga model tersebut secara berurutan adalah 9.459,24 ; 6.659,55 ; dan 4.715,28 Joule. Pada kelompok perlakuan kedua, nilai energi penyerapan dari yang terbesar adalah model dengan nilai rasio ( $L/t$ ) dari yang terkecil yaitu 53 ; 66,25 ; dan 82,81. Ketiga model tersebut secara berurutan adalah model ke-6, 5, dan 4 dengan nilai energi penyerapan 9.305,87 ; 6.457,83 ; dan 4.486,67 Joule. Begitu pula pada kelompok perlakuan ketiga, nilai energi penyerapan terbesar pada model dengan nilai rasio ( $L/t$ ) terkecil yaitu pada model ke-9. Besarnya nilai energi penyerapan dari yang terbesar adalah model dengan nilai rasio ( $L/t$ ) dari yang terkecil yaitu 60 ; 75 ; dan 93,75. Ketiga model tersebut secara berurutan adalah model ke- 9, 8, dan 7 dengan nilai energi penyerapan 9.249,97 ; 6.451,96 ; dan 4.485,7 Joule. Pengaruh rasio ( $L/t$ ) terhadap nilai energi penyerapan pada masing-masing kelompok perlakuan dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 : Diagram Rasio ( $L/t$ ) Terhadap Energi Penyerapan (a) Kelompok Perlakuan 1 (b) Kelompok Perlakuan 2, dan (c) Kelompok Perlakuan 3

Gambar 4.7 menunjukkan diagram batang pengaruh rasio ( $L/t$ ) terhadap energi penyerapan pada masing-masing kelompok perlakuan. Kelompok perlakuan pertama pada gambar 4.7 (a) menunjukkan bahwa semakin energi penyerapan semakin meningkat dengan rasio ( $L/t$ ) yang semakin kecil. Begitu pula pada kelompok perlakuan kedua pada gambar 4.7 (b) dan kelompok perlakuan pada gambar 4.7 (c). Perbandingan nilai rasio ( $L/t$ ) didapatkan dari perbandingan panjang dan tebal *crash box*. Dengan nilai panjang yang sama namun tebal berbeda maka momen inersia luasan dari penampang *crash box* akan berbeda pula. Nilai momen inersia yang bervariasi mempengaruhi nilai kekakuan yang sesuai dengan persamaan (4-3). Kekakuan pada struktur mempengaruhi besarnya energi penyerapan yang dapat dituliskan dalam persamaan (4-4) sebagai berikut :

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (\text{Gere, 2004})(4-3)$$

$$P = k\delta \quad (\text{Sears, 1962})(4-4)$$

Keterangan :

- $k$  : Kekakuan (N/m)  
 $E$  : Modulus Elastisitas ( $\text{N/m}^2$ )  
 $I$  : Momen Inersia ( $\text{m}^4$ )  
 $P$  : Gaya (N)  
 $\delta$  : Perpindahan akibat deformasi (m)

Berdasarkan persamaan (4-3), dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai momen inersia luasan penampang dengan panjang yang sama maka kekakuan semakin meningkat. Kekakuan sebanding dengan kemampuan menahan gaya ( $P$ ) yang menyebabkan terjadinya deformasi. Semakin besar kemampuan menahan gaya yang bekerja pada *crash box* maka energi yang mampu diserap juga semakin besar.



#### 4.4 Energi Penyerapan Spesifik

Energi penyerapan spesifik adalah ukuran yang menyatakan energi yang diserap oleh *crash box* per satuan massa. Besaran ini perlu dihitung karena dalam penelitian ini peningkatan panjang dan tebal *crash box* meningkatkan massa *crash box*. Tabel 4.6 menunjukkan besar massa masing-masing model dengan besar energi penyerapan spesifik.

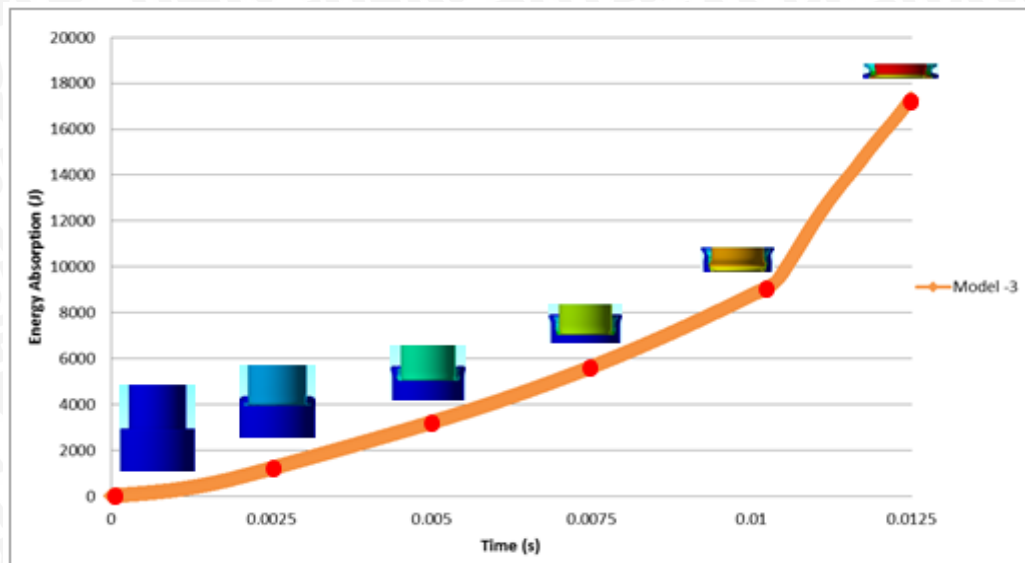
Tabel 4.6 Massa dan Energi Penyerapan Spesifik pada Seluruh Model

No.	<i>Crash box</i>	Massa (kg)	Energi (kJ)	Penyerapan energi Spesifik (kJ/kg)
1	Model 1	0,432	4,71	10,90
2	Model 2	0,537	6,65	12,38
<b>3</b>	<b>Model 3</b>	<b>0,667</b>	<b>9,45</b>	<b>14,16</b>
4	Model 4	0,492	4,48	9,11
5	Model 5	0,612	6,45	10,54
6	Model 6	0,760	9,30	12,23
7	Model 7	0,552	4,48	8,11
8	Model 8	0,687	6,45	9,39
9	Model 9	0,853	9,24	10,83

*Crash box* dengan panjang 115 mm dan tebal 2,5 mm memiliki nilai penyerapan energi spesifik paling besar dengan nilai 14,16 kJ/kg. *Crash box* dengan variasi panjang 115 mm dan tebal 2,5 mm memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan tebal 1,6 mm dan 2,0 mm. Dengan adanya peningkatan tebal pada *crash box*, penyerapan energi spesifik memiliki nilai berbeda dengan selisih yang kecil pada panjang yang sama. *Crash box* dengan panjang 115 mm dan variasi tebal 1,6 ; 2,0 ; dan 2,0 mm pada model ke-1, 2, dan 3 memiliki energi penyerapan secara berurutan 10,90 ; 12,38 ; dan 14,16 kJ/kg. Hal ini menunjukkan peningkatan tebal pada *crash box* mempengaruhi peningkatan massa yang cukup signifikan pada *crash box*. Sedangkan dengan adanya peningkatan panjang *crash box*, nilai penyerapan energi spesifik menunjukkan penurunan nilai. *Crash box* dengan tebal 1,6 mm dan variasi panjang 115 ; 132,5 ; dan 150 mm pada model ke-1, 4, dan 7 memiliki energi penyerapan spesifik secara berurutan 10,90 ; 9,11 ; dan 8,11 kJ/kg. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan panjang mempengaruhi peningkatan massa *crash box* yang tidak sebanding dengan peningkatan nilai energi penyerapan.



#### 4.5 Grafik Waktu, Pola Deformasi, dan Energi penyerapan



Gambar 4.8 Grafik Waktu Pembebanan Terhadap Pola Deformasi dan Energi Penyerapan pada Model ke-3

Gambar 4.8 menunjukkan grafik waktu pembebanan terhadap pola deformasi dan energi penyerapan pada model ke-3. Data pola deformasi diambil pada selang waktu selama 0,025 detik yaitu hingga perpindahan akibat deformasi mencapai 97,71 mm. Pada grafik dapat diamati bahwa seiring dengan lamanya waktu pembebanan, nilai energi penyerapan cenderung meningkat. Pada saat mulai terjadi *folding* pertama kurva cenderung membentuk garis lengkung dengan sedikit lekukan. Hal ini menandakan bahwa untuk melakukan *folding* pertama dibutuhkan gaya yang lebih besar.

Kemudian selang waktu antara 0,025 sampai 0,01 detik kecenderungan grafik meningkat lebih tajam dikarenakan setelah *crash box* terdeformasi dibutuhkan waktu yang lebih cepat dan energi yang lebih besar untuk melakukan *folding* pada dinding bagian bawah *crash box*.

Selain itu, pada saat 0,01 detik kurva mulai membentuk garis lengkung dengan adanya lekukan yang lebih tajam dari sebelumnya. Dari pola deformasi yang diamati pada waktu tersebut, *crash box* mengalami *folding* akibat tumbukan antara dinding *crash box* dengan tumpuan dari *crash box*. Hal ini menandakan gaya yang dibutuhkan untuk melakukan *folding* pada saat terjadi tumbukan dengan tumpuan sangat besar.