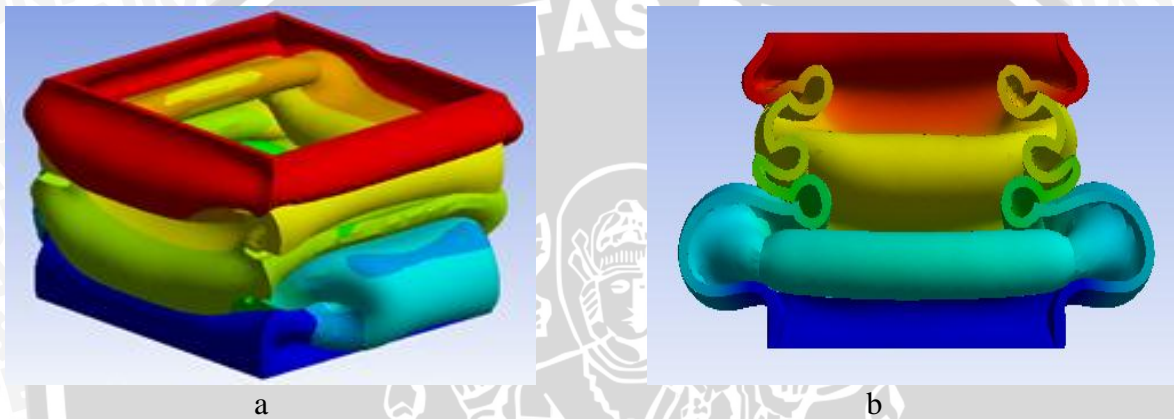


BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

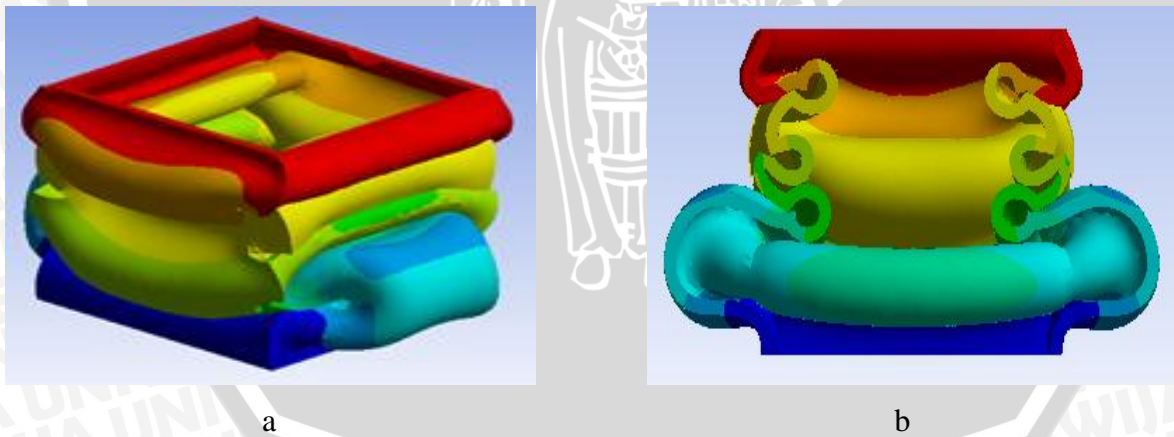
4.1 Hasil

4.1.1 Pola Deformasi *Crash Box*

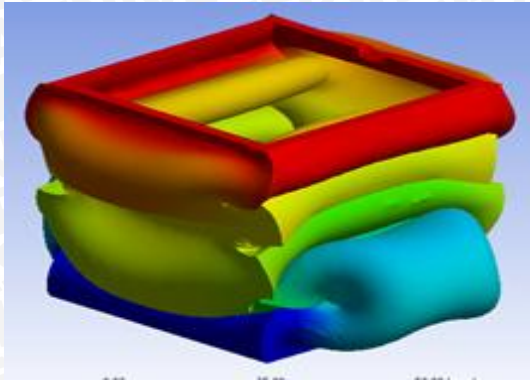
Pola deformasi *crash box* ditampilkan untuk masing-masing *crash box* seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



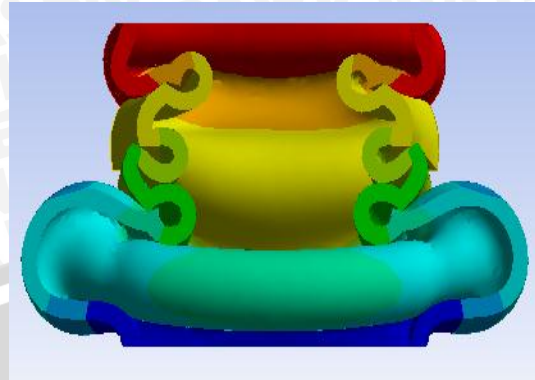
Gambar 4.1 *Crash box* lekukan radius dan t 1,5 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang



Gambar 4.2 *Crash box* lekukan radius dan t 2 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang

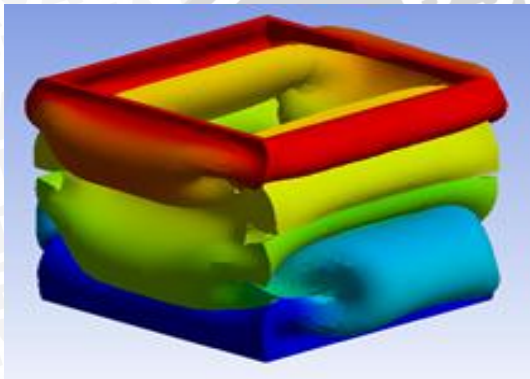


a

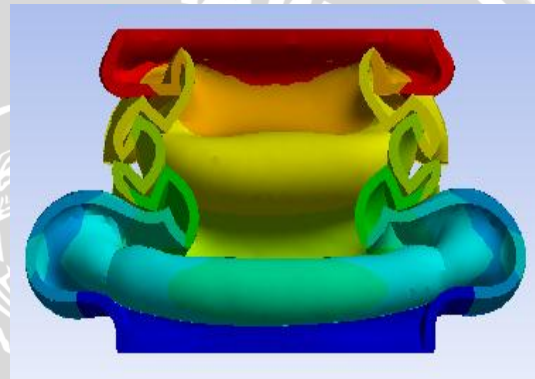


b

Gambar 4.3 Crash box lekukan radius dan t 2,5 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang

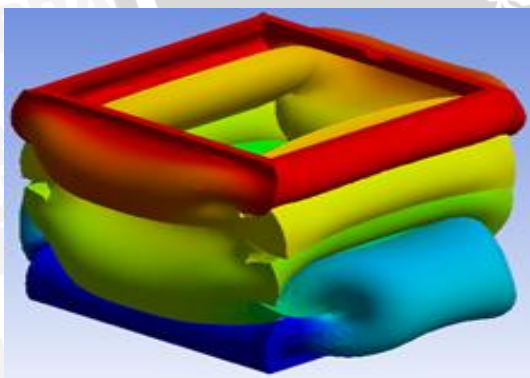


a

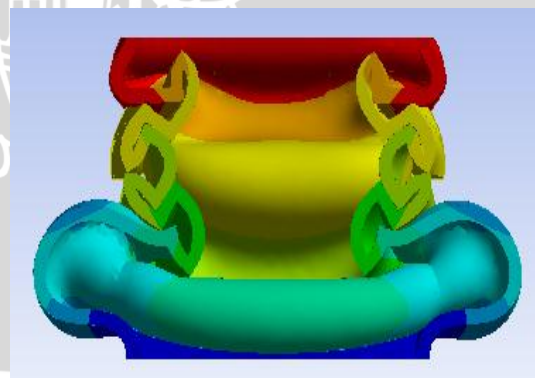


b

Gambar 4.4 Crash box lekukan persegi dan t 1,5 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang

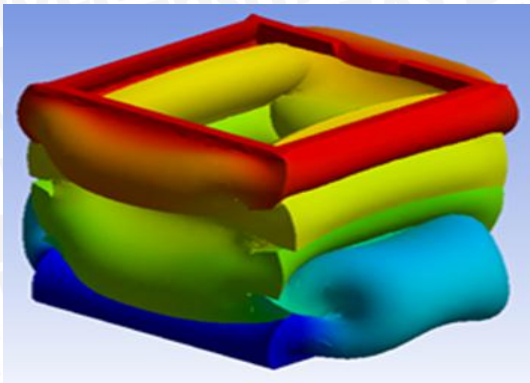


a

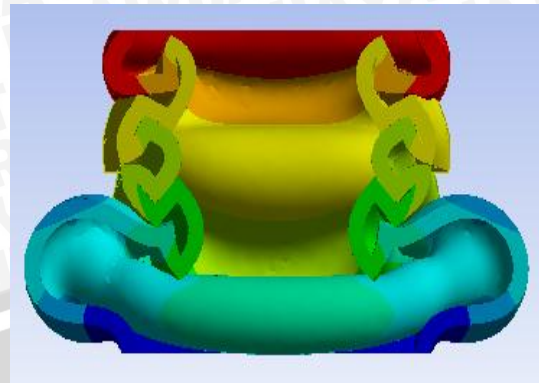


b

Gambar 4.5 Crash box lekukan persegi dan t 2 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang

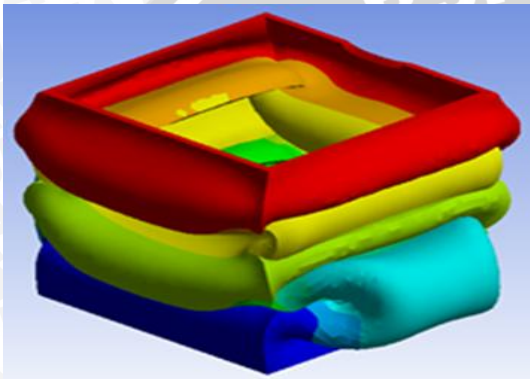


a

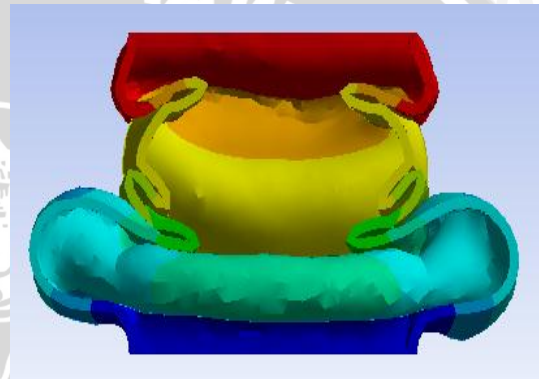


b

Gambar 4.6 Crash box lekukan persegi dan t 2,5 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang

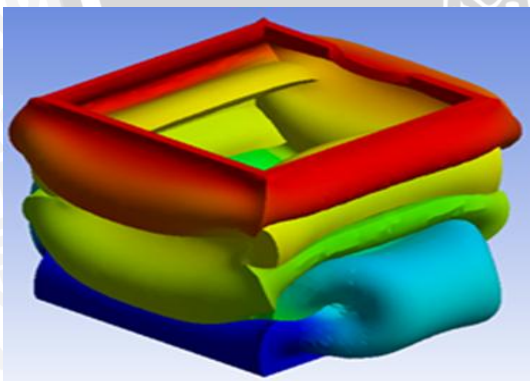


a

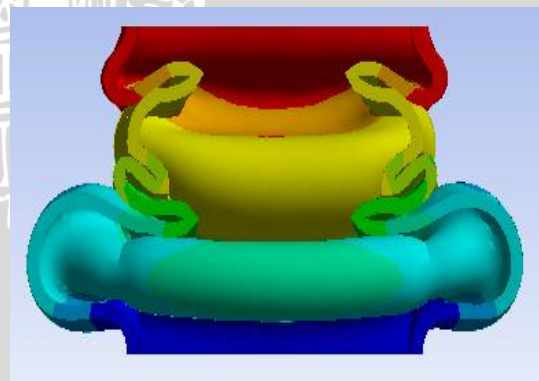


b

Gambar 4.7 Crash box lekukan sudut dan t 1.5 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang

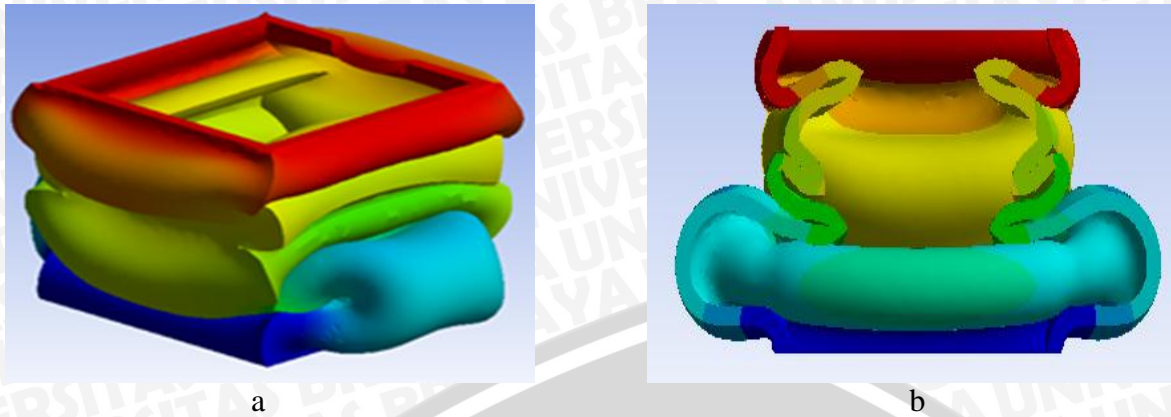


a



b

Gambar 4.8 Crash box lekukan sudut dan t 2 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang



Gambar 4.9 *Crash box* lekukan sudut dan t 2,5 mm (a) tampak isometri (b) tampak potongan melintang

Pola deformasi yang terjadi untuk seluruh *crash box* adalah pola aksial, ditunjukkan dengan adanya lipatan-lipatan pada dinding *crash box* yang *Asymmetric* dengan mode *concertina*.

4.1.2 Penyerapan Energi *Crash Box*

Data penyerapan energi oleh *crash box* dengan variasi tebal dinding dan model lekukan ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1

Data penyerapan energi *crash box*

Model ke-n	δ (mm)	Penyerapan Energi (J)
1	77,78	4822,42
2	77,78	8282,90
3	77,78	13092,97
4	77,78	5197,49
5	77,78	8778,84
6	77,78	13932,46
7	77,78	4661,28
8	77,78	8120,09
9	77,78	12845,85

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan oleh tabel 4.1 *crash box* yaitu model ke-6 dengan tebal dinding 2,5 mm dan lekukan persegi memiliki penyerapan energi paling besar yaitu 13932,46 J. Dan model ke-7 dengan tebal dinding 1,5 dan lekukan sudut memiliki penyerapan energi paling kecil yaitu 4661,28 J.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pola Deformasi *Crash Box*

Menurut tinjauan pustaka, terdapat 3 macam pola deformasi sebuah *Crash Box* yaitu *concertina*, *diamond*, dan *mixed mode*. Pada penelitian ini, dilakukan pengamatan pada pola deformasi *crash box* dengan melihat bentuk akhir pada seluruh hasil simulasi *crash box*.

Secara umum pola deformasi yang terjadi untuk seluruh *crash box* telah sesuai dengan yang dikemukakan oleh A. Eyvazian et al (2014) dengan dinding yang bergelombang diperoleh hasil pola deformasi yang dapat diprediksi dan terkendali karena diharapkan terjadi lipatan pada lekukan. maka yang terjadi adalah pola *concertina* yang memiliki kemampuan penyerapan energi yang lebih baik. Karena dengan adanya lekukan pada dinding ini digunakan sebagai *crush initiator*.

Tabel 4.2
Data mode deformasi akhir *crash box*

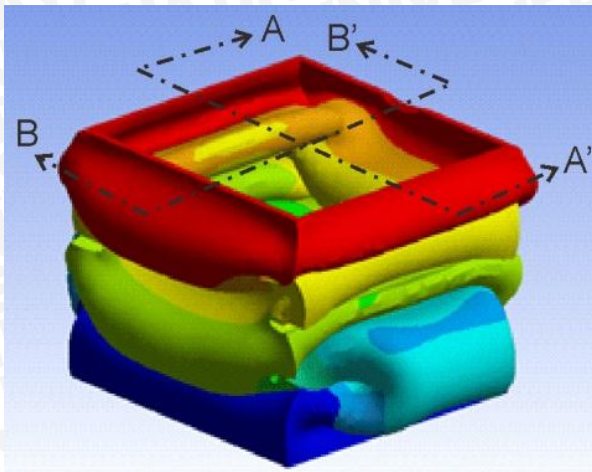
Model ke-n	Aksial		
	<i>Concertina</i>	<i>Diamond</i>	<i>Mixed</i>
1	√	-	-
2	√	-	-
3	√	-	-
4	√	-	-
5	√	-	-
6	√	-	-
7	√	-	-
8	√	-	-
9	√	-	-

Pada tabel 4.2 menunjukkan bahwa mode deformasi yang terbentuk adalah mode *concertina*. Meskipun semua membentuk mode *concertina* tetapi memiliki model lipatan yang berbeda dan jumlah lipatan yang berbeda.

4.2.2 Pengaruh Model Lekukan Terhadap Pola Deformasi *Crash Box*

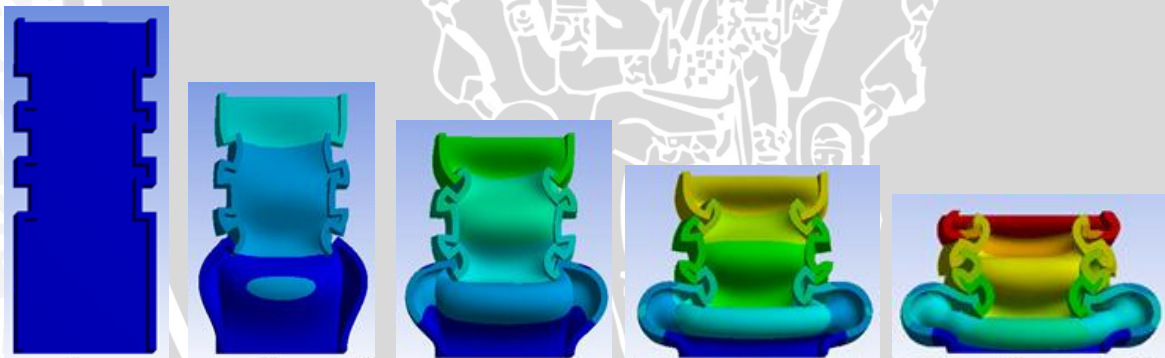
Penambahan lekukan pada *crash box* bertujuan untuk mempermudah terjadinya *folding* selama *crash* terjadi. Dengan adanya lekukan maka akan terjadi konsentrasi tegangan di daerah lekukan dengan harapan terjadi lipatan di daerah lekukan. Secara visual distribusi tegangan dapat dilihat melalui persebaran warna yang berbeda yang menunjukkan perbedaan nilai tegangan. Untuk bisa mengamati lipatan dan distribusi

tegangan maka dilakukan pemotongan melintang agar dapat melihat tegangan yang terjadi pada lekukan yang mengalami *folding*.



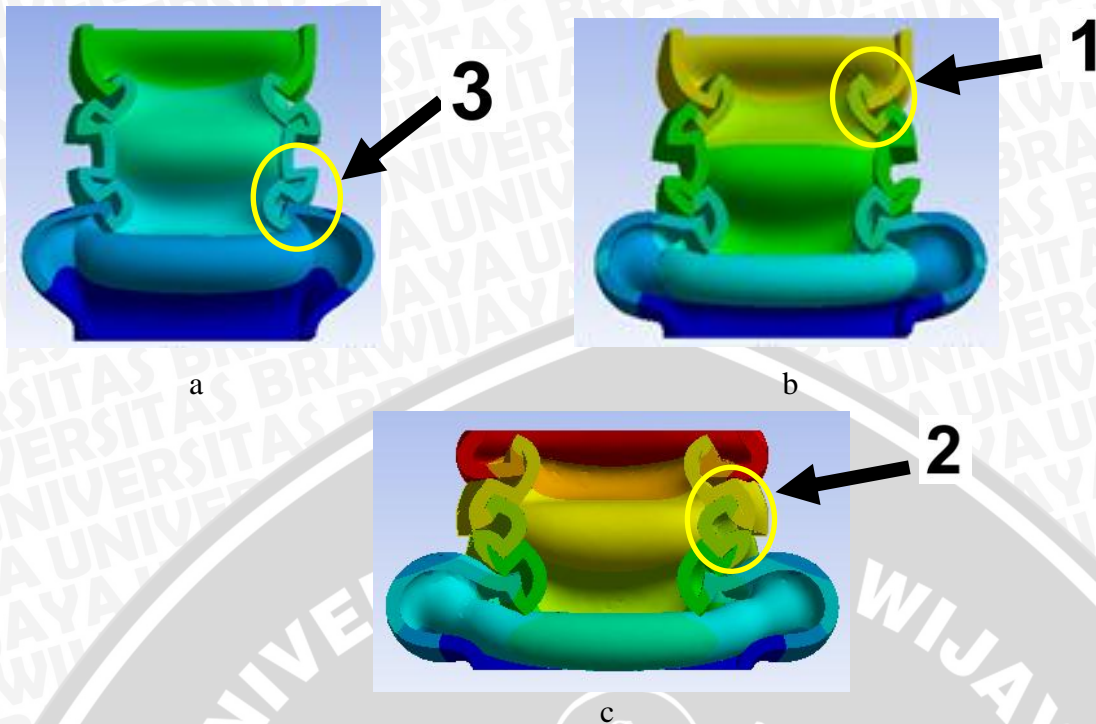
Gambar 4.10 Potongan melintang

Pada potongan sumbu A-A' digunakan untuk melihat model lipatan yang terjadi pada lekukan dan pada potongan B-B' digunakan untuk melihat distribusi tegangan yang terjadi pada daerah yang mengalami lipatan.

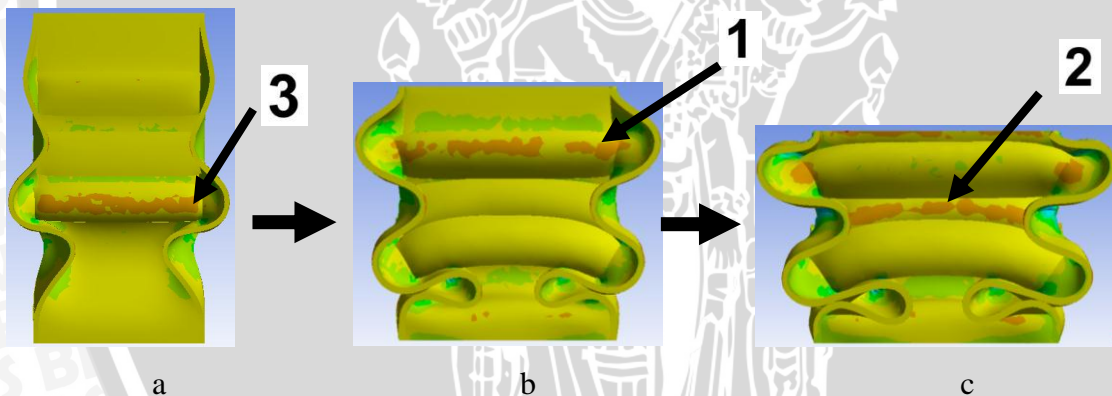


Gambar 4.11 Proses deformasi *crash box* lekukan persegi dengan tebal 1,5

Pada gambar 4.11 menunjukkan proses deformasi *crash box* dengan lekukan persegi dengan tebal 1,5. Terlihat bahwa *crash box* mengalami lipatan pertama pada lekukan yang ke-3. Seiring dengan proses deformasi, lipatan terjadi lagi pada lekukan yang ke-1 dan lipatan yang terakhir terjadi pada lekukan yang ke-2. Jadi pada model lekukan persegi proses lipatan terjadi secara acak.



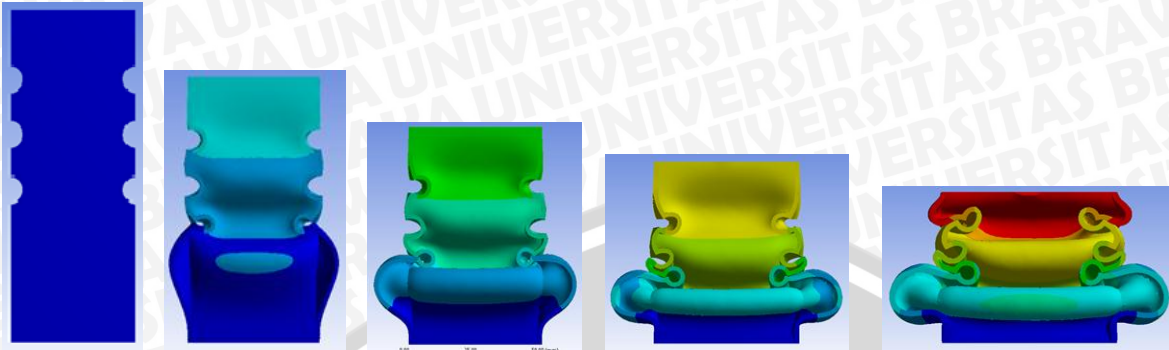
Gambar 4.12 Potongan sumbu A-A' lipatan pada *crash box* lekukan persegi dengan tebal 1,5 (a) lekukan ke-3 (b) lekukan ke-1 (c) lekukan ke-2



Gambar 4.13 Potongan sumbu B-B' Distribusi tegangan normal searah sumbu -y *crash box* lekukan persegi dengan tebal 1,5

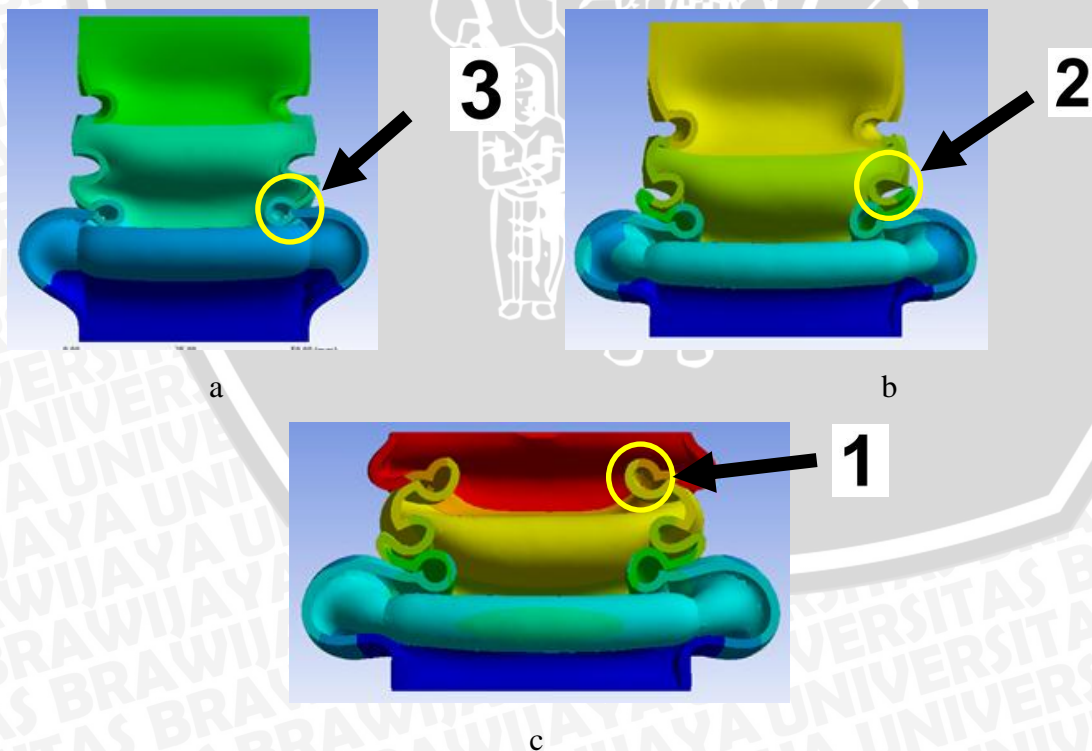
Dengan pemotongan sumbu B-B' dapat dilakukan pengamatan secara visual, terjadinya distribusi tegangan yang terjadi daerah yang mengalami lipatan. Pada gambar 4.13 (a) memiliki warna yang berbeda pada daerah lekukan ke-3 yang menunjukkan nilai tegangan normal yang berbeda pada daerah yang lain sehingga lipatan terjadi pada lekukan ke-3 lebih dulu. Lipatan terjadi lagi pada lekukan ke-1 dapat dilihat pada gambar (b) yang memiliki warna berbeda pada daerah lekukan ke-1 yang menunjukkan nilai tegangan normal yang berbeda dari daerah lain sehingga lipatan terjadi. Dan lipatan terakhir terjadi

pada lekukan ke-2 dan dapat dilihat pada gambar (c) yang memiliki perbedaan warna pada daerah lekukan ke-2.

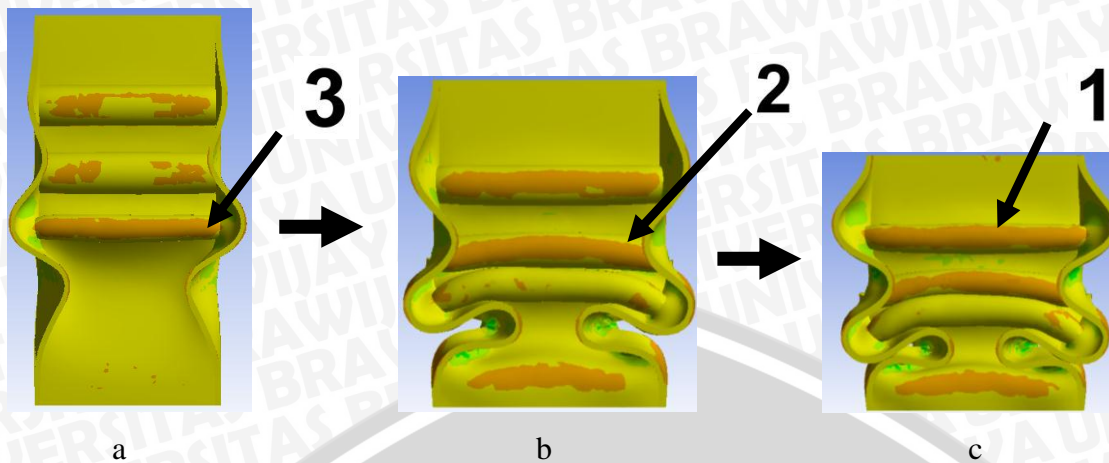


Gambar 4.14 Proses deformasi pada *crash box* lekukan radius dengan tebal 1,5

Pada gambar 4.14 menunjukkan hasil deformasi *crash box* dengan lekukan radius. Terlihat bahwa *crash box* mengalami lipatan pertama pada lekukan yang ke-3. Seiring dengan proses deformasi, lipatan kedua terjadi pada lekukan yang ke-2 dan lipatan yang terakhir terjadi pada lekukan yang ke-1. Jadi pada model lekukan radius mengalami proses lipatan secara berurutan mulai dari lekukan ke-3, ke-2 dan lipatan terakhir pada lekukan ke-1. Proses lipatan pada sisi *crash box* dapat ditinjau melalui distribusi tegangan normal searah sumbu $-y$.

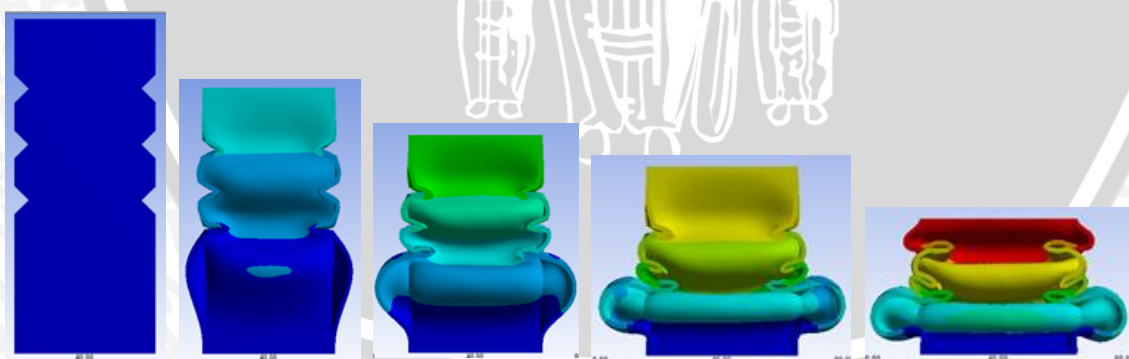


Gambar 4.15 Potongan sumbu A-A' Lipatan pada *crash box* lekukan radius dengan tebal 1,5 (a) lekukan ke-3 (b) lekukan ke-2 (c) lekukan ke-1



Gambar 4.16 Potongan sumbu B-B' Distribusi tegangan normal searah sumbu -y pada *crash box* lekukan radius dengan tebal 1,5

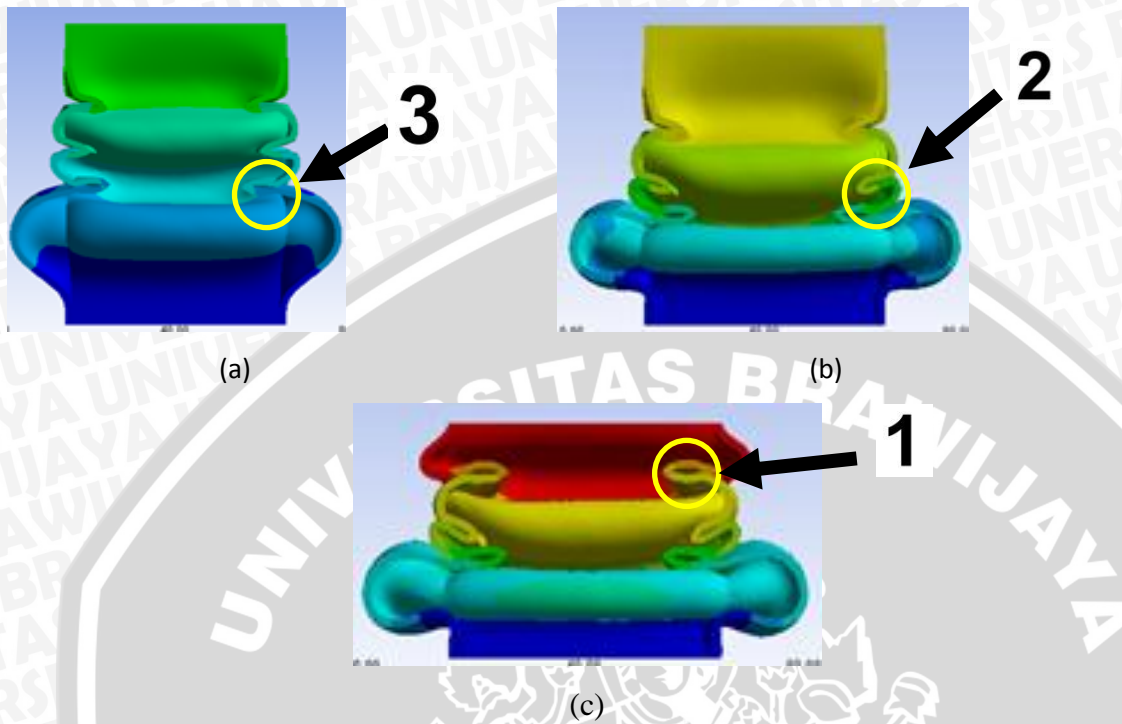
Hal ini terjadi karena perbedaan nilai tegangan yang berbeda pada setiap titik persebaran warna yang berbeda menunjukkan perbedaan nilai tegangan. Dengan pengamatan secara visual, dapat dilihat persebaran warna pada gambar 4.16. Pada gambar (a) memiliki warna yang berbeda pada daerah lekukan ke-3 yang menunjukkan nilai tegangan normal yang berbeda pada daerah yang lain sehingga lipatan terjadi pada lekukan ke-3 lebih dulu. Lipatan terjadi lagi pada lekukan ke-2 dapat dilihat pada gambar (b) yang memiliki warna berbeda pada daerah lekukan ke-2 yang menunjukkan nilai tegangan normal yang berbeda dari daerah lain sehingga lipatan terjadi. Dan lipatan terakhir terjadi pada lekukan ke-1 dan dapat dilihat pada gambar (c) yang memiliki perbedaan warna pada daerah lekukan ke-1.



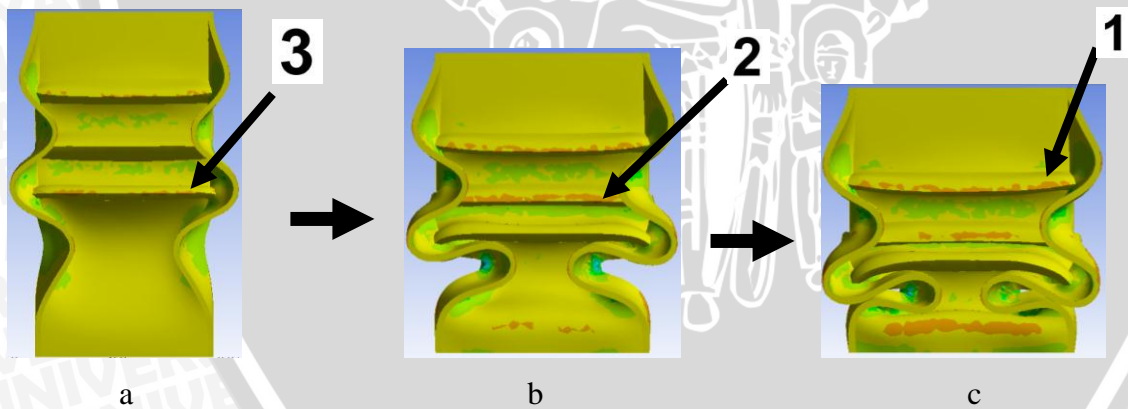
Gambar 4.17 Proses deformasi pada *crash box* lekukan sudut dengan tebal 1,5

Pada gambar 4.17 menunjukkan proses deformasi *crash box* dengan lekukan sudut. Terlihat bahwa *crash box* mengalami lipatan pertama pada lekukan ke-3 dan lipatan kedua terjadi pada lekukan yang ke-2 dan lipatan yang terakhir terjadi pada lekukan yang ke-1. Jadi pada model lekukan sudut mengalami proses lipatan secara berurutan mulai dari

lekukan ke-3, ke-2 dan lipatan terakhir pada lekukan ke-1. Tetapi pada saat lipatan ke-3 terjadi, terlihat pada lekukan ke-2 dan ke-1 hampir bersamaan terjadi lipatan.



Gambar 4.18 Potongan sumbu A-A' Lipatan pada *crash box* lekukan sudut dengan tebal 1,5 (a) lekukan ke-3 (b) lekukan ke-2 (c) lekukan ke-1

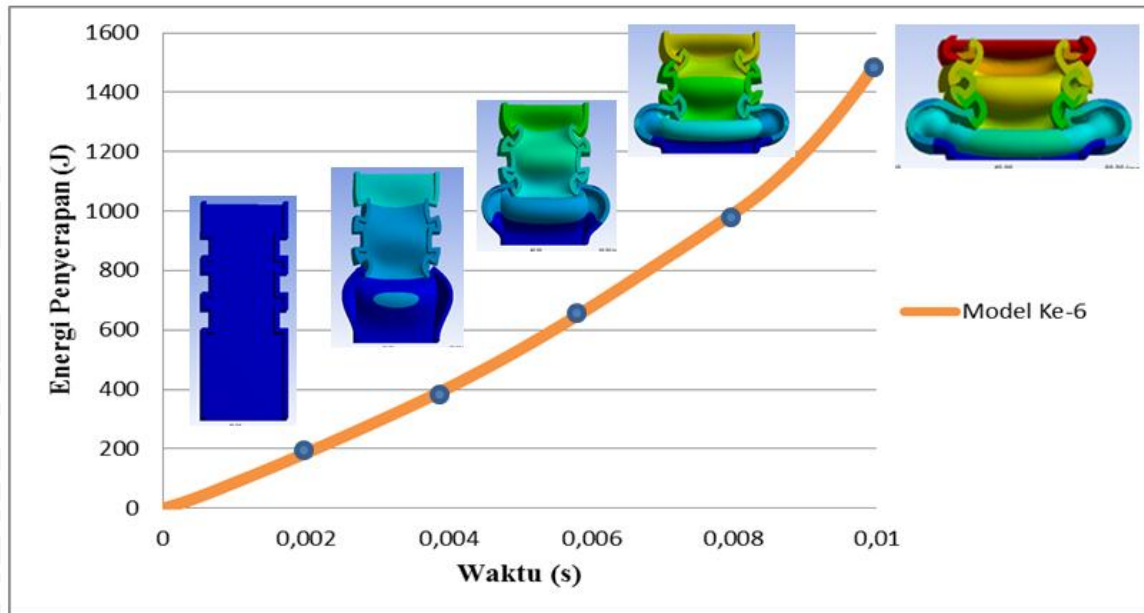


Gambar 4.19 Potongan sumbu B-B' Distribusi tegangan normal searah sumbu $-y$ pada *crash box* lekukan sudut dengan tebal 1,5

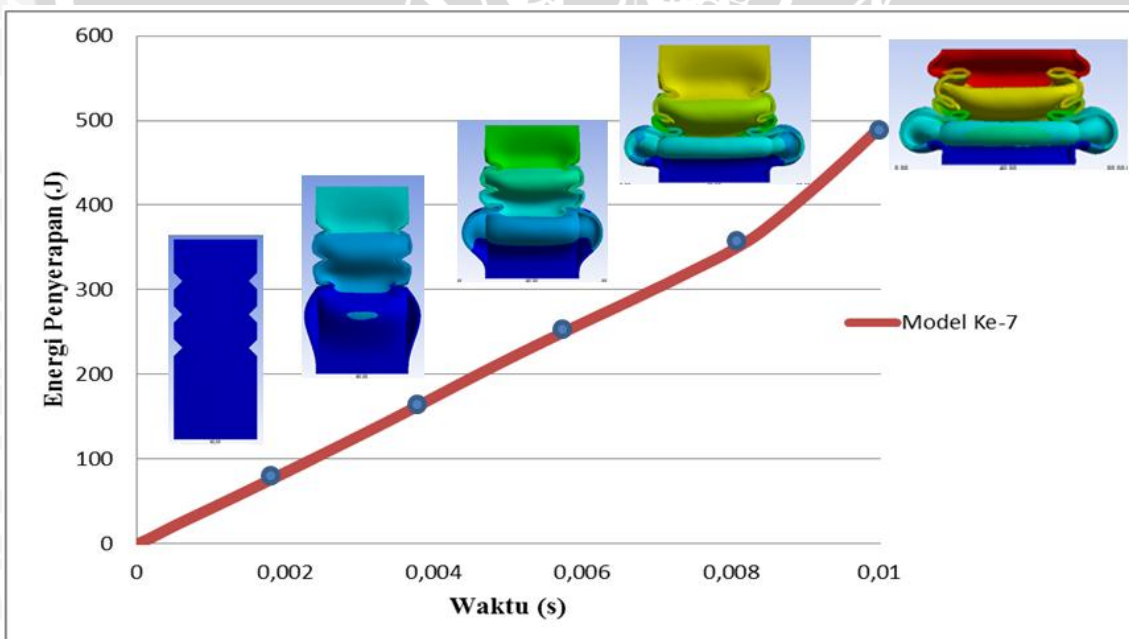
Dengan pengamatan secara visual, dapat dilihat persebaran warna pada gambar 4.19 yang menunjukkan perbedaan nilai tegangan normal. Pada gambar (a) memiliki warna yang berbeda pada daerah lekukan ke-3 yang menunjukkan nilai tegangan normal yang berbeda pada daerah yang lain sehingga lipatan terjadi pada lekukan ke-3 lebih dulu. Lipatan terjadi lagi pada lekukan ke-2 dapat dilihat pada gambar (b) yang memiliki warna

berbeda pada daerah lekukan ke-2 yang menunjukkan nilai tegangan normal yang berbeda dari daerah lain sehingga lipatan terjadi. Dan lipatan terakhir terjadi pada lekukan ke-1 dan dapat dilihat pada gambar (c) yang memiliki perbedaan warna pada daerah lekukan ke-1.

4.2.3 Grafik Waktu Pembebanan Terhadap Pola Deformasi dan Penyerapan Energi



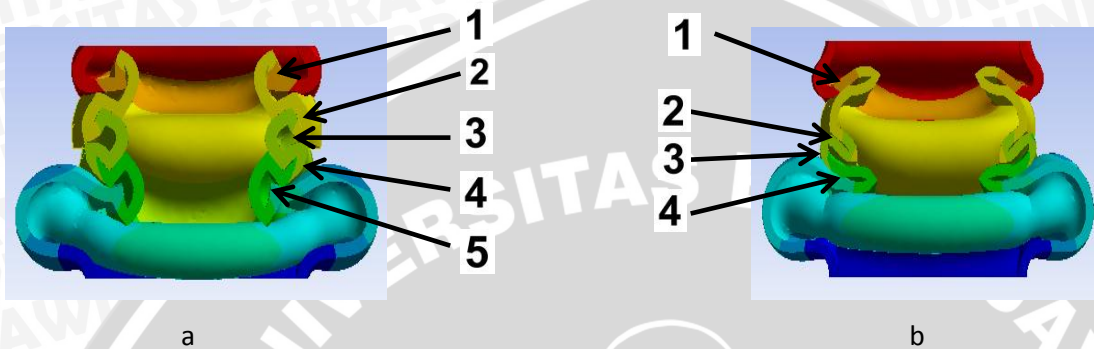
(a)



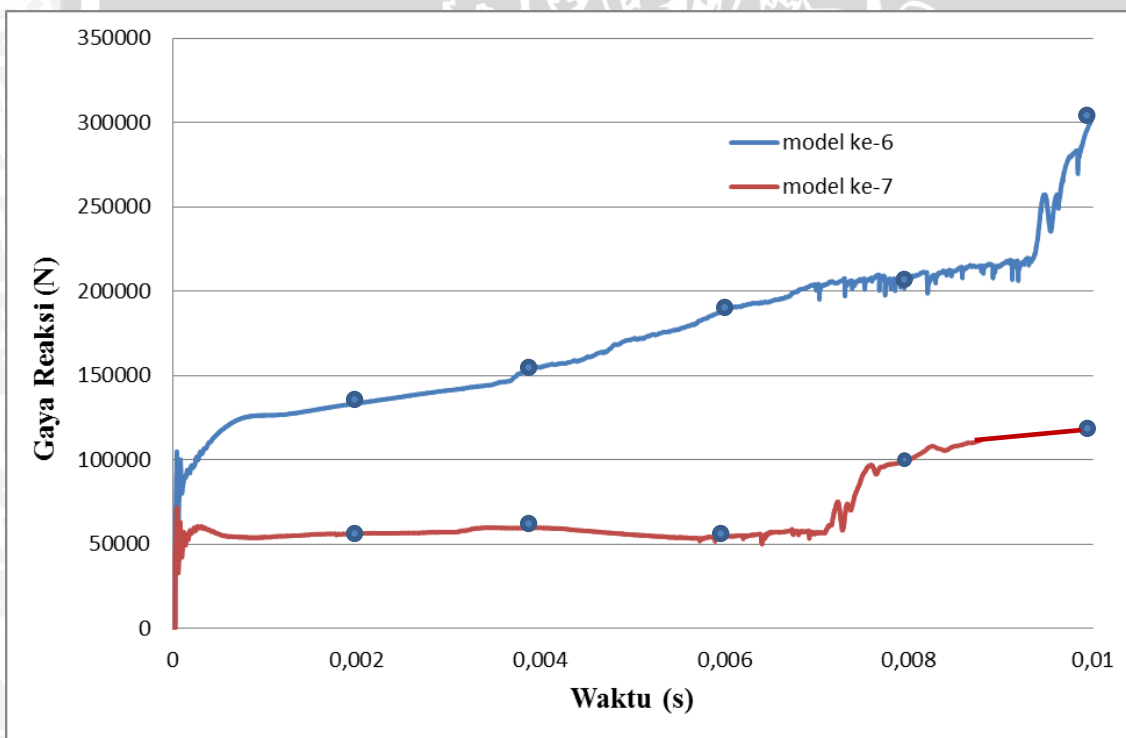
(b)

Gambar 4.20 Proses deformasi *crash box* (a) Proses deformasi *crash box* cekungan persegi (b) proses deformasi *crash box* cekungan segitiga

Gambar 4.20 menunjukkan perbedaan waktu pembebanan terhadap pola deformasi dan energi penyerapan pada selang waktu 0,002 detik. Bahwa pada gambar (a) model cekungan persegi memiliki penyerapan energi paling tinggi dan pada gambar (b) model cekungan segitiga memiliki penyerapan energi paling rendah. Ini dikarenakan perbedaan jumlah lipatan, pada gambar (a) jumlah lipatan yang terbentuk yaitu 5 lipatan. Sedangkan pada gambar (b) jumlah lipatan yang terbentuk yaitu 4 lipatan.



Gambar 4.21 Jumlah lipatan pada *crash box* (a) lekukan persegi (b) lekukan sudut



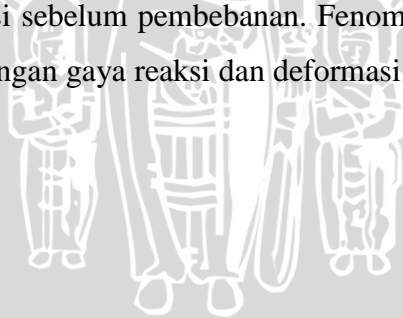
Gambar 4.22 Grafik waktu terhadap gaya reaksi model ke-6 dan ke-7

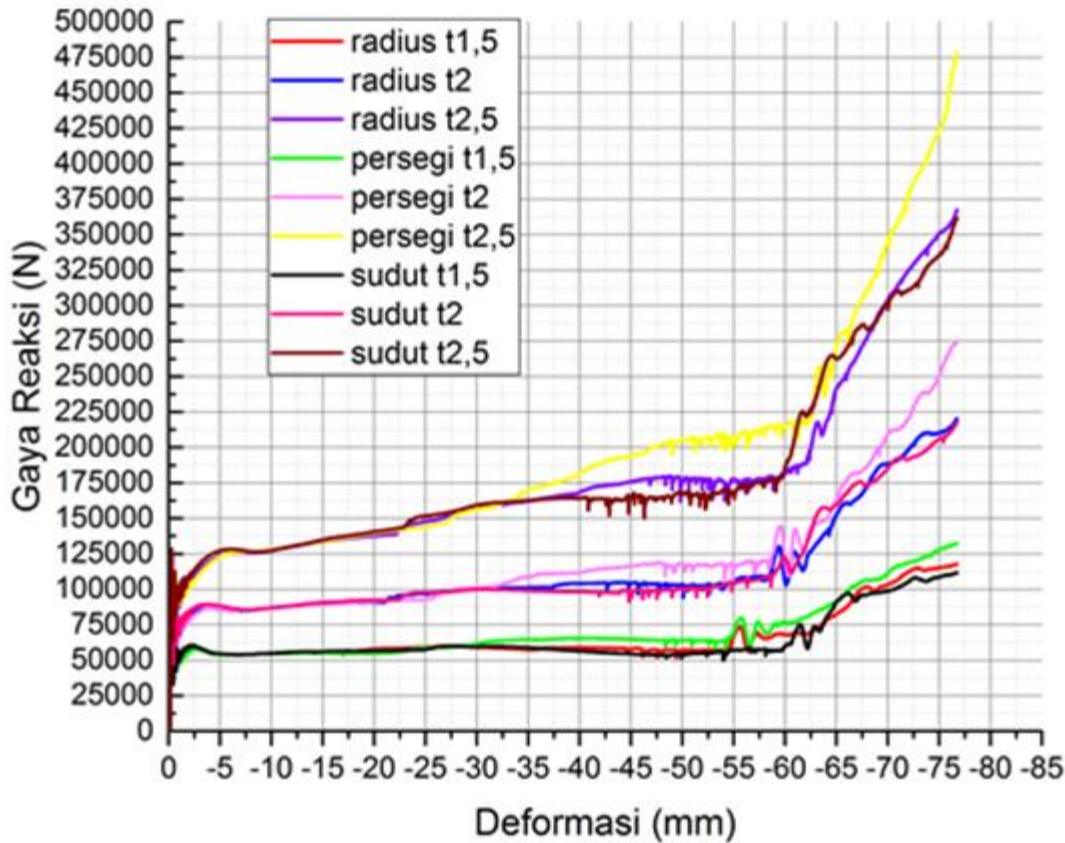
Perbedaan jumlah lipatan terjadi pada model ke-6 dan ke-7. Terlihat pada gambar 4.22 perbandingan waktu pembebanan dan gaya reaksi yang diterima oleh *crash box* antara model ke-6 dan ke-7 bahwa pada waktu pembebanan yang sama selama 0,01 detik besarnya gaya reaksi yang diterima oleh *crash box* ternyata berbeda, hal ini karena semakin

banyak gaya yang diterima oleh crash box maka jumlah lipatan juga akan lebih banyak terbentuk. Sebagaimana terlihat pada grafik model ke-6 yang besarnya gaya yang diterima crash box cenderung naik seiring lipatan-lipatan itu terbentuk karena untuk membentuk 1 lipatan dibutuhkan gaya yang lebih besar sehingga penyerapan energinya juga akan meningkat seiring dengan lipatan terbentuk yang dapat dilihat pada gambar 4.20 (a) yaitu penyerapan energi cenderung naik selama 0,01. Pada model ke-7 gaya yang diterima cenderung konstan karena lipatan sudah tidak terjadi lagi, seperti pada gambar 4.20 (b) pada waktu 0 sampai 0,08 detik penyerapan energinya cenderung meningkat karena terjadinya proses pembentukan lipatan. Pada waktu 0,08 detik ada penurunan dikarenakan lipatan sudah tidak terjadi dan selanjutnya ada peningkatan lagi yaitu crash box terjadi proses pemadatan sampai waktu 0,1.

4.2.4 Grafik Hubungan Gaya Reaksi dan Perpindahan

Pada saat *crash box* menerima pembebanan dari *impactor*, *crash box* memberikan gaya reaksi untuk mencegah terjadinya deformasi. Akibat pembebanan dari *impactor* maka *crash box* akan mengalami deformasi seiring dengan pembebanan yang diberikan. Karena *crash box* yang dikenai beban mengalami deformasi seiring dengan waktu tumbukan, maka besar gaya reaksi yang dilakukan untuk melawan beban impak tidak sama dan berfluktuasi. Perbedaan gaya reaksi ini disebabkan karena *crash box* yang sudah tidak mempunyai bentuk yang sama dengan kondisi sebelum pembebanan. Fenomena ini dijelaskan melalui hasil simulasi berupa grafik hubungan gaya reaksi dan deformasi berikut.

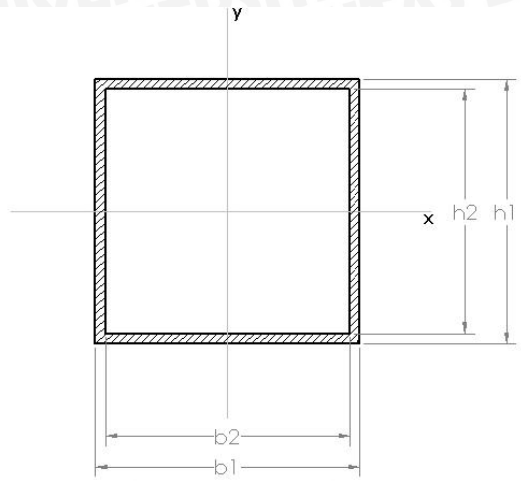




Gambar 4.23 Grafik gaya reaksi dan deformasi *crash box* dengan variasi tebal dinding dan bentuk cekungan *crash box*

Gambar 4.23 merupakan grafik hubungan gaya reaksi *crash box* terhadap perpindahan. Grafik gaya-perpindahan dibuat dengan menggabungkan grafik gaya reaksi terhadap waktu dan grafik perpindahan terhadap waktu yang diperoleh dari *software* ANSYS. Besar energi yang diserap masing-masing *crash box* dapat dianalisis pada grafik hubungan gaya reaksi dan perpindahan berdasarkan luas daerah dibawah kurva masing-masing *crash box*. Luas daerah di bawah kurva menunjukkan usaha yang dilakukan oleh beban pada *crash box*. Usaha dari beban saat dikenakan pada *crash box* diubah menjadi energi regangan. Dengan asumsi bahwa keseluruhan energi kinetik terkonversi menjadi energi regangan, maka dapat disimpulkan bahwa usaha beban sama dengan energi regangan pada material *crash box*.

Nilai energi penyerapan (E_a) pada Tabel 4.1 dapat diurutkan 3 model dari yang terbesar yaitu model ke-6, 3, dan 9. Nilai energi penyerapan dari ketiga model tersebut secara berurutan dapat ditulis sebagai berikut 13932,46 J, 13092,97 J, dan 12845,85 J. Besarnya nilai energi penyerapan dipengaruhi oleh momen inersia luasan (I_x)



Keterangan :

\$b_1\$ = Panjang penampang luar (m)

\$b_2\$ = Panjang penampang dalam (m)

\$h_1\$ = Lebar penampang luar (m)

\$h_2\$ = Lebar penampang dalam (m)

$$I_x = \frac{b_1^3 h_1 - b_2^3 h_2}{12} \dots\dots\dots(4-1)$$

Momen inersia luasan penampang yang berbeda menghasilkan nilai kekakuan yang berbeda-beda pada tiap *crash box*. Kekakuan pada struktur juga dapat mempengaruhi besarnya nilai energi penyerapan yang dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$k = \frac{3EI}{L^3} \dots\dots\dots(\text{Gere, 2004})(4-2)$$

$$P = k\delta \dots\dots\dots(\text{Sears, 1962})(4-3)$$

Crash box yang mempunyai tebal 2,5 mm memiliki kekakuan yang paling besar karena mempunyai momen inersia luasan yang paling besar dibandingkan dengan *crash box* dengan ketebalan 1,5 dan 2 hal ini sesuai dengan persamaan (4-1) sehingga mempunyai kekakuan yang paling besar pula hal ini sesuai dengan persamaan (4-2) dan kekakuan pada *crash box* mengakibatkan penyerapan energi yang paling tinggi hal ini sesuai dengan persamaan (4-3).

