

OPTIMASI DESAIN *CRASH BOX* TIPE *SQUARE* DENGAN BEBAN IMPAK ARAH AKSIAL

Eky Putrawani^[1], Musthafa Akbar^[2]

Laboratorium, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau

^[1]eky.putrawani@student.unri.ac.id ^[2]akbarmst@gmail.com

ABSTRACT

Crash box is one of the passive security system technology that serves to absorb impact energy when the car suffers a collision. The Crash box has a parameter crashworthiness which is a parameter that indicates the durability of structures to protect a passenger during collision. The crashworthiness parameters in the crash box is energy absorption (EA), primary Peak Force (Pmax), mean crushing force (Pm), crushing force efficiency (CFE), and specific energy absorption (SEA). In this research conducted optimization of the design of the crash box with numerical analysis using software-based finite element method Abaqus CAE ver. 6.14-2. This research was conducted to get the design of the crash box which has the most optimal crashworthiness parameter value of some model of the square type crash box design with an impact load axial direction. The design Model of the crash box is analyzed include adding design modifications using triggers, multi segments, and rib. The selected crash box Material used is Aluminium AA6060-T4. Base on analysis carried out the design model of the crash box with the addition of rib (R06) as a design model that has the most optimal crashworthiness parameters. The R06 design Model increases energy absorption (EA) by 0.02 kJ (0.37%), lowering primary peak force (Pmax) by 10.72 kN (21.16%), increasing mean crushing force (Pm) of 0.11 kN (0.37%), increasing crushing force efficiency (CFE) of 15.81% (27.32%), but lowering the specific energy absorption (SEA) of 0.91 kJ/kg (4.63%).

Keyword : *Crash Box, Design Optimization, Crashworthiness Analysis*

1. Pendahuluan

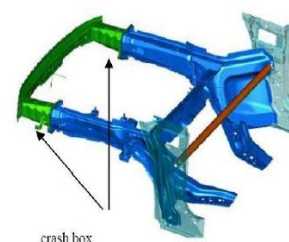
Berdasarkan hasil pendataan Badan Pusat Statistik Indonesia pada Tabel 1 jumlah kecelakaan di Indonesia dari tahun 2014 hingga tahun 2016 terus mengalami peningkatan. Jumlah kecelakaan terbesar terjadi pada tahun 2016 dengan jumlah 106.129 kecelakaan dengan jumlah korban mati sebanyak 26.185 orang, luka berat sebanyak 22.558 orang dan luka ringan sebanyak 121.550 serta mengakibatkan kerugian sebesar 226,8 milyar rupiah [1].

Tabel 1. Jumlah Kecelakaan di Indonesia dari Tahun 2014 sampai Tahun 2016 [1]

Kecelakaan	Jumlah Kecelakaan, Korban Mati, Luka Berat, Luka Ringan, dan Kerugian Materi		
	2014	2015	2016
Jumlah Kecelakaan	95.906	98.970	106.129
Korban Mati (Orang)	28.297	26.495	26.185
Luka Berat (Orang)	26.840	23.937	22.558
Luka Ringan (Orang)	109.741	110.714	121.550
Kerugian Materi (Juta Rupiah)	250.021	272.318	226.833

Berdasarkan data statistik pada Tabel 1, angka kecelakaan di Indonesia mengalami peningkatan setiap tahunnya. Melihat adanya permasalahan ini mendorong produsen otomotif mulai mengembangkan sistem keamanan kendaraan yang mampu mengurangi dampak dari kerusakan yang

terjadi akibat kecelakaan. Salah satu sistem keamanan yang dikembangkan yaitu *crash box*. *Crash box* merupakan sistem keamanan pasif (*passive safety system*) dan merupakan salah satu bagian dari *crashworthy system* yang digunakan untuk mengurangi tingkat resiko kecelakaan yang dialami penumpang atau bagian kendaraan akibat tabrakan aksial. *Crash box* berupa struktur berinding tipis (*thin-walled structure*) yang diharapkan mengalami deformasi permanen untuk menyerap energi akibat tabrakan [2]. Gambar *crash box* pada kerangka mobil dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Crash Box* pada Rangka Mobil

Crash box memiliki parameter *crashworthiness* yang merupakan parameter yang menunjukkan ketahanan struktur terhadap tabrakan. Parameter *crashworthiness* pada *crash box* diantaranya yaitu *energy absorption* (EA), *primary peak force* (Pmax), *mean crushing force* (Pmean), *crushing force efficiency* (CFE), dan *specific energy absorption* (SEA) [2]. Beberapa macam bentuk penampang *crash box* yang telah diteliti

diantaranya lingkaran (*circle*), persegi (*square*), dan persegi panjang (*rectangular*) yang masing-masingnya memiliki ketebalan yang sama [3].

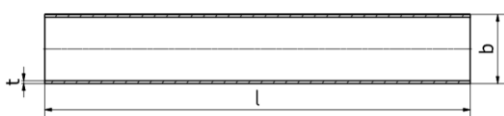
Pada penelitian-penelitian sebelumnya telah dilakukan beberapa perancangan *crash box* untuk mengoptimalkan parameter *crashworthiness*. Pada tahun 2016 Husain dkk melakukan penelitian tentang studi perbandingan konfigurasi *trigger* untuk meningkatkan *crashworthiness* dari *crash box* tipe *circle* pada tabrakan mobil dengan beban impact arah aksial [4]. Tahun 2018 Halman dkk melakukan penelitian tentang pengaruh variasi sambungan pada *crash box* multi segmen tipe *circle* terhadap kemampuan penyerapan energi dengan uji *quasi static* [5]. Dan pada tahun 2016 Adachi dkk melakukan penelitian tentang energi yang diserap oleh silinder berdinding tipis dengan penambahan *rib* pada beban arah aksial [6]. *Crash box* tipe persegi (*square*) adalah salah satu bentuk penampang *crash box* yang digunakan pada mobil.

Berdasarkan uraian diatas, sebagai sebuah komponen sistem keselamatan pasif yang berfungsi untuk menyerap energi tabrakan *crash box* haruslah memiliki parameter *crashworthiness* yang paling optimal. Oleh karena itu sangat penting dilakukannya optimasi desain *crash box* sehingga didapatkan desain *crash box* yang memiliki parameter *crashworthiness* yang paling optimal. Optimasi desain dilakukan pada beberapa model desain. Model desain yang digunakan adalah model desain modifikasi dengan penambahan *trigger*, multi segmen, dan *rib*. Penelitian ini dilakukan pada *crash box* tipe *square* dengan beban impact arah aksial.

2. Metodologi

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu menentukan *input* dimensi *crash box*, perancangan *crash box* (*modelling*), uji konvergensi, validasi data, optimasi desain tanpa modifikasi, dan optimasi desain dengan modifikasi menggunakan *software* metode elemen hingga.

Dalam penelitian ini *input* dimensi *crash box*, kecepatan impact, material *crash box* dan massa *impactor* merujuk pada penelitian Kuznetsov dkk (2016). Panjang *crash box* (*l*) 310 mm, lebar penampang (*b*) *crash box* 80 mm, ketebalan (*t*) 2.5 mm, massa *impactor* 56 kg, material yang digunakan Aluminium AA6060-T4, dan kecepatan 56 km/h (NCAP 96/79 EC) [7]. Geometri *crash box* dapat dilihat pada Gambar 2. *Properties* material, *plastic strain*, dan *plastic stress* Aluminium AA6060-T4 dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.



Gambar 2. Geometri Permodelan *Crash Box*

Tabel 2. *Properties* Material Aluminium AA 6060-T4 [8]

Parameter	Value
Density	2.7 kg/mm ³
Poisson ratio	0.33
Ultimate Stress	171 MPa
Yield Stress	82 MPa
Flow Stress	126.5 MPa
D	6500/s
q	4
Modulus Young (E)	68.2 GPa

Tabel 3. Data *Plastic Strain* dan *Plastic Stress* Aluminium AA 6060-T4 [12]

Plastic Strain	Plastic Stress (Mpa)
0	80
0.024	115
0.049	139
0.074	150
0.099	158
0.124	167
0.149	171
0.174	173

Pada proses optimasi dilakukan perbandingan pengaruh 3 jenis material terhadap parameter *crashworthiness* *crash box*, diantaranya yaitu Aluminium AA6060-T4, *Mild Steel* A36, dan *Stainless Steel* 304. *Properties* Material *Mild Steel* A36 dan *Stainless Steel* 304 dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. *Properties* Material *Mild Steel* A36 [10]

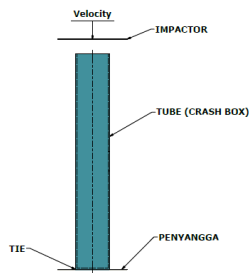
Parameter	Value
Parameter Material (A)	146.7 MPa
Parameter Material (B)	896.9 MPa
Strain power coefficient (n)	0.320
Parameter Material (C)	0.033
Temperature power coefficient (M)	0.323
Modulus Young (E)	200 GPa
Poisson ratio	0.26
Reference strain rate ($\dot{\epsilon}_0$)	1.0s ⁻¹
Density (ρ)	7850 kg/m ³
Specific heat (Cp)	386 J/kg K
Melting temperature (Tm)	1773 K

Tabel 5. *Properties* Material *Stainless Steel* 304 [11]

Parameter	Value
Parameter Material (A)	300 MPa
Parameter Material (B)	1000 MPa
Strain power coefficient (n)	0.65
Parameter Material (C)	0.07
Temperature power coefficient (M)	1
Melting Temperatur	1673 K
Specific Heat	440 J/kg K
Reference strain rate ($\dot{\epsilon}_0$)	1.0s ⁻¹
Density (ρ)	7900 kg/m ³
Modulus Young (E)	200 GPa
Poisson Ratio	0.3

Proses *modelling* dilakukan menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga Abaqus

CAE Ver. 6.14-2. Model *setup* penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Model *Setup* Penelitian

Untuk menentukan ukuran *meshing* yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan uji konvergensi yang membandingkan persen *error primary peak force* terhadap jenis struktur, ukuran elemen dan waktu komputasi yang diperlukan. Jenis struktur yang dibandingkan yaitu *solid* dan *shell*. Ukuran elemen struktur *solid* dimulai dari 3x3x3 (mm), 2.5x2.5x2.5 (mm), dan 2x2x2 (mm). Sedangkan untuk jenis struktur *shell* ukuran elemen dimulai dari 5x5 (mm), 4x4 (mm), 3x3 (mm), dan 2x2 (mm).

Setelah proses *modelling* dan uji konvergensi dilakukan. Proses selanjutnya yaitu validasi data. Validasi data dilakukan untuk memastikan hasil simulasi yang didapatkan akurat atau mendekati dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya. Dalam penelitian ini validasi dilakukan dengan hasil eksperimen yang sudah dilakukan oleh Langseth dan Hopperstad (1996) tentang uji statik dan uji dinamik pada *crash box* tipe *square* dengan pembebanan arah aksial. Jenis material yang digunakan adalah Aluminium AA6060-T4. Validasi juga dilakukan dengan hasil simulasi *software* Ls-Dyna yang sudah dilakukan oleh Kuznetcov dkk (2016) tentang efek *geometri crash box* tipe *square* dengan pembebanan arah aksial terhadap performa *crashworthiness*. Validasi juga dilakukan dengan persamaan teoritik Jones (1989) dalam bukunya [12]. Persamaan Jones dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$P_{mean} = 13.05\sigma_o t^2 (b/t)^{1/4} \left[1 + \left(\frac{0.33V}{bD} \right)^{1/q} \right] \quad (1)$$

Keterangan :

- P_{mean} = Mean Crushing Force (N)
- t = Ketebalan (mm)
- b = Lebar Penampang (mm)
- V = Kecepatan (m/s)
- D = Cowper-Symonds Strain Rate Material (/s)
- q = Strain Hardening Eksponen
- σ_o = Flow Strees (MPa)

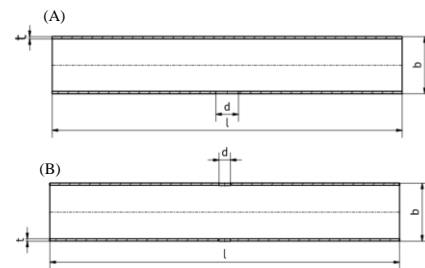
Besar *energy absorption* didapat dengan menggunakan Persamaan 2.

$$P_{mean} = EA / \delta \quad (2)$$

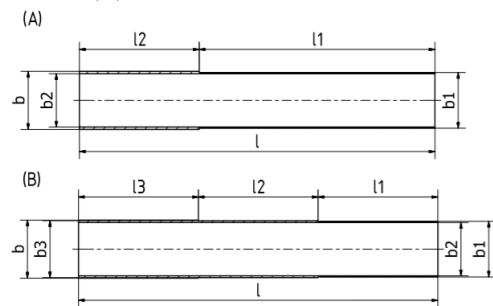
Keterangan :

- P_{mean} = Mean Crushing Force (N)
- EA = Energy Absorption (J)
- δ = Displacement (mm)

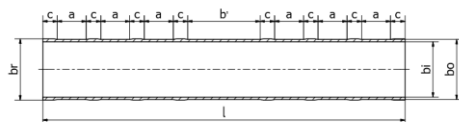
Optimasi desain tanpa modifikasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil parameter *crashworthiness* terhadap jenis material, ketebalan dinding *crash box* (t), lebar penampang *crash box* (b), dan panjang *crash box* (l). Desain optimal hasil optimasi desain *crash box* tanpa modifikasi dijadikan sebagai desain yang akan dioptimasi dengan penambahan modifikasi. Optimasi desain dengan modifikasi dilakukan dengan penambahan *hole* (*trigger*), multi segmen, dan *rib*. Geometri permodelan *crash box* modifikasi dapat dilihat pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 6.



Gambar 4. (A) Geometri *Crash Box* 1 Hole
(B) Geometri *Crash Box* 2 Hole



Gambar 5. (A) Geometri *Crash Box* 2 Segmen
(B) Geometri *Crash Box* 3 Segmen



Gambar 6. Geometri *Crash Box* dengan Penambahan *Rib*

Keterangan :

- b = Panjang Sisi *Crash Box* (mm)
- d = Diameter *Hole* (mm)
- l = Panjang *Crash Box* (mm)
- t = Thickness (mm)
- $l1$ = Panjang *Crash Box* Segmen 1 (mm)
- $l2$ = Panjang *Crash Box* Segmen 2 (mm)
- $l3$ = Panjang *Crash Box* Segmen 3 (mm)

- b1 = Lebar Penampang *Crash Box* Segmen 1 (mm)
 b2 = Lebar Penampang *Crash Box* Segmen 2 (mm)
 b3 = Lebar Penampang *Crash Box* Segmen 3 (mm)
 br = Lebar Penampang *Crash Box* Dengan *Rib* (mm)
 bo = Lebar Penampang *Crash Box* Luar (mm)
 bi = Lebar Penampang *Crash Box* Dalam (mm)
 a = Jarak Antar *Rib* (mm)
 b' = Jarak Antar *Rib* Paling Dalam (mm)
 c = Panjang *Rib* (mm)

Optimasi desain bertujuan untuk mendapatkan desain *crash box* yang memiliki parameter *crashworthiness* paling optimal. Adapun parameter *crashworthiness* pada *crash box* yaitu :

1. *Primary peak force* (Pmax)

Primary peak energy merupakan gaya yang terjadi saat modul pertama kali terdeformasi.

2. *Mean crushing force* (Pmean)

Mean crushing force (Pmean) merupakan gaya rata-rata yang dibutuhkan untuk membuat suatu struktur terdeformasi. *Mean crushing force* dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 3.

$$P_{mean} = EA / \delta \quad (3)$$

3. *Energy absorption* (EA)

Total energi terserap (EA) merupakan jumlah keseluruhan hasil kali antara gaya hancur dengan perpindahan. Hasil simulasi yang didapatkan berupa grafik *force-displacement*. Secara sederhana, besar total energi yang terserap merupakan luas daerah terarsir dibawah grafik *force-displacement*.

4. *Specific energy absorption* (SEA)

Specific energy absorption didefinisikan sebagai energi yang diserap per unit massa. Nilai *specific energy absorption* dapat dicari menggunakan Persamaan 4.

$$SEA = EA / m \quad (4)$$

5. *Crushing force efficiency* (CFE)

Efisiensi gaya hancur merupakan suatu parameter yang membandingkan antara *mean crushing force* dengan *primary peak force*. *Crushing force efficiency* dapat dicari menggunakan Persamaan 5.

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \quad (5)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji Konvergensi

Uji konvergensi dilakukan untuk mendapatkan ukuran elemen (*mesh*) yang optimal terhadap persen *error* dan waktu komputasi simulasi. Berikut hasil uji konvergensi yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Tabel Hasil Uji Konvergensi

Ukuran <i>mesh</i> (mm)	Jenis Struktur	Jumlah Elemen	t, (detik)	P _{max} (kN)	% <i>Error</i> (%)
3x3	<i>Shell</i>	11445	1946	102.05	0.18
2x2	<i>Shell</i>	25121	6866	101.87	
3x3	<i>Shell</i>	11445	1946	102.05	4.71
2x2x2	<i>Solid</i>	61391	12537	97.24	

Dimana t merupakan waktu komputasi simulasi dan % *error* merupakan persentase *error* antar ukuran dan jenis *mesh* yang digunakan. Dari hasil uji konvergensi pada Tabel 6 persentase *error* Pmax jenis struktur *shell* dengan ukuran *mesh* 3x3 (mm) dan 2x2 (mm) sangat kecil yaitu sebesar 0.18%. Nilai Pmax jenis struktur *shell* dengan ukuran *mesh* 3x3 (mm) dan jenis struktur *solid* dengan ukuran *mesh* 2x2 (mm) memiliki persentase *error* yang kecil yaitu sebesar 4.71%. Jenis struktur *shell* dengan ukuran *mesh* 3x3 (mm) memiliki waktu komputasi yang lebih singkat dibandingkan dengan jenis struktur *shell* dengan ukuran *mesh* 2x2 (mm) dan jenis struktur *solid* dengan ukuran *mesh* 2x2 (mm). Berdasarkan hasil uji konvergensi yang dilakukan jenis struktur *shell* dengan ukuran *mesh* 3x3 ditetapkan sebagai jenis struktur dan ukuran *mesh* yang digunakan dalam simulasi optimasi desain *crash box* karena memiliki persentase *error* Pmax yang relative kecil dan waktu komputasi yang lebih singkat dibandingkan jenis dan ukuran *mesh* lainnya.

3.2 Uji Validitas

Sebelum dilakukannya optimasi desain data hasil simulasi dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan peneliti-peneliti sebelumnya dan hasil perhitungan secara teoritis. Adapun hasil uji validitas dapat dilihat pada Tabel 7, Tabel 8, dan Tabel 9.

Tabel 7. Validasi Data dengan Hasil Eksperimen

	Eksperimen (Langseth dan Hopperstad, 1996)	Simulasi Abaqus	Persen <i>Error</i> (%)
EA (J)	6578.50	6522.88	0.85
Pmax (kN)	107.00	102.06	4.62
Pmean (kN)	42.50	46.55	9.52

Dari hasil validasi terhadap hasil eksperimen Langseth dan Hopperstad (1996) didapat persentase *error* EA dan Pmax relative kecil yaitu dibawah 5 % dan persentase *error* Pmean dibawah 10%.

Tabel 8. Validasi Data dengan Hasil Simulasi

	Simulasi <i>Ls Dyna</i> (Kuznetcov dkk 2016)	Simulasi Abaqus	Persen <i>Error</i> (%)
EA (J)	6872.80	6522.88	5.09
Pmax (kN)	96.9	102.06	5.32
Pmean (kN)	44.4	46.55	4.84

Dari hasil validasi dengan hasil Simulasi Kuznetcov dkk (2016) didapat persentase *error* EA, Pmax, dan Pmean dibawah 6%.

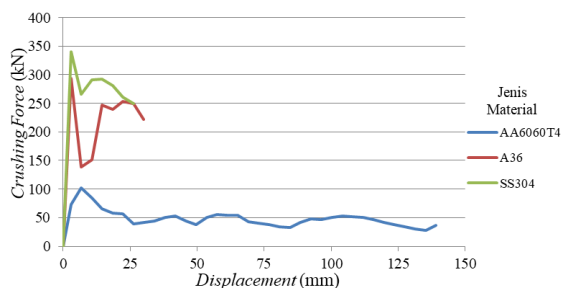
Tabel 9. Validasi Data dengan Hasil Perhitungan Teoritis

	Teoritis	Simulasi Abaqus	Persen Error (%)
EA (J)	6814.08	6522.88	4.27
Pmean (kN)	43.08904	46.55	8.03

Dari hasil validasi dengan hasil perhitungan teoritis didapat persentase *error* EA, dan Pmean dibawah 9%. Berdasarkan persentase *error* tersebut hasil data simulasi dinyatakan *valid* dan bisa digunakan untuk penelitian selanjutnya.

3.3 Pengaruh Jenis Material terhadap Parameter Crash Box

Jenis material yang digunakan mempengaruhi parameter *crashworthiness* pada *crash box*. oleh karena itu, sebelum dilakukannya optimasi desain, dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh jenis material terhadap parameter *crashworthiness* pada desain *crash box* sebelum optimasi. Perbandingan material yang digunakan adalah Alumunium AA6060-T4, *Mild Steel* A36, dan *Stainless Steel* 304. Adapun grafik *force-displacement* terhadap jenis material dapat dilihat pada Gambar 7 dan pengaruh jenis material terhadap parameter *crashworthiness* dapat dilihat pada Tabel 10.



Gambar 7. Grafik Pengaruh Jenis Material terhadap Nilai Force-Displacement

Tabel 10. Pengaruh Jenis Material terhadap Parameter *Crashworthiness* Crash Box

Jenis Material	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pmean (kN)	CFE (%)
AA6060 T4	6.52	9.97	102.05	46.55	45.60
<i>Mild steel</i> A36	5.83	3.09	293.43	193.55	65.96
<i>Stainless Steel</i> 304	6.39	3.32	340.81	243.31	71.39

Berdasarkan Tabel 10 jenis material *Mild Steel* A36 dan *Stainless Steel* 304 menurunkan besar *energy absorption* dan *specific energy absorption* serta meningkatkan besar *primary peak force* dan *mean crushing force*. Material Alumunium AA6060-T4 dipilih sebagai material yang memiliki

parameter *crashworthiness* paling optimal dikarenakan Alumunium AA6060-T4 mampu menyerap energi impact paling besar, meningkatkan *specific energy absorption* dan menurunkan besar *primary peak force*. Hal ini dikarenakan material alumunium memiliki modulus elastisitas yang lebih kecil dari pada kedua material lainnya. Semakin kecil modulus elastisitas semakin mempermudah terjadinya deformasi dan memaksimalkan penyerapan energi impact.

Hasil penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Liu dan Ding (2016), material alumunium mampu menyerap energi impact dengan optimal dan memiliki *primary peak force* yang paling kecil dibandingkan dengan material *carbon steel* [13].

3.4 Pengaruh Variasi Thickness terhadap Parameter Crashworthiness Crash Box

Optimasi desain dengan variasi *thickness* dilakukan dengan memvariasikan *thickness* (t) mulai dari 0.5 mm sampai dengan 5 mm. Adapun hasil optimasi desain dengan variasi *thickness* dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Pengaruh Variasi Thickness terhadap Parameter *Crashworthiness* Crash Box

Kode Spesimen	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pm (kN)	CFE (%)
T05	0.57	11.71	14.111	2.72	19.31
T10	2.60	9.73	28.303	10.58	37.36
T15	4.20	10.56	56.576	29.96	52.96
T20	6.47	12.28	75.761	33.26	43.90
T25	6.52	9.97	102.059	46.55	45.61
T30	6.04	7.75	123.705	64.69	52.29
T35	6.78	7.50	155.167	87.09	56.13
T40	6.67	6.50	179.628	114.32	63.65
T45	6.24	5.44	202.571	133.59	65.95
T50	6.74	5.32	202.571	144.24	71.20

Dimana T berarti *thickness* dan dua angka setelahnya menyatakan nilai ketebalan. Berdasarkan Tabel 11 semakin bertambah *thickness* semakin meningkat *energy absorption*, *primary peak force*, *mean crushing force*, dan *crushing force efficiency*. Semakin bertambah *thickness* semakin menurun besar *specific energy absorption*. Hasil Penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Kuznetcov dkk (2016) yaitu dengan semakin bertambahnya *thickness* semakin meningkat *energy absorption*, *primary peak force*, *mean crushing force*, dan semakin menurun *specific energy absorption*. Berdasarkan Tabel 11 spesimen dengan *thickness* 2 (T20) mm ditetapkan sebagai desain *crash box* dengan variasi *thickness* paling optimal.

3.5 Optimasi Desain dengan Variasi Lebar Penampang Crash Box

Optimasi desain dengan variasi lebar penampang *crash box* dilakukan dengan memvariasikan lebar penampang (b) mulai dari 30 mm sampai dengan 100 mm. Adapun hasil optimasi

desain dengan variasi lebar penampang dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Pengaruh Variasi Lebar Penampang terhadap Parameter *Crashworthiness Crash Box*

Kode Spesimen	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pm (kN)	CFE (%)
B30	5.70	30.14	35.7	26.23	73.42
B40	5.74	22.33	43.6	26.40	60.51
B50	6.38	19.69	50.7	29.35	57.90
B60	6.65	16.96	59.7	30.55	51.20
B70	6.71	14.61	66.8	30.87	46.21
B80	6.79	12.88	75.6	31.50	41.68
B90	6.78	11.42	84.8	32.95	38.83
B100	6.75	10.19	93.5	35.13	37.59

Dimana B berarti lebar penampang dan dua angka setelahnya menyatakan lebar penampang. Berdasarkan Tabel 12 semakin bertambah lebar penampang semakin meningkat *energy absorption*, *primary peak force* dan *mean crushing force*. Semakin bertambah lebar penampang semakin menurun besar *crushing force efficiency* dan *specific energy absorption*. Hasil Penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Wirayudhia (2007) yaitu dengan semakin bertambahnya lebar penampang maka *mean crushing force* dan *primary peak force* akan semakin meningkat [4]. Berdasarkan Tabel 12 spesimen dengan lebar penampang 50 mm (B50) ditetapkan sebagai desain *crash box* dengan variasi lebar penampang paling optimal.

3.6 Optimasi Desain dengan Variasi Panjang *Crash Box*

Optimasi desain dengan variasi panjang *crash box* dilakukan dengan memvariasikan panjang (l) *crash box* mulai dari 200 mm sampai dengan 350 mm. Adapun hasil optimasi desain dengan variasi panjang *crash box* dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Pengaruh Variasi Panjang *Crash Box* terhadap Parameter *Crashworthiness Crash Box*

Nomor Spesimen	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pm (kN)	CFE (%)
L350	6.77	18.49	50.16	29.03	57.87
L340	6.81	19.13	50.17	28.98	57.76
L330	6.60	19.13	50.27	28.56	56.81
L320	6.53	19.48	50.49	29.22	57.87
L310	6.38	19.69	50.69	29.35	57.90
L300	6.19	19.73	50.74	29.57	58.27
L290	6.07	20.03	50.59	29.79	58.87
L280	5.78	19.73	50.54	29.51	58.38
L270	5.42	19.24	50.76	28.84	56.82
L260	5.30	19.48	50.99	29.07	57.01
L250	5.05	19.35	51.46	28.92	56.21
L240	4.89	19.48	51.46	28.98	56.31
L230	4.83	20.04	52.47	30.03	57.23
L220	4.61	20.04	52.95	30.10	56.85
L210	4.40	19.99	53.40	29.87	55.93
L200	4.21	20.15	53.89	30.21	56.06

Dimana L berarti Panjang dan angka setelahnya menyatakan panjang *crash box*. Berdasarkan Tabel 13 semakin bertambah panjang *crash box* semakin meningkat *energy absorption* dan *crushing force*

efficiency. Semakin bertambah panjang *crash box* semakin menurun besar *specific energy absorption*, *primary peak force*, dan *mean crushing force*. Hasil simulasi ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Chairon dkk (2015). Dalam penelitian Chairon dkk (2015) panjang *crash box* meningkatkan *energy absorption* dan menurunkan *specific energy absorption*. Berdasarkan Tabel 13 spesimen dengan panjang *crash box* 310 mm (L310) ditetapkan sebagai desain *crash box* dengan variasi panjang *crash box* paling optimal.

3.7 Hasil Optimasi Tanpa Modifikasi

Setelah dilakukan proses optimasi desain *crash box* tanpa modifikasi didapatkan desain *crash box* tanpa modifikasi paling optimal yaitu desain *crash box* dengan kode spesimen L310. Desain *crash box* tanpa modifikasi yang paling optimal kemudian dibandingkan dengan desain *crash box* sebelum optimasi. Hasil perbandingan ini dapat dilihat pada Tabel 14.

Tabel 14. Parameter *Crashworthiness* Desain Awal dan Desain Setelah Optimasi

Kode Spesimen	Parameter <i>Crashworthiness</i>				
	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pmean (kN)	CFE (%)
Desain Awal (Kuznetcov dkk (2016))	6.58	10.06	107	42.5	39.71
Spesimen L310)	6.38	19.69	50.69	29.35	57.89
Perubahan,%	3	95.72	52.62	30.94	50.81

Berdasarkan Tabel 14, setelah dilakukannya optimasi tanpa modifikasi didapatkan hasil berupa peningkatan *specific energy absorption* sebesar 95.72%, peningkatan *crushing force efficiency* sebesar 50.81% penurunan *primary peak force* sebesar 52.62 %, penurunan *mean crushing force* sebesar 30.94%, dan penurunan *energy absorption* sebesar 3%. Secara garis besar terjadi peningkatan parameter *crashworthiness*. Namun *energy absorption* yang mampu diserap menurun. Oleh karena itu dilakukan kembali optimasi pada desain spesimen L310 untuk meningkatkan besar parameter *crashworthiness*. Optimasi dengan modifikasi menggunakan penambahan *hole (trigger)*, multi segmen dan *rib*.

3.8 Optimasi Desain dengan Penambahan 1 *Hole (Trigger)*

Optimasi desain dengan modifikasi berupa penambahan 1 lubang (d) pada tengah-tengah salah satu sisi *crash box*. Ukuran lubang divariasikan dengan rasio perbandingan diameter lubang terhadap lebar penampang (d/b) mulai dari 0.1 sampai dengan 0.9. Adapun hasil optimasi desain dengan pemberian 1 *hole* dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15. Pengaruh Penambahan 1 Hole terhadap Parameter *Crashworthiness Crash Box*

Kode Spesimen	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pmean (kN)	CFE (%)
H101	4.83	14.92	50.63	22.23	43.91
H102	4.83	14.91	50.45	22.21	44.04
H103	4.88	15.12	49.92	22.46	44.99
H104	5.13	15.95	48.71	23.62	48.50
H105	4.74	14.76	45.56	21.78	47.80
H106	4.58	14.33	43.80	21.08	48.13
H107	4.57	14.34	40.31	26.09	64.72
H108	4.33	13.62	34.95	19.92	57.00
H109	4.31	13.61	33.98	19.84	58.40

Dimana H berarti *hole*, 1 menandakan jumlah lubang, dan 2 angka dibelakang kode menerangkan rasio d/b. Berdasarkan Tabel 15 penambahan 1 hole mempengaruhi parameter *crashworthiness crash box*. Semakin besar perbandingan d/b akan meningkatkan *crushing force efficiency*. Semakin besar perbandingan d/b akan menurunkan *energy absorption*, *specific energy absorption*, *primary peak force*, dan *mean crushing force*. Hasil yang didapat dari simulasi abaqus tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimen dan numerik yang dilakukan oleh Sitompul (2013). Dimana dalam penelitian yang dilakukan oleh Sitompul (2013) didapatkan hasil berupa peningkatan *crushing force efficiency* yang terjadi pada *crash box* dengan pemberian 1 hole pada salah satu sisi *crash box* dan penurunan besar *mean crushing force* dan *primary peak force* seiring dengan semakin besarnya rasio d/b yang diberikan kepada *crash box* [14]. Berdasarkan Tabel 15 desain dengan kode spesimen H104 ditetapkan sebagai desain yang paling optimal diantara desain *crash box* dengan penambahan 1 hole lainnya.

3.9 Optimasi Desain dengan Penambahan 1 Hole (Trigger).

Optimasi desain dengan modifikasi berupa pemberian 2 lubang (d) pada tengah-tengah salah dua sisi *crash box*. Ukuran lubang divariasikan dengan rasio perbandingan diameter lubang terhadap lebar penampang (d/b) mulai dari 0.1 sampai dengan 0.9. Adapun hasil optimasi desain dengan pemberian 2 hole dapat dilihat pada Tabel 16.

Tabel 16. Pengaruh Penambahan 2 Hole terhadap Parameter *Crashworthiness Crash Box*

Kode Spesimen	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pmean (kN)	CFE (%)
H201	4.63	14.30	50.57	21.33	42.17
H202	5.21	16.12	49.91	23.94	47.97
H203	4.39	13.64	46.53	20.20	43.40
H204	4.92	15.31	44.87	22.62	50.42
H205	4.80	15.00	41.86	22.08	52.74
H206	4.50	14.11	34.42	20.72	60.20
H207	4.55	14.30	33.03	20.92	63.33
H208	4.39	13.85	30.60	20.19	65.97
H209	4.12	13.03	30.41	18.93	62.26

Dimana H berarti *hole*, 2 menandakan jumlah lubang, dan dua angka dibelakang kode menerangkan rasio d/b. Berdasarkan Tabel 16

penambahan 2 hole mempengaruhi parameter *crashworthiness crash box*. Semakin besar perbandingan d/b akan meningkatkan *crushing force efficiency*. Semakin besar perbandingan d/b akan menurunkan *energy absorption*, *specific energy absorption*, *primary peak force*, dan *mean crushing force*. Hasil yang didapat dari simulasi abaqus tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimen dan numerik yang dilakukan oleh Sitompul (2013). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Sitompul (2013) didapatkan hasil berupa peningkatan *crushing force efisiensi* yang terjadi pada *crash box* dengan pemberian 2 hole pada salah satu sisi *crash box* dan penurunan besar *mean crushing force* dan *primary peak force* seiring dengan semakin besarnya rasio d/b yang diberikan kepada *crash box* [14]. Berdasarkan Tabel 16 desain dengan kode spesimen H202 ditetapkan sebagai desain yang paling optimal diantara desain *crash box* dengan 2 hole lainnya.

3.10 Optimasi Desain dengan Penambahan Multi Segmen

Optimasi desain dengan modifikasi berupa pembagian panjang *crash box* menjadi beberapa bagian dengan variasi ketebalan yang berbeda antar bagian. Pada penelitian ini dibagi menjadi 4 spesimen yaitu terdiri dari 2 segmen dengan jarak segmen pertama 1/3 dari panjang *crash box* (S203), terdiri dari 2 segmen dengan jarak segmen pertama 1/2 dari panjang *crash box* (S205), terdiri dari 2 segmen dengan panjang segmen kedua 1/3 dari panjang *crash box* (S207), dan terdiri dari 3 segmen dengan jarak antar segmen 1/3 dari panjang *crash box* (S3037). Adapun hasil optimasi desain dengan pemberian multi segmen dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Pengaruh Penambahan Multi Segmen terhadap Parameter *Crashworthiness Crash Box*

Kode Spesimen	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pmean (kN)	CFE (%)
S203	1.87	5.78	15.93	14.67	92.08
S205	3.42	10.56	17.71	15.76	89.02
S207	2.74	8.49	17.14	12.62	73.63
S3037	3.28	10.18	19.07	15.07	79.02

Berdasarkan Tabel 17 penambahan multi segmen mempengaruhi parameter *crashworthiness crash box*. *Energy absorption* terbesar didapat pada spesimen S205 yaitu sebesar 3.42 kJ. *Specific energy absorption* terbesar terdapat pada spesimen S205 yaitu sebesar 10.56 kJ/kg. *Primary peak force* terkecil terjadi pada spesimen S203. *Mean crushing force terbesar* didapat pada spesimen S205. *Crushing force efficiency* terbesar terjadi pada spesimen S203. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Halman. et al (2018) melakukan eksperimen dengan membagi spesimen menjadi 3 spesimen uji. Dimana setiap spesimen memiliki 2 segmen dengan letak

sambungan divariasikan menjadi 1/4, 1/3 dan 1/2 dari panjang *crash box*. Dari penelitian yang dilakukan Halman. et al (2018) didapatkan hasil berupa spesimen yang memiliki *energy absorption* terbesar adalah spesimen dengan posisi sambungan segmen berada di 1/2 dari panjang *crash box*. Spesimen ini memiliki *energy absorption* terbesar dikarenakan besarnya gaya reaksi terjadi pada spesimen. Spesimen dengan kode S205 ditetapkan sebagai spesimen yang memiliki parameter *crashworthiness* paling optimal dengan penambahan multi segmen.

3.11 Optimasi Desain dengan Penambahan Rib

Optimasi desain dengan modifikasi berupa *rib* disepanjang *crash box*. Pada penelitian ini dibagi menjadi 4 spesimen yaitu tanpa *rib* (R00), penambahan 2 *rib* (R02), penambahan 4 *rib* (R04), dan penambahan 6 *rib* (R06). Adapun hasil optimasi desain dengan pemberian multi segmen dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18. Pengaruh Penambahan Rib terhadap Parameter *Crashworthiness Crash Box*

Kode Spesimen	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pmean (kN)	CFE (%)
R00	3.40	10.50	42.32	26.65	62.97
R02	5.26	16.22	40.45	24.17	59.76
R04	6.25	19.35	40.00	28.70	71.75
R06	6.40	19.89	39.97	29.46	73.71

Berdasarkan Tabel 18 penambahan *rib* mempengaruhi parameter *crashworthiness crash box*. Semakin bertambahnya jumlah *rib* meningkatkan *energy absorption*, *specific energy absorption*, *mean crushing force*, dan *crushing force efficiency* serta menurunkan *primary peak force*. Tadaharu dkk (2006) melakukan penelitian mengenai *energy absorption* pada struktur ber dinding tipis dengan penambahan *rib* pada beban arah aksial. dari penelitian yang dilakukan Tadaharu dkk (2006) didapatkan hasil berupa penambahan *rib* pada struktur *crash box* ber dinding tipis mampu meningkatkan besar *energy absorption*. Spesimen dengan kode R06 ditetapkan sebagai spesimen yang memiliki parameter *crashworthiness* paling optimal dengan penambahan *rib*.

3.12 Hasil Optimasi Desain dengan Modifikasi

Hasil optimasi desain dengan modifikasi dibandingkan dengan hasil optimasi desain tanpa modifikasi (L310). Adapun hasil optimasi desain dengan modifikasi dapat dilihat pada tabel 19.

Tabel 19. Hasil Optimasi Desain dengan Modifikasi

Kode Spesimen	Parameter <i>Crashworthiness</i>				
	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	Pmax (kN)	Pmean (kN)	CFE (%)
L310	6.38	19.69	50.69	29.35	57.90
H104	5.13	15.95	48.71	23.62	48.50
H202	5.21	16.12	49.91	23.94	47.97
S205	3.42	14.19	17.71	15.76	89.02

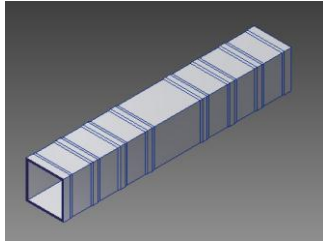
R06	6.40	18.78	39.97	29.46	73.71
-----	------	-------	-------	-------	-------

Berdasarkan Tabel 19, spesimen H104 menurunkan besar *energy absorption crash box* tanpa modifikasi sebesar 1.25 kJ (19.59%). Spesimen H104 menurunkan besar *primary peak force* dari desain *crash box* tanpa modifikasi sebesar 1.98 kN (3.9%). Spesimen H104 menurunkan besar *mean crushing force* tanpa modifikasi sebesar 5.75 kN (19.52%). Spesimen H104 menurunkan CFE *crash box* tanpa modifikasi sebesar 9.4% (16.23%). Spesimen H104 menurunkan *specific energy absorption* sebesar 3.74 kJ/kg (15.99%).

Berdasarkan Tabel 19, spesimen H202 menurunkan besar *energy absorption crash box* tanpa modifikasi sebesar 1.17 kJ (18.3%). Spesimen H202 menurunkan besar *primary peak force* dari desain *crash box* tanpa modifikasi sebesar 0.78 kN (15.3%). Spesimen H202 menurunkan besar *mean crushing force* tanpa modifikasi sebesar 5.41 kN (18.43%). Spesimen H202 menurunkan CFE *crash box* tanpa modifikasi sebesar 9.93 % (17.15%). Spesimen H202 menurunkan *specific energy absorption* sebesar 1.17 kJ/kg (18.13%).

Berdasarkan Tabel 19, spesimen S205 menurunkan besar *energy absorption crash box* tanpa modifikasi sebesar 2.96 kJ (40.39%). Spesimen S205 menurunkan besar *primary peak force* dari desain *crash box* tanpa modifikasi sebesar 32.98 kN (65.06%). Spesimen S205 menurunkan besar *mean crushing force* tanpa modifikasi sebesar 13.59 kN (46.30%). Spesimen S205 meningkatkan CFE *crash box* tanpa modifikasi sebesar 31.12% (53.74%). Spesimen S205 menurunkan *specific energy absorption* sebesar 5.5 kJ/kg (27.93%).

Berdasarkan Tabel 19, spesimen R06 memiliki *energy absorption* yang paling besar dibandingkan spesimen lainnya, yaitu sebesar 6.4 kJ dan mampu meningkatkan besar *energy absorption crash box* tanpa modifikasi. Peningkatan *energy absorption* terjadi sebesar 0.02 kJ (0.37%). Spesimen R06 mampu menurunkan besar *primary peak force* dari desain *crash box* tanpa modifikasi sebesar 10.72 kN (21.16 %). Spesimen R06 adalah spesimen yang memiliki *mean crushing force* terbesar yaitu sebesar 29.46 kN dan mampu meningkatkan besar *mean crushing force* tanpa modifikasi sebesar 0.11 kN (0.37%). Spesimen R06 juga memiliki CFE yang cukup besar dan mampu meningkatkan CFE *crash box* tanpa modifikasi sebesar 15.81% (27.32%). Namun spesimen R06 memiliki SEA yang sedikit lebih kecil dibandingkan *crash box* tanpa modifikasi yaitu lebih kecil sebesar 0.91 kJ/kg (4.63%). Sehingga didapatkan desain yang memiliki parameter *crashworthiness* yang paling optimal adalah spesimen dengan kode R06 yang merupakan model desain *crash box* yang menggunakan 6 buah *rib* yang terdapat disepanjang *crash box*. *Crash box rib* R06 ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Desain Crash box Spesimen R06

4. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan desain *crash box* yang memiliki parameter *crashworthiness* paling optimal adalah *crash box* dengan modifikasi desain berupa penambahan *rib* (R06). Spesimen R06 mampu meningkatkan *energy absorption* (EA) sebesar 0.02 kJ (0.37 %), menurunkan *primary peak force* (Pmax) sebesar 10.72 kN (21.16%), meningkatkan *mean crushing force* (Pmean) sebesar 0.11 kN (0.37%), meningkatkan *crushing force efficiency* (CFE) sebesar 15.81% (27.32%), namun menurunkan *specific energy absorption* (SEA) sebesar 0.91 kJ/kg (4.63%).

Daftar Pustaka

- [1] Badan Pusat Statistik. 2018. Jumlah Kecelakaan, Korban Mati, Luka Berat, Luka Ringan, dan Kerugian Materi yang Diderita Tahun 1992-2016. BPS-Statistics Indonesia. <https://www.bps.go.id/dynamictable/2016/02/09/1134/jumlah-kecelakaan-koban-mati-luka-berat-luka-ringan-dan-kerugian-materi-yang-diderita-tahun-1992-2016.html> (diakses 2 November 2018).
- [2] Wirayudhia, I. 2007. Kaji Parametrik Kasus Tumbukan Kecepatan Rendah pada Tabung Berpenampang Bujursangkar dengan Metode Elemen Hingga. Laporan Tugas Akhir. Program Studi Penerbangan Institute Teknologi Bandung.
- [3] Velmurugan, R., dan Muralikannan, R. 2009. Energy Absorption Characteristics of Annealed Steel Tubes of Various Cross Section in Static and Dynamic Loading. *Latin American Journal of Solid and Structures* 6, pp (2009) : 385-412.
- [4] Hussain, Nasir, N., Regella, S. P., dan Rao, Y. V. D. 2016. Comparative study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading. *Proc. 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics*. Telangana State. pp (2016): 1390-1398.
- [5] Halman, Choiron, M. A., dan Darmadi, D. B. 2017. Kemampuan Penyerapan Energi Crash Box Multi Segmen Menggunakan Simulasi Komputer. *Prosiding SNTT*. Malang. pp (2017): 1-6.
- [6] Adachi, T., Tomiyama, A., Araki, W., dan Yamaji, A. 2008. Energy absorption of a thin-walled cylinder with ribs subjected to axial impact. *International Jurnal of Impact Engineering* 35 : 65-79.
- [7] Kuznetcov, Anton., Telichev, Igor., Wu, Christine Q., 2016. Effect of Twin-walled Tube Geometry on Its Crashworthiness Performance. *14th International LS-DYNA Users Conference*.
- [8] Langseth, M. dan Hopperstad, O. S., 1996. Static and Dynamic Axial Crushing of Square Thin-Walled Aluminium Extrusions. *International Journal of Impact Engineering* 18(7-8) : 949-968
- [9] Jusuf, Annisa., Allam, Fajri Syah., Dirgantara, Tatacipta., Gunawan, Leonardo., dan Putra, Ichsan Setya., 2011. Low Velocity Impact Analyses of Prismatic Columns using Finite Element Method. *Key Engineering Materials* 462-463. Switzerland. pp 1308-1313
- [10] Tarlochan, F., Samer, F., Hamouda, A. M. S., Ramesh, S., dan Khalid, K. 2013 Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Twin-Walled Structures* 71 : 7-17.
- [11] Karagiozova, D. 2013. Dynamic Elastic-Plastic Buckling Of Structural Elements : A Review. *Applied Mechanics Reviews* 61 : 1-26
- [12] Jones, N. 1989. *Structural Impact*. New York: Cambridge University Press.
- [13] Liu, Y., Ding, L. 2016. A study of using different crash box types in automobile frontal collision. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology* 17 : 21,1-21.5
- [14] Sitompul, Sahril Afandi., 2013. "Numerical and Eksperimental Impact Analysis of Square Crash Box Structure with Holes. Thesis Defence. Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering Institute Teknologi Bandung.