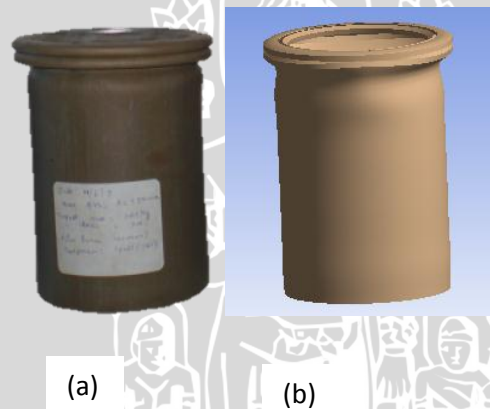


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembahasan Validasi Hasil Simulasi dengan Eksperimen

validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen guna mengetahui besarnya *error*. Validasi pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan simulasi terhadap hasil eksperimen oleh Velmurugan (2009).

Validasi dilakukan dengan mensimulasikan *crash box* berpenampang lingkaran dengan ukuran $\varnothing = 75$ mm, $L = 150$ mm dan $t = 1,6$ mm menggunakan material ASTM E-04. *Crash box* ditumbuk dengan *impactor* bermassa 103 kg dengan kecepatan 7,67 m/s pada arah *frontal*. Adapun hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan data pada Tabel 4.1.



Gambar 4.1 *crash box* setelah ditumbuk (a) hasil eksperimen (b) hasil simulasi

Tabel 4.1 Data Validasi Hasil Eksperimen dan Simulasi

Variabel	Eksperimental	Simulasi
\varnothing (mm)	75	75
L (mm)	150	150
t (mm)	1,6	1,6
v (m/s)	7,67	7,67
Ea (J)	2.395,30	2.517,7

$$Ea_{error} = \left[\frac{(\ddot{a} - a)}{\ddot{a}} \right] \times 100 \% = \frac{(2.517,7 - 2.395,30)}{2.517,7} \times 100 \% = 4,86\%$$

Dari perhitungan *error* di atas didapatkan *error* penyerapan energi yang terjadi sebesar 4,86%. Penyimpangan dapat disebabkan oleh ukuran *mesh* dan pemodelan material *crash box*, gesekan antara permukaan *impactor* dan *crash box*, serta faktor lain yang tidak disebutkan pada Jurnal penelitian Velmurugan. Pada simulasi menggunakan *software* berbasis *finite element method*, ukuran *mesh* memiliki pengaruh yang besar terhadap hasil simulasi. Semakin kecil ukuran *mesh* maka geometri spesimen akan semakin mendekati geometri sebenarnya, sehingga, penyimpangan yang terjadi akan semakin kecil. Pemodelan yang digunakan adalah *bilinear isotropik hardenig*, yaitu pemodelan material terdiri dari dua garis linear pada daerah elastis dan daerah plastis hingga *ultimate strenght* saja (belum mencapai *failure*). Jika pemodelan material lebih kompleks, maka hasil simulasi akan semakin mendekati sebenarnya. Penyimpangan juga dapat disebabkan oleh kontak *crash box* dengan *impactor* diasumsikan *frictionless*. *Frictionless contact* digunakan karena pada jurnal tidak ada informasi menyatakan mengenai gesekan pada saat tumbukan.

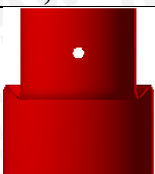



4.2 Hasil Simulasi *Initial Fold Crash Box* dengan Variasi Pola Peletakan Lubang dan Rasio Diameter Lubang

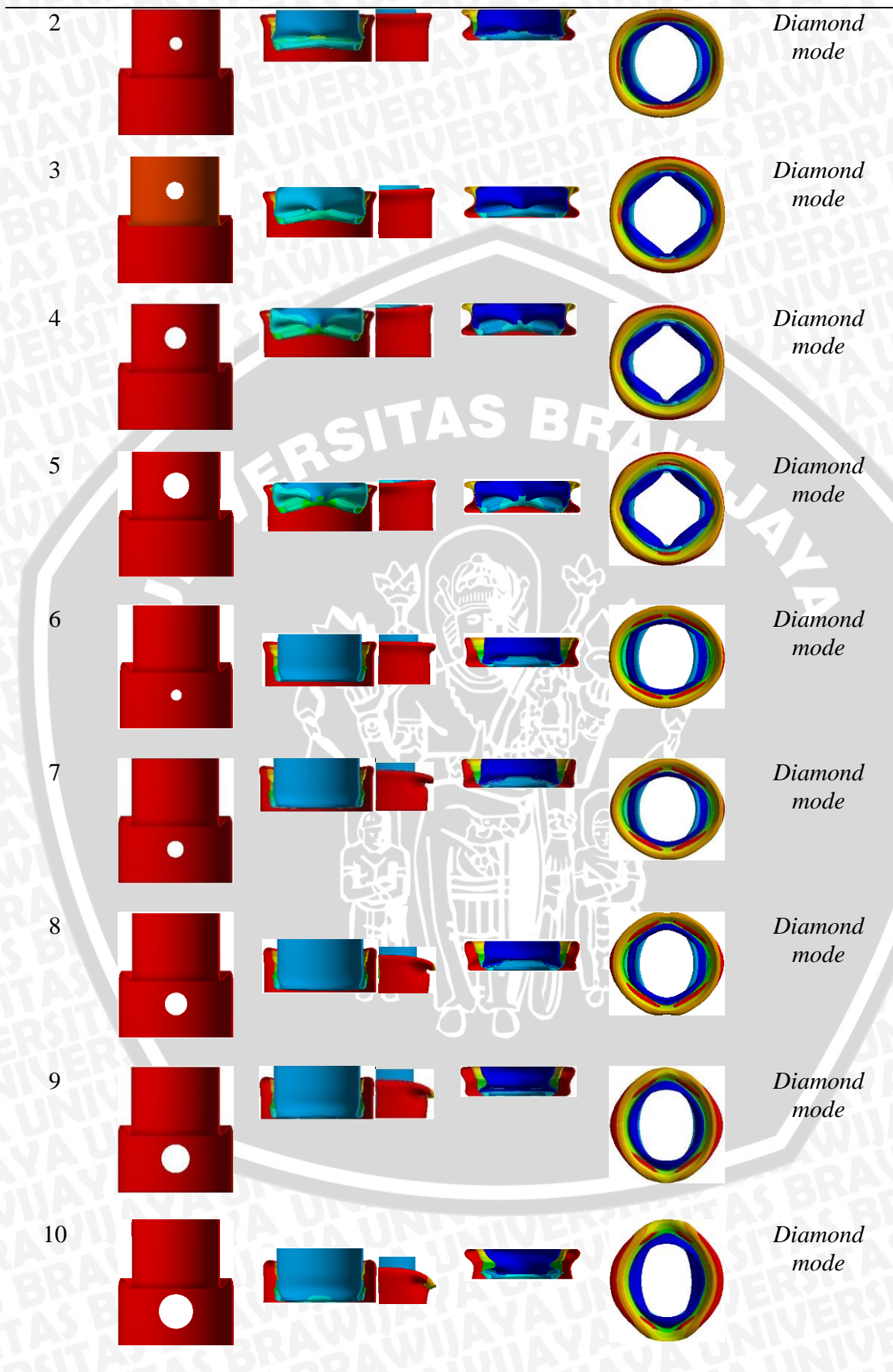
4.2.1 Pola Deformasi pada *Initial Fold Crash Box* dengan Lubang

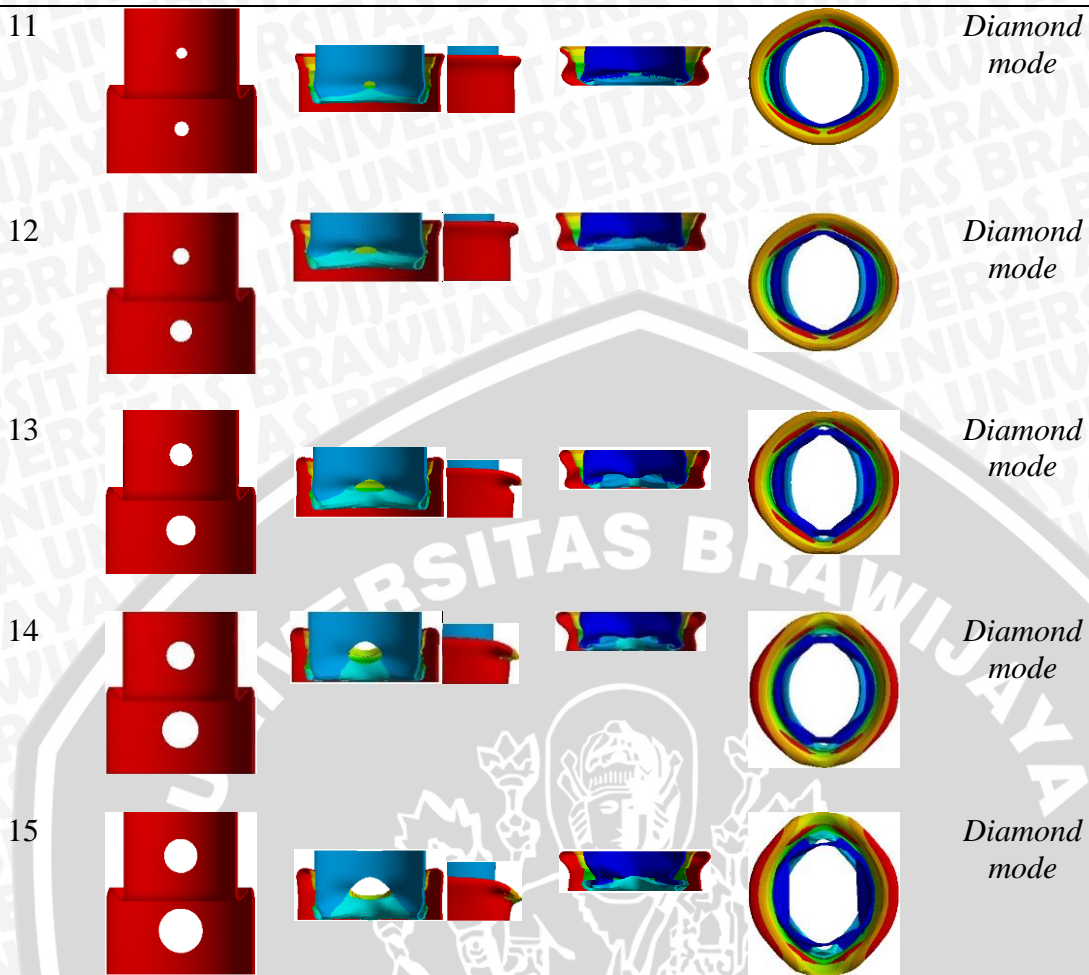
Saat mengalami tumbukan, *crash box* akan mengubah energi tumbukan menjadi deformasi plastis dalam bentuk tekukan-tekukan (*buckling*). Tekukan-tekukan ini akan memiliki karakteristik tersendiri yang disebut dengan pola deformasi. Pola deformasi dibagi berdasarkan sumbunya dibagi menjadi *bending mode* dan *axial mode*, sedangkan berdasarkan sudut yang terbentuk dibagi menjadi, *concertina mode*, *diamond mode*, dan *mixed mode*.

Untuk mengetahui pola deformasi yang terbentuk, dilakukan pengamatan visual terhadap hasil simulasi. Secara keseluruhan semua desain membentuk *axial mode* karena beban ditumbuk searah dengan sumbu aksialnya. Untuk lebih detilnya hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Pola deformasi hasil simulasi

desain	0,00125	0,00875	0,0125	Tampak atas	Pola deformasi
1					<i>Diamond mode</i>





Berdasarkan analisis visual terhadap pola deformasi masing-masing desain menghasilkan *axial mode* tipe *diamond mode*. *Diamond mode* terbentuk karena adanya lubang sebagai *initial fold* tambahan, sehingga pada bagian yang berlubang akan mudah mengalami *folding*. Selain itu, dengan menambahkan lubang, menyebabkan momen inersia menurun, yang mengakibatkan nilai beban kritis juga menurun, seperti yang tertulis pada persamaan (4-1) sebagai berikut:

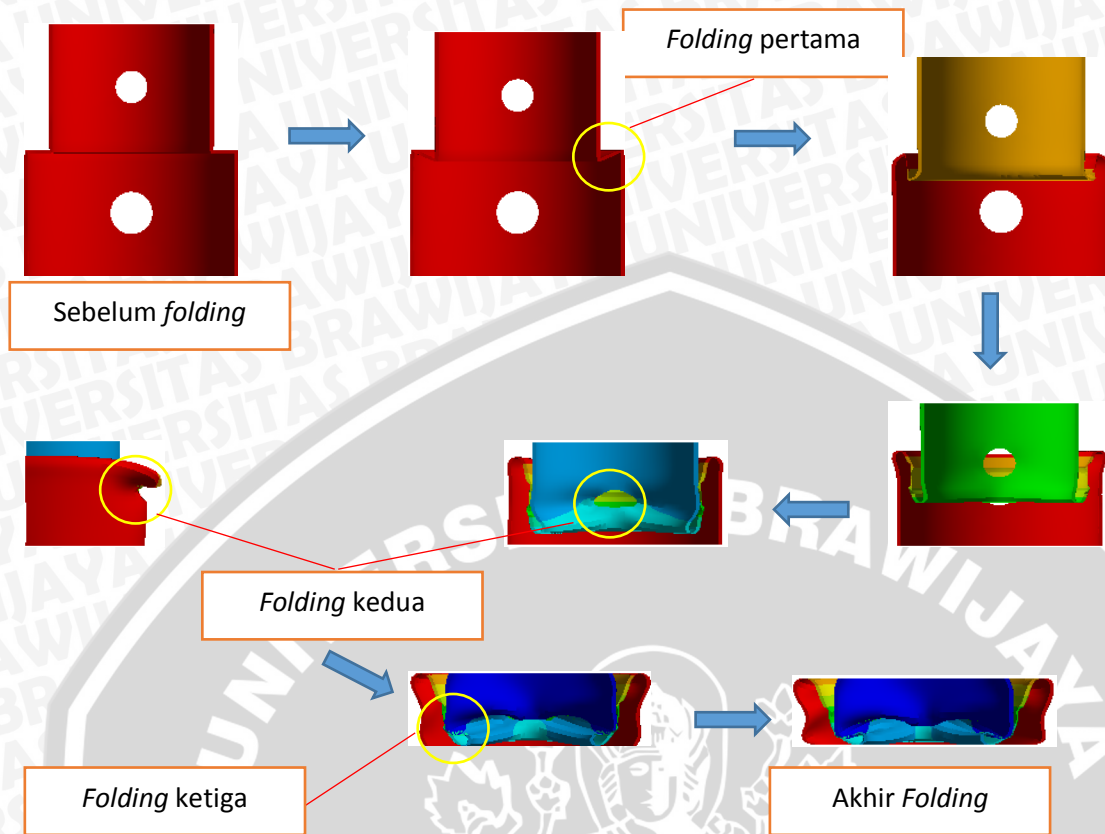
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (4-1)$$

P_{cr} = beban kritis (N)

E = modulus elastisitas (N/m²)

L = panjang kolom (m)

Penambahan lubang pada *crash box* ditujukan sebagai *folding* awal, sehingga *folding* akan terjadi pada daerah tersebut. proses *folding* pada *initial fold crash box* dengan lubang ini dapat dilihat pada Gambar 4. 2.



Gambar 4.2 Proses *folding* pada desain 13

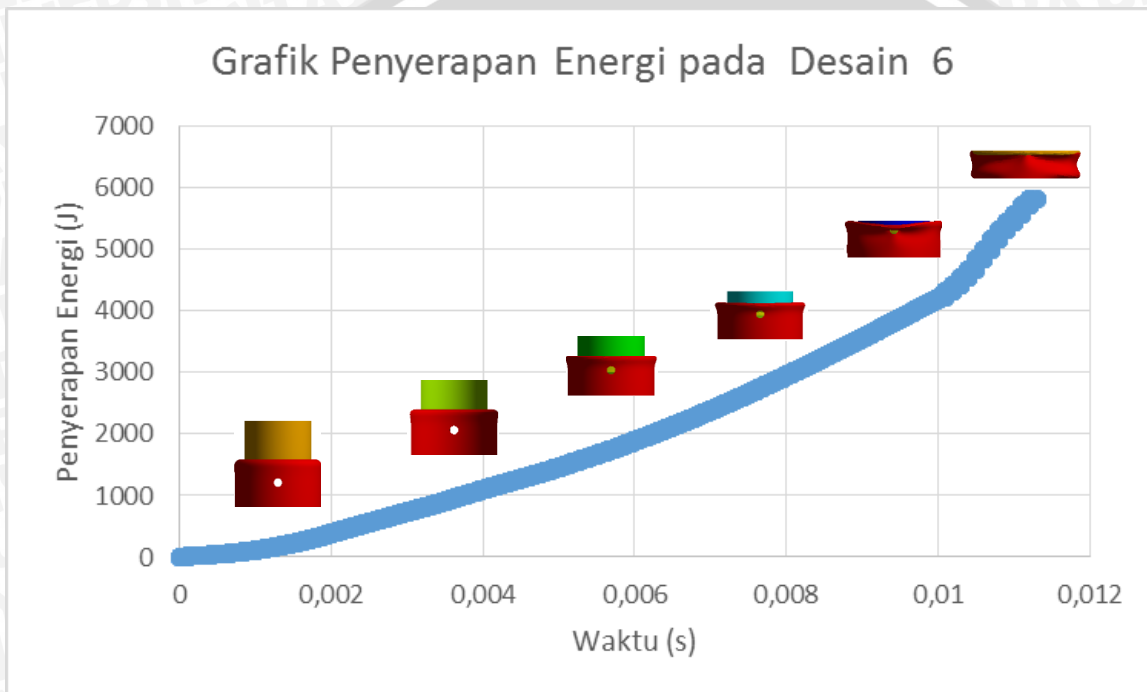
4.2.2 Penyerapan Energi

Penelitian ini meninjau pengaruh pola peletakan lubang dan rasio diameter lubang pada *Initial Fold Crash Box* terhadap penyerapan energi dan *crash force efficiency* (CFE). Penyerapan energi pada *crash box* terjadi akibat perubahan energi kinetik yaitu fungsi massa dan kecepatan dari *impactor* dirubah menjadi deformasi pada *crash box* yang juga dapat disebut sebagai energi regangan. Dari hasil simulasi menggunakan software ANSYS *Workbench* 14.5 didapatkan data penyerapan energi pada *intial fold crash box* dengan lubang yang ditumbuk oleh *impactor* selama 0,01125s yang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Penyerapan Energi pada Setiap Desain

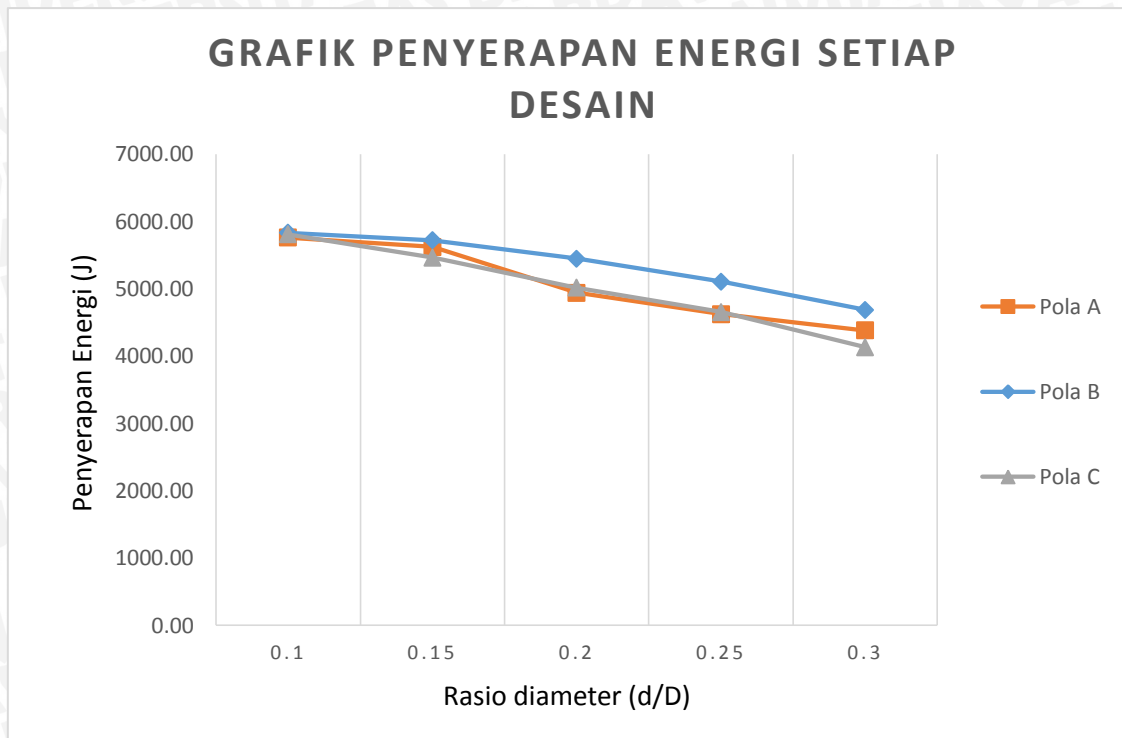
No desain	Penyerapan Energi (mJ)
1	5760,70
2	5620,00
3	4940,30
4	4621,10
5	4378,70
6	5832,30

7	5718,00
8	5446,70
9	5106,90
10	4685,30
11	5807,80
12	5460,30
13	5012,90
14	4654,50
15	4128,60



Gambar 4.3 Grafik Penyerapan Energi Desain 6

Dari Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa penyerapan energi terbesar terjadi pada desain 6, yaitu sebesar 5832,2 J. Hal ini dapat dimungkinkan karena gaya yang digunakan untuk menumbuk *crash box* adalah yang tertinggi. Dapat dilihat pada Gambar 4.3 penyerapan energi terus meningkat seiring dengan pertambahan waktu tumbukan. Jika diamati lebih seksama pada *folding* pertama energi yang dibutuhkan cukup besar terlihat dari grafik yang terus meningkat. Pada detik 0,01 terjadi peningkatan penyerapan energi yang sangat signifikan. Pada saat itulah terjadi pemampatan pada *crash box*.



Gambar 4.4 Grafik Penyerapan pada Setiap Desain

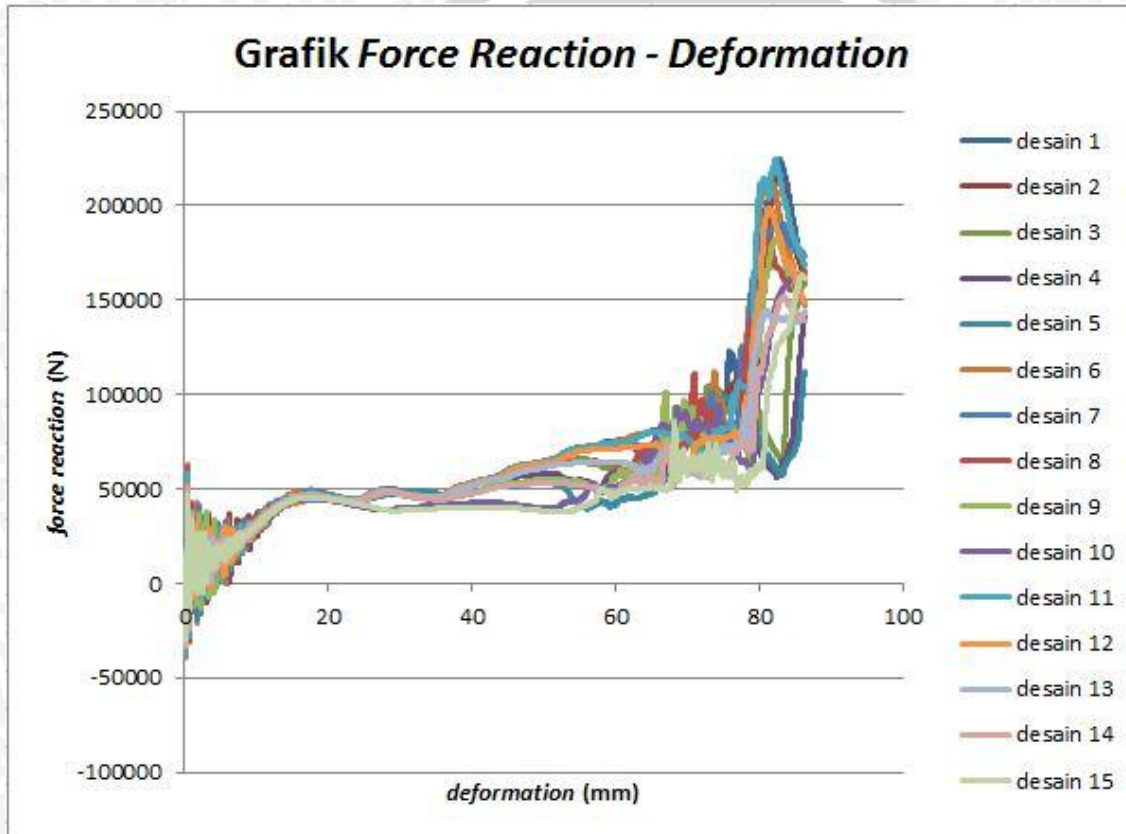
Pada Gambar 4.4 dapat dilihat kecenderungan penyerapan energi pada masing-masing desain dipengaruhi pola peletakan lubang dan rasio diameter lubang. Terlihat bahwa rasio diameter lubang memberikan pengaruh yang besar terhadap penyerapan energi pada *crash box* berupa penurunan penyerapan energi. Hal ini dikarenakan, semakin besar diameter lubang, menyebabkan gaya yang dibutuhkan untuk menyebabkan *folding* semakin rendah, sehingga grafik *force reaction – deformation* (Gambar 4.3) semakin rendah. Sedangkan kita ketahui bahwa penyerapan energi pada *crash box* merupakan daerah di bawah grafik *force reaction – deformation*.

$$U = W = \int_0^{\delta} Pd\delta \quad (4-2)$$

Pola peletakan lubang juga memberikan pengaruh terhadap penyerapan energi, meskipun tidak sebesar pengaruh rasio diameter lubang. dapat dilihat pada Gambar 4.4 bahwa kecenderungan penyerapan energi dari yang tertinggi ke terendah adalah Pola B, Pola A, dan Pola C. Hal ini dikarenakan gaya yang berkerja untuk melakukan *folding* pada *crash box* sebanding dengan kekakuan dan momen inersianya yang akan dibahas pada subbab 4.2.3.

4.2.3 Hubungan Grafik *Force Reaction-Deformation* dengan *Crash Force Efficiency* (CFE)

Grafik *Force Reaction-deformation* merupakan diagram yang terbentuk dari gaya reaksi pada tumpuan *crash box* terhadap deformasi yang terjadi pada *crash box*. Adapun grafik *force reation - deformation* untuk setiap desain dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Tabel 4.4.



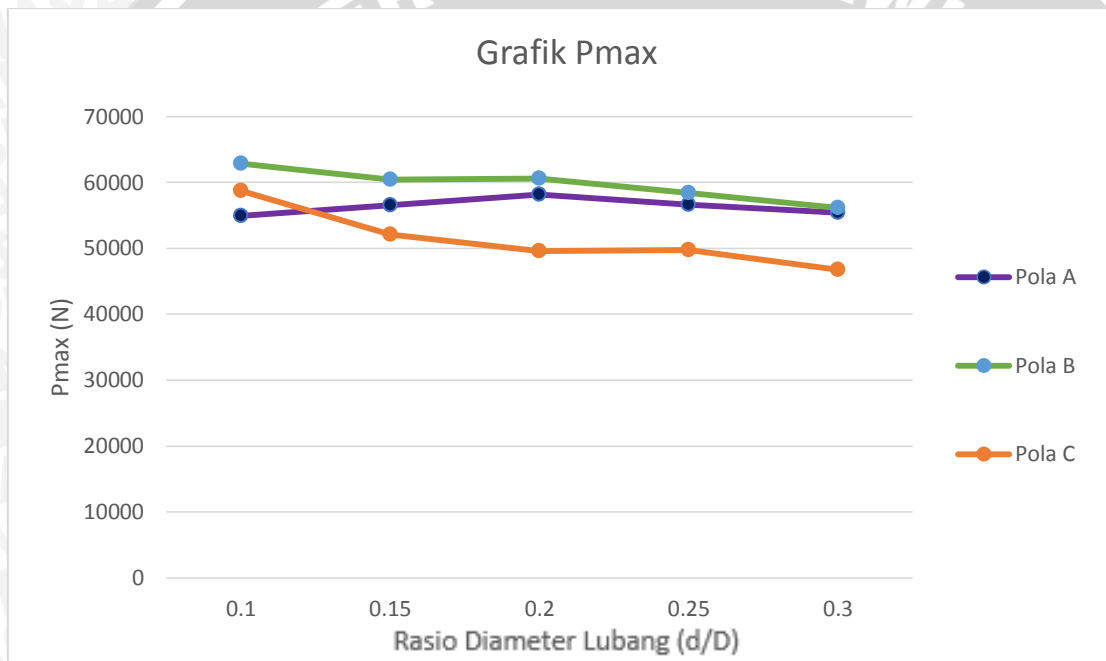
Gambar 4.5 Grafik *Force Reaction-Deformation* pada setiap desain

Tabel 4.4 Data *Force Reaction – Deformation* pada Setiap Desain

Desain	P_{\max} (N)	P_{mean} (N)	CFE (%)
1	54966	67105,48	122,09
2	56548	66612,52	117,80
3	58199	57229,21	98,33
4	56587	53533,41	94,60
5	55378	50689,90	91,53
6	62851	67591,16	107,54
7	60425	66235,86	109,62
8	60555	63283,33	104,51
9	58446	59237,36	101,35
10	56146	54881,52	97,75

11	58748	67749,40	115,32
12	52093	63191,37	121,30
13	49567	58875,13	118,78
14	49720	53752,38	108,11
15	46786	47787,95	102,14

Crash force efficiency (CFE) merupakan rasio antara P_{mean} dan P_{max} , dimana P_{mean} merupakan gaya rata-rata yang bekerja pada *crash box*, dan P_{max} adalah gaya tertinggi yang dibutuhkan untuk menghasilkan *folding* pertama pada *crash box*. *Crash force efficiency* disini sebenarnya hanya besaran yang menggambarkan seberapa mudah *crash box* untuk mengalami *folding* pertama di antara desain-desain yang diamati.



Gambar 4.6 Grafik P_{max} pada setiap desain

Gambar 4.6 menunjukkan Grafik P_{max} pada setiap desain dengan pengaruh pola petekan lubang dan rasio diameter lubang. Dari grafik dapat dilihat bahwa Pola yang membutuhkan P_{max} terbesar secara berurutan adalah Pola B, Pola A, dan Pola C.

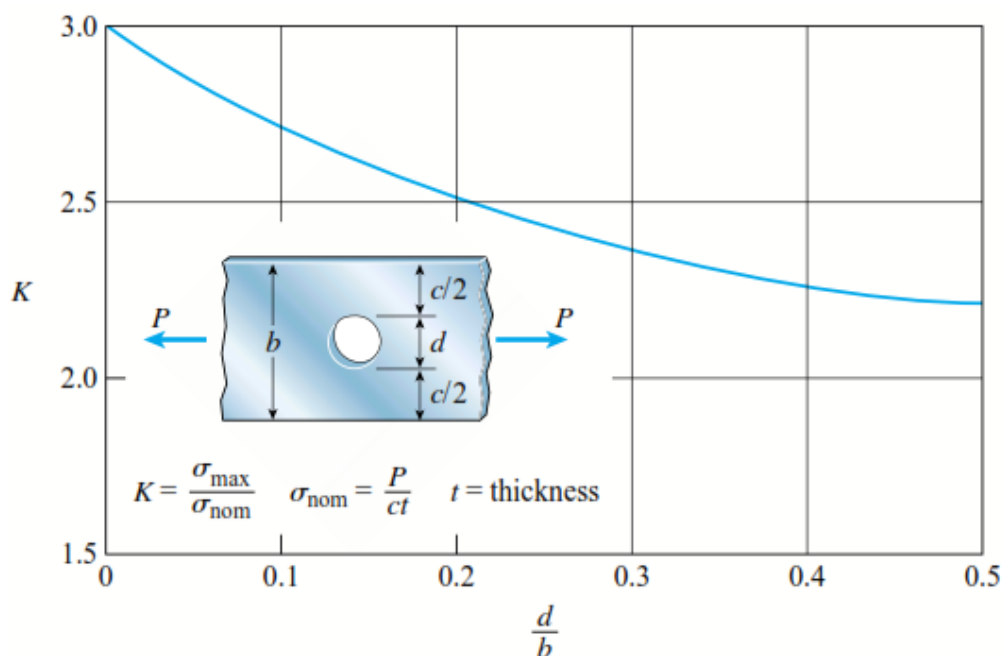
$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (4-3)$$

$$P = k\delta \quad (4-4)$$

Sesuai dengan rumus (4-3) dan (4-4) bahwa kekakuan pada struktur kolom (yang mengalami tekuk) berbanding terbalik dengan tingginya, hal ini pulalah yang menyebabkan Pola B (peletakan lubang di segmen bawah) membutuhkan P_{max} tertinggi

dari Pola A (peletakan lubang pada segmen atas). Karena jarak lubang yang dijadikan sebagai *initial fold* (tempat diharapkannya terjadi *folding*) lebih jauh dari pusat pembebanannya, yang menyebabkan struktur menjadi lebih kaku dibandingkan pola A. Sedangkan pada Pola C (peletakan lubang pada segmen atas dan bawah) memiliki P_{\max} yang terendah, hal ini dikarenakan peletakan lubang di segmen atas, memudahkan terjadinya *folding* awal ditambah dengan peletakan lubang pada segmen bawah, dimana keduanya berpengaruh menurunkan kekakuan *crash box*.

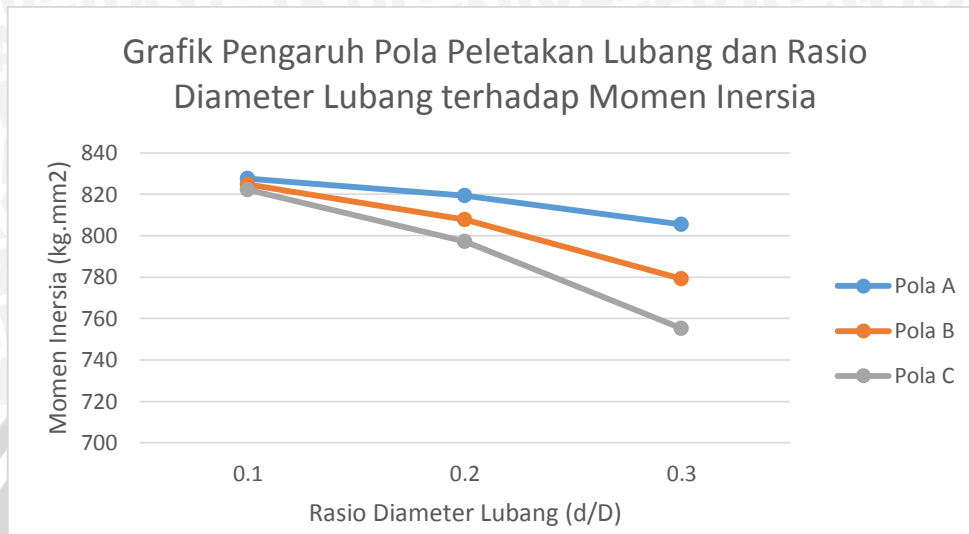
Pertambahan rasio diameter lubang berpengaruh menurunkan nilai P_{\max} . Hal ini dikarenakan penambahan lubang sebagai *initial fold* menyebabkan adanya konsentrasi tegangan pada tepian lubang tegak lurus terhadap arah pembebanan. Dengan adanya konsentrasi tegangan inilah memungkinkan daerah disekitar lubang akan mudah mengalami *folding*. Selain itu, bertambahnya rasio diameter lubang menyebabkan menurunnya konsentrasi tegangan pada tepian lubang, seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.7. Menurunnya konsentrasi tegangan ini menandakan bahwa gaya pada yang bekerja pada daerah tersebut juga menurun, sehingga memudahkan terjadinya *folding*.



Gambar 4.7 Faktor konsentrasi tegangan pada pelat berlubang
Sumber: Gere (2004:141)

Selain itu, penambahan lubang pada *crash box* diringi dengan peningkatan rasio diameter lubang, menyebabkan Inersia luasannya berkurang. Dari ANSYS diperoleh data momen inersia setiap desain yang dapat dilihat pada Gambar 4.8.

Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa nilai momen inersia dari yang tertinggi ke terendah yaitu Pola A, Pola B, dan Pola C. Dimana seiring pertambahan rasio diameter lubang momen inersianya semakin menurun.

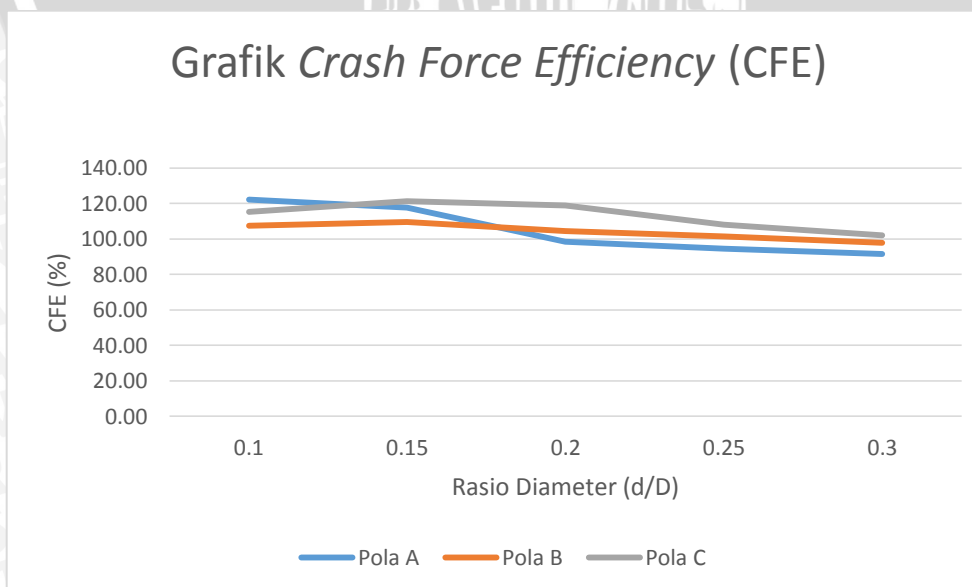


Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Pola Peletakan Lubang dan Rasio Diameter Lubang terhadap Momen Inersia

Seiring dengan meningkatnya nilai momen inersia, maka meningkat pula nilai beban kritis (P_{cr}) material, sesuai dengan rumus (4-4). Sehingga, semakin besar momen inersianya, maka gaya yang dibutuhkan untuk mengakibatkan *folding* semakin besar pula.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$$

(4-5)



Gambar 4.9 Grafik CFE setiap desain

Gambar 4.9 menunjukkan Grafik CFE pada setiap desain. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa kecenderungan nilai CFE dari terbesar hingga terkecil adalah pada Pola C, Pola B, dan Pola A. Hal ini sesuai dengan rumus (4-5). Dimana pada pola C nilai P_{max} rendah, sehingga nilai CFE akan meningkat. Sedangkan Pada Pola B rata-rata nilai P_{mean} (Tabel 4.4) sangat tinggi, dikarenakan nilai pola B lebih sulit mengalami *folding* dibanding pola lain yang menyebabkan gaya rata-rata yang diberikan pada pola B besar. Hal inilah yang menyebabkan kecenderungan nilai CFE pola B lebih besar dibanding pola A.

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \quad (4-6)$$

Jika ditinjau lebih dalam, pada Pola A dengan rasio diameter 0,1 (desain 1) memiliki nilai CFE yang tertinggi dibanding yang lain. Hal ini dikarenakan nilai P_{mean} pada desain 1 cukup tinggi jika dibandingkan dengan nilai P_{max} -nya. Hal ini terjadi karena pola deformasi yang terbentuk adalah yang paling rapi di bandingkan dengan pola deformasi desain lain (Tabel 4.2).

