# V11 N3



**Muhammad Rismanto** 

muhammad.rismanto95@gmail.com

Moch. Agus Choiron

Tenaga Pengajar (Dosen)

Tenaga Pengajar (Dosen)

Universitas Brawijaya

Jurusan Teknik Industri Sugiono\_ub@ub.ac.id

Universitas Brawijaya

Jurusan Teknik Mesin Agus\_choiron@ub.ac.id

Mahasiswa

Sugiono

Universitas Brawijaya

Jurusan Teknik Mesin

# OPTIMASI PARAMETER DESAIN MULTI-CELL HEXAGONAL CRASH BOX TERHADAP ABSORBSI ENERGY IMPACT DENGAN METODE TAGUCHI

*The crash box is a passive safety system placed between the bumper* and the mainframe of the car that functions as an energy absorber to reduce the impact of driving accidents. The purpose of this study is to determine the optimal level of factors and analyze the factors that provide the most significant effect on energy absorption in a multicell hexagonal crash box. Identification of parameters that affect the crash box in energy absorption, namely: the position of placement hole (P), the distance of position hole (L), the thickness of crash box (t), and the hole diameter (D). The modeling method has used the design of the crash box by utilizing a computer simulation with software ANSYS 17.0. This research uses aluminum material type AA 6061-T4 and impactor material uses structural steel. Modeling loading using the frontal crash test method. In this modeling, the impactor with a speed of 7.67 m/s with a deformation length of 100 mm. This research uses the experimental design of the Taguchi method with the  $L_{27}$  orthogonal array. The optimization result were obtained optimum design parameter multi-cell hexagonal crash box with parameter settings P = inner wall; L = 112.5 mm; t = 2 mm, and D = 6.6 mm. Based on the calculated F value  $\geq F$  Table, the factors P, t, and D affect the ability to absorb energy. Thickness crash box (t) has the highest contribution of 98.10% in increasing the value of energy absorption.

**Keywords:** *Multi-Cell Hexagonal Crash Box, Hole, Deformation Pattern, Energy Absorption, Taguchi Method* 

# 1. PENDAHULUAN

Jumlah kendaraan bermotor di Indonesia mengalami peningkatan dari tahun 2016 – tahun 2017. Data BPS tahun 2018 menginformasikan bahwa jumlah kendaraan bermotor tahun 2017 sekitar 15,5 juta, naik jika dibandingkan dengan tahun 2016 yaitu sekitar 14,5 juta. Kondisi tersebut menunjukkan laju peningkatan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia sangat pesat. Peningkatan jumlah kendaraan akan berdampak terhadap potensi peningkatan kecelakaan di jalan [1]. Produsen otomotif berusaha keras mengembangkan dan meneliti sistem keamanan pada mobil jika terjadi kecelakaan. Salah satu perangkat sistem keamanan pasif (*passive safety system*) adalah *Crash Box* [2]. *Crash box* didesain sedemikian rupa sehingga dapat menyerap energi kinetik ketika mobil terjadi benturan saat kecelakaan [3].

Pengembangan desain *crash box* dengan tujuan untuk meningkatkan kemampuan penyerapan energi *impact*. Kenaikan penyerapan energi biasanya ditandai dengan pola deformasi berbentuk lipatan (*folding*) yang simetris. Berdasarkan [4] diperoleh data jenis kecelakaan lalu lintas berdasarkan arah tabrakan. Kecelakaan arah depan kendaraan (*frontal*) sekitar 64%, hal ini sangat mendominasi dibandingkan dengan kecelakaan arah *oblique* dan *roll over* seperti Gambar 1.

Received on: February 2020



Gambar 1: Persentase tumbukan kendaraan berdasarkan arah tumbukan [4]

Pengembangan desain *crash box* dengan penampang persegi (*square*), persegi panjang (*rectangular*) dan lingkaran (*circle*) dengan pengujian *quasi static* dan dinamik telah dikembangkan [5]. Bentuk penampang hexagonal mempunyai kemampuan *crashworthiness performance* dan menyerap energi yang tinggi pada uji oblique loads [6-7]. Peningkatan ketebalan dengan pengurangan sudut lancip dapat meningkatkan penyerapan energi dengan *critical buckling load* yang rendah [8]. *Crash box multi-segment* telah dipertimbangkan sebagai solusi alternatif untuk meningkatkan kinerja penyerapan energi [9]. Desain lain yang dikembangkan adalah *crash box multi-cell* yang menghasilkan interaksi antara dinding dalam dan dinding luar sehingga menstabilkan perkembangan *folding* selama tabrakan berlangsung [10-11].

*Crash initiator* diperlukan untuk mengoptimalkan penyerapan energi *impact* pada *crash box, crash initiator* adalah bentuk pada dinding *crash box* yang diharapkan dapat meningkatkan penyerapan energi dan pola deformasi serta mengurangi resiko terjadinya beban *buckling*. Bentuk *crash initiator* terdiri dari *hole, diamond, beads* dan *rib* [12]. Penambahan lubang dilokasi yang berbeda baik di dinding dalam maupun dinding luar pada bi-tubular profiles *crashworthiness performance* dapat meningkatkan *crush force efficiency* dan penyerapan energi [13]. Penambahan lubang pada *crash box* penampang persegi dengan perbedaan rasio lebar dapat meningkatkan penyerapan energi *impact* dalam *buckling progresif*. Hal tersebut dikarenakan lokasi pertama terjadinya deformasi plastis berawal dari lubang sehingga mengakibatkan *peak crush force* menurun *dan mean crushing Force* relatif konstan [14]. Optimasi posisi lubang dan ketebalan *conical absorbers* menggunakan algoritma NSGA-III dan MOEA/D. Efisiensi *Crush force capped-end absorbers* meningkat dengan meningkatnya ketebalan dan peningkatan ketinggian lubang. Posisi lubang yang optimal berada di bagian atas *conical absorbers* [15].

Selama beberapa tahun ini, telah banyak penelitian mengenai pengembangan dari *crash box* dengan penambahan lubang/*crash initiator* dan *multi-cell* yang dilakukan secara eksperimental maupun secara numerik. Namun demikian, penelitian yang menganalisis level dari faktor yang optimal dan parameter yang berpengaruh terhadap respon dengan pendekatan statistik belum ditemui dalam literatur. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan level dari faktor yang optimal dan menguji faktor yang memberikan efek paling signifikan terhadap penyerapan energi *impact* pada *multi-cell hexagonal crash box* menggunakan metode Taguchi dan ANOVA.

# 2. METODE DAN BAHAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi komputer dengan *software ANSYS* 17.0. Model geometri yang digunakan dalam penelitian ini adalah *multi-cell hexagonal crash box*, yang terdiri dari 2 komponen yaitu hexagonal dalam dan hexagonal luar serta penambahan lubang yang berlawanan. *Multi-cell hexagonal crash box* memiliki geometri diameter hexagonal luar d<sub>out</sub> = 39,4 mm dan diameter hexagonal dalam d<sub>in</sub> = 29,5 mm seperti pada Gambar 2.



Gambar 2: Jarak posisi lubang multi-cell hexagonal crash box

Penelitian ini menggunakan material aluminium tipe AA 6061-T4 dan material impactor menggunakan *structural steel* seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Properti material crash box dan impactor

PROPERTIES MATERIAL	CRASH BOX	IMPACTOR
Massa Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	2790	5,2436 x 10 <sup>5</sup>
Modulus Elastisitas (MPa)	70000	2 x 10 <sup>5</sup>
Poisson Ratio	0,33	0.3
Yield Strength (MPa)	145	240
Tangent Modulus (MPa)	450	1450
Specific Heat (J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> )	896	434



Gambar 3: Korelasi antara tegangan tarik dengan regangan untuk aluminium AA 6061 T4 [16]

Pemodelan material pada *multi-cell hexagonal crash box* sebagai *Bilinear Isotropic Hardening*, dimana sebuah material mengalami deformasi elastis ketika diberikan pembebanan menjadi deformasi plastis, sedangkan untuk *impactor* menggunakan material *structural steel* yang diasumsikan sebagai *Rigid Body*. Pemodelan pembebanan menggunakan metode *frontal crash test*. Pada pemodelan ini, *impactor* dengan kecepatan sebesar 7,67 m/s dengan panjang deformasi 100 mm. Massa *impactor* sebesar 103 kg. Ukuran meshing pada *crash box* diatur 2,0 mm dan untuk komponen *impactor* diatur secara *default* dari *software*.



Gambar 4: Permodelan pembebanan multi-cell hexagonal crash box dengan penambahan lubang

Metode Taguchi digunakan untuk mengoptimalkan kinerja dan menentukan parameter yang terbaik dengan jumlah eksperimen yang dianalisis lebih sedikit daripada desain faktorial. Semakin banyak jumlah level yang diteliti maka hasil eksperimen Taguchi semakin teliti disebabkan jumlah data yang diperoleh banyak [17]. Faktor dan level yang digunakan dalam penelitian ini adalah Posisi peletakan lubang, jarak posisi lubang, tebal *crash box* dan diameter lubang seperti pada Tabel 2.

Tabel 2: Faktor dan Level dari Faktor

		NOTASI	LEVEL		
PARTOR KONTROL	UNIT	NUTASI	1	2	3
Posisi peletakan lubang (P)		А	Dinding Dalam (DD)	Dinding Luar (DL)	Dinding dalam dan dinding luar (DDDL)
Jarak Posisi Lubang (L)	mm	В	37,5	75	112,5
Tebal Crash Box (t)	mm	С	1,2	1,6	2,0
Diameter Lubang (D)	mm	D	6,6	7,6	8,6

Penelitian ini menggunakan karakteristik kualitas kemampuan dalam menyerap energi *impact* pada desain *multi cell hexagonal crash box* adalah *large the better*. Pemilihan *orthogonal array* berdasarkan perhitungan *degree of freedom* (DOF), *orthogonal array* yang dipilih harus lebih tinggi dari perhitungan *degree of freedom*. Dengan demikian, *orthogonal array* yang digunakan yaitu  $L_{27}$  (3<sup>13</sup>) seperti pada Tabel 3.

**Tabel 3:** Orthogonal array L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>) [18]:

FKOD	FAKTOR DAN INTERAKSI									DECDON				
EKSP	Α	В	AB	AB	С	AC	AC	BC	D	Е	BC	Е	Е	RESPON
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	

15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	

# 3. HASIL DAN DISKUSI

# 3.1 Pola Deformasi Multi-Cell Hexagonal Crash Box

Ketika crash box diberikan pembebanan secara axial maka akan terjadinya perubahan bentuk pada *crash box*, perubahan bentuk disebut pola deformasi. Pola deformasi yang terjadi pada *crash box* kemungkinan tiga jenis bentuk pola deformasi, yaitu *concertina mode* (*axisymmetric*), *diamond mode*, dan *mixed mode* (*concertina + diamond mode*). Pola deformasi dianalisis berdasarkan pengamatan secara visual hasil simulasi. Pola deformasi tiap model *multi-cell hexagonal crash box* diambil datanya sampai dengan akhir *displacement* sebesar 100 mm. Perubahan deformasi selama impactor menabrak *multi-cell hexagonal crash box* dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5: Pola deformasi multi-cell hexagonal crash box percobaan 6 akibat beban frontal

Gambar 5 merupakan *multi-cell hexagonal crash box* percobaan 6 dengan peletakan lubang berada di dinding dalam dan jarak lubang 75 mm. Proses deformasi pada model 6 (Gambar 5), awal pembebanan *folding* yang terjadi pada *crash box* di bagian atas, sesuai dengan terjadinya *folding* antara sisi kiri dan sisi kanan yang simetris. Selanjutnya, *multi-cell hexagonal crash box* sampai akhir pembebanan terjadinya *folding* pada dinding dalam bagian bawah *crash box*. *Multi-cell hexagonal crash box* pada model (Gambar 5) pola deformasi yang terjadi adalah *concertina mode*.



Gambar 6: Pola deformasi multi-cell hexagonal crash box percobaan 19 akibat beban frontal.

Deformasi pada *multi-cell hexagonal crash box* percobaan 19 (Gambar 6) dengan peletakan lubang terletak di dinding dalam dan dinding luar dengan jarak lubang 37.5 mm dari arah tumpuan. Proses terjadinya *folding* awal pembebanan terjadi di bagian atas *crash box*, pola deformasi yang terjadi yaitu simetris sisi kiri dan sisi kanan, seiring meningkatnya waktu pembebanan terjadinya *folding* pada daerah lubang yang tidak simetris. Pada saat akhir pembebanan deformasi yang terjadi pada *multi-cell hexagonal crash box*, hasil pengamatan secara visual menunjukkan 2 jenis pola deformasi yang berbeda adalah *concertina mode* dan *diamond mode*, sehingga pola deformasi *multi-cell hexagonal crash box* percobaan 19 yaitu *mixed mode*.

MODEL	AXIAL MODE			MODEL	AXIAL MODE	MODE				
KE-N	CONCERTINA	DIAMOND	MIXED	KE-N	CONCERTINA	DIAMOND	MIXED			
1	-	-	٧	15	V	-	-			
2	-	-	٧	16	-	V	-			
3	V	-	-	17	V	-	-			
4	-	٧	-	18	V	-	-			
5	-	٧	-	19	-	-	٧			
6	-	٧	-	20	-	-	٧			
7	-	٧	-	21	V	-	-			
8	-	-	v	22	-	V	-			
9	V	-	-	23	-	-	v			
10	-	-	V	24	-	-	v			
11	-	-	٧	25	-	٧	-			
12	-	-	٧	26	-	٧	-			
13	-	٧	-	27	-	V	-			
14	V	-	-							

Tabel 4: Data Pola Deformasi multi-cell hexagonal crash box

Multi-cell hexagonal crash box dengan penambahan lubang bertujuan untuk mengurangi first peak load dan beban buckling sehingga crash box mudah terjadi deformasi dan dapat meningkatkan nilai penyerapan energi impact. Penambahan lubang sebagai initial fold menyebabkan momen inersia menurun, sehingga nilai beban kritis menurun. Penambahan lubang merupakan initial fold, sehingga awal terjadinya folding bisa terjadi di daerah lubang tersebut. Crash box dengan penambahan lubang, folding yang terjadi pertama selalu dimulai di lokasi lubang. Oleh karena itu, lubang bertindak sebagai ketidaksempurnaan awal pada crash box [14].



Gambar 7: Proses deformasi *multi-cell hexagonal crash box* dengan jarak lubang x = 37,5 mm

Gambar 7. Merupakan proses *folding* pada *multi-cell hexagonal crash box* dengan jarak posisi lubang x = 37,5 mm. menunjukkan bahwa *multi-cell hexagonal crash box* mengalami *folding* awal pada bagian atas yang berkontak langsung dengan *crash box* pola deformasi yaitu *concertina mode*, sesuai dengan terjadi *folding* yang simetris antara sisi kanan dan sisi kiri. Seiring meningkatnya waktu pembebanan dinding *crash box* yang ditambahkan lubang mulai mengalami deformasi hingga berakhir pembebanan dengan perpindahan 100 mm dengan 2 pola deformasi yaitu pola *concertina* dan pola *diamond*, sehingga pola deformasi adalah *mixed mode*.



Gambar 8: Proses deformasi *multi-cell hexagonal crash box* dengan jarak lubang x = 75 mm

Proses *folding* pada *multi-cell hexagonal crash box* dengan jarak posisi lubang x = 75 mm seperti pada Gambar 8, dimana *folding* awal terbentuk pada bagian atas crash box dengan pola deformasi adalah

*concertina mode. Folding* kedua terjadi di daerah lubang dengan pola deformasi *concertina mode* hingga akhir pembebanan *folding* terus terjadi sehingga mengalami *folding* yang tidak simetris. Dengan demikian pola deformasi yang terjadi adalah *mixed mode*.

*Multi-cell hexagonal crash box* dengan jarak posisi lubang x = 112,5 mm seperti pada Gambar 9, proses terjadi nya *folding* dimulai dari bagian atas dan bagian lubang dengan pola deformasi *diamond mode*. Sesuai dengan *folding* yang terjadi tidak simetris antara sisi kiri dan sisi kanan. Proses *folding* terus terjadi hingga akhir pembebanan dengan pola deformasi adalah *diamond mode*. Selain itu, lipatan juga terjadi pada bagian bawah crash box.



Gambar 9: Proses deformasi multi-cell hexagonal crash box dengan jarak lubang 112,5 mm

Penambahan lubang pada *multi-cell hexagonal crash box* dengan perbedaan diameter lubang akan mempengaruhi nilai momen inersia berkurang. Perbedaan diameter lubang dan jarak posisi lubang dapat menurunkan nilai *first peak load* [15]. Penambahan lubang pada sudut-sudut dinding *crash box* penampang persegi, *First peak load* dapat diturunkan secara signifikan, sementara *crushing force efficiency* (CFE) meningkat tetapi *mean crushing force* sedikit lebih rendah dibandingkan dengan *crash box* penampang persegi tanpa lubang [19]. Pengaruh yang signifikan dari *crush initiator* terhadap penurunan *peak crush load* dan meningkatkan penyerapan energi *impact* [20].

# 3.2 Penyerapan Energi Impact Multi-Cell Hexagonal Crash Box

Awal impactor menumbuk *multi-cell hexagonal crash box* maka akan membentuk *folding* dan gaya yang dibutuhkan sangat besar atau disebut dengan *first peak load*. Penambahan lubang pada dinding *crash box* yang diletakkan dengan arah berlawanan sebagai *initial fold* dapat menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan di sekitar daerah lubang yang tegak lurus dengan arah pembebanan. Dengan adanya konsentrasi tegangan pada *multi-cell hexagonal crash box* dapat menurunkan nilai *first peak load* yang terjadi, maka dapat mengurangi resiko terjadinya beban *buckling*. Oleh karena itu, akan mempermudah terjadinya deformasi dan membentuk *folding*. *Multi-cell hexagonal crash box* yang mudah ter deformasi akan dengan mudah menyerap energi *impact*.



Gambar 10: Hubungan antara gaya reaksi dengan displacement multi-cell hexagonal crash box untuk percobaan - 9

Kemampuan menyerap energi *multi-cell hexagonal crash box* berdasarkan hasil perhitungan luasan dibawah kurva pada grafik hubungan antara gaya reaksi dengan *displacement* percobaan 6 dan percobaan 19. seperti yang terlihat pada Gambar 11.



Gambar 11: Hubungan antara gaya reaksi dengan displacement multi-cell hexagonal crash box untuk percobaan - 6 dan percobaan - 19

Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai penyerapan energi *impact* untuk percobaan 6 dan percobaan 19. Percobaan ke 6 merupakan *multi-cell hexagonal crash box* dengan parameter peletakan lubang terletak pada dinding dalam, jarak lubang yaitu 75 mm, tebal *crash box* yaitu 2 mm dan diameter lubang 6,6 mm. Berdasarkan perhitungan di bawah kurva diperoleh nilai penyerapan energi *impact* sebesar 13,36 kJ. Oleh karena itu, membuat struktur pada *crash box* menjadi lebih kaku, serta membutuhkan energi yang besar untuk terjadi deformasi. Sedangkan Eksperimen ke 19 dengan parameter peletakan lubang terletak pada dinding dalam dan dinding luar, jarak lubang yaitu 37.5 mm, tebal *crash box* yaitu 1.2 mm dan diameter lubang 8,6 mm diperoleh nilai penyerapan energi *impact* sebesar 5,60 kJ.

### 3.3 Analisis Taguchi

Dalam penelitian ini, metode Taguchi digunakan untuk memaksimalkan kemampuan menyerap energi *impact*. Hasil simulasi yang diperoleh berupa nilai penyerapan energi *impact* yang dikonversi ke signal to noise ratio (S/N Ratio). Karakteristik kualitas yang dapat digunakan untuk menghitung S/N ratio yaitu, lebih besar semakin baik, lebih kecil semakin baik dan nominal semakin baik. Respon penyerapan energi *impact* (EA) memiliki karakteristik semakin besar semakin baik. S/N rasio dihitung dengan menggunakan persamaan 1. Contoh perhitungan S/N rasio penyerapan energi *impact* (EA) dengan karakteristik semakin baik pada percobaan pertama sebagai berikut:

$$n = -10 \operatorname{Log}_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2} \right]$$

$$n = -10 \operatorname{Log}_{10} [0,02]$$
(1)

n = 16.04

Perhitungan yang sama dilakukan untuk percobaan ke 2 sampai dengan percobaan ke 27.

Hasil simulasi berupa nilai penyerapan energi *impact* dan S/N ratio dari masing-masing model seperti pada tabel 5. Efek dari masing-masing faktor (P, L, t dan D) pada penyerapan energi *impact* yang ditentukan ditunjukkan pada Gambar 12. Untuk mengevaluasi pengaruh dari masing-masing faktor terhadap penyerapan energi *impact*, S/N ratio untuk setiap model telah dihitung seperti pada Tabel 5. Nilai S/N tertinggi sesuai dengan model yang tepat dan nilai S/N tertinggi terjadi pada percobaan ke 9.

FKOD	FA	KTOF	R DAN I	NTERA	KSI									EA	S/N RATIO
EKSP	Α	в	AB	AB	С	AC	AC	BC	D	Е	BC	Е	Е	(KJ)	EA
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6.34	16.04
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	9.64	19.68
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	12.55	21.97
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	6.05	15.63
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	8.73	18.82
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	13.36	22.51
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	6.07	15.66
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	9.37	19.43
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	13.27	22.46
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	6.08	15.68
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	9.30	19.37
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	12.69	22.07
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	6.12	15.73
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	9.71	19.75
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	12.36	21.84
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	6.22	15.87
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	9.16	19.23
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	12.42	21.89
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	5.60	14.96
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	8.90	18.99
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	11.85	21.48
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	5.90	15.42
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	8.82	18.91
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	11.24	21.02
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	6.25	15.91
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	8.94	19.03
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	12.83	22.17

Tabel 5: Hasil simulasi penyerapan energi dan S/N ratio



Gambar 12: Level optimal untuk setiap faktor

Analisis dengan metode Taguchi dari respon yang diukur menunjukkan pentingnya parameter proses. Signifikansi dari setiap faktor diukur berdasarkan kemiringan plot efek. Sudut kemiringan tinggi menunjukkan bahwa faktor tersebut lebih signifikan, sehingga dari Gambar 12 diperoleh bahwa tebal *crash box* lebih signifikan dari faktor lainnya. Gambar 12 menunjukkan efek dari masing-masing faktor terhadap penyerapan energi *impact*. Kondisi optimal penyerapan energi *impact* diperoleh berdasarkan eksperimen yang memiliki nilai S/N ratio tertinggi. Dengan demikian, nilai optimal faktor desain untuk nilai penyerapan energi *impact* tertinggi yaitu faktor A dengan nilai sebesar 19,13 (A1), faktor B level 3 dengan nilai sebesar 19.07 (B3), faktor C dengan nilai sebesar 21,93 (C3) dan faktor D dengan nilai sebesar 19,14 (D1).

Desain optimal simulasi *multi-cell hexagonal crash box* dalam menyerap energi *impact* berdasarkan hasil kondisi Level optimal untuk setiap faktor (Gambar 12) seperti pada Tabel 6.

DESAIN OPTIMASI								
PARAMETER	SETTING LEVEL	NILAI						
А	1	DD						
В	3	112,5						
С	3	2,0						
D	1	6,6						

Tabel 6: Desain Optimal dari level faktor

Pengujian konfirmasi merupakan langkah terakhir dalam memverifikasi hasil perhitungan yang diperoleh berdasarkan desain eksperimen Taguchi. Eksperimen konfirmasi merupakan hal yang disarankan dalam desain eksperimen metode Taguchi dengan tujuan untuk verifikasi hasil eksperimen yang diperoleh.

SETTING LEVEL OPTIMAL	NILAI	NILAI PENYERAPAN ENERGI <i>IMPACT</i> (kJ)
A1	DD	
B3	112,5 mm	12.56
C3	2,0 mm	15,50
D1	6,6 mm	

Berdasarkan analisis pola deformasi eksperimen konfirmasi dilakukan secara visual hasil simulasi. Dengan demikian pola deformasi pada eksperimen konfirmasi yaitu *concertina mode*. Seperti yang terlihat pada Gambar 13.



Gambar 13: Pola deformasi multi-cell hexagonal crash box eksperimen konfirmasi akibat beban frontal.

Ketika Pembebanan diberikan pada *multi-cell hexagonal crash box* dengan peletakan lubang pada dinding dalam dan jarak lubang yaitu 112,5 mm, mengakibatkan terjadinya *folding* ke arah luar dan bagian dalam pada bagian atas *crash box* dan bagian lubang yang berkontak langsung dengan *impactor*. Setelah itu, *folding* terbentuk dengan simetris antara sisi kiri dan sisi kanan atau biasa disebut dengan pola *concertina mode*. Selanjutnya proses *folding* terus terjadi pada bagian atas dinding bagian luar mulai terbentuk lipatan keluar. Ketika pembebanan terus dilakukan, mengakibatkan tegangan pada *multi-cell hexagonal crash box* sehingga lipatan pertama terjadi pada bagian bawah dinding dalam dan dinding luar. Pada saat akhir pembebanan, pola deformasi yang terjadi pada *multi-cell hexagonal crash box* adalah *concertina mode*. Kemampuan menyerap energi *impact multi-cell hexagonal crash box* berdasarkan hasil perhitungan luasan dibawah kurva pada grafik hubungan antara gaya reaksi dengan *displacement* eksperimen konfirmasi. seperti yang terlihat pada Gambar 14.



Gambar 14: Hubungan antara gaya reaksi dengan displacement multi-cell hexagonal crash box percobaan konfirmasi

Berdasarkan Gambar 14 hasil perhitungan luasan dibawah kurva didapatkan nilai penyerapan energi *impact* sebesar 13,56 kJ. Seiring meningkatnya nilai *displacement*, nilai *force reaction* semakin meningkat hingga sekitar 70 mm dan *force reaction* menurun hingga akhir *displacement*. Kenaikan *force reaction* diawal pembebanan merupakan awal terbentuknya *folding*, dengan demikian, dibutuhkan gaya yang besar untuk deformasi pada *multi-cell hexagonal crash box*. Setelah itu, grafik yang cenderung meningkat terjadi akibat karakteristik dinding *multi-cell crash box* yang saling bersentuhan antara dinding satu dengan dinding yang lain nya sehingga *force reaction* semakin besar.

# 3.4 Analysis of Variance (ANOVA)

Hasil perhitungan *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk S/N Ratio penyerapan energi *impact multi-cell hexagonal crash box* seperti yang terlihat pada Tabel 8.

SOURCE	DF	SEQ SS	CONTRIBUTION	ADJ SS	ADJ MS	F-VALUE	P-VALUE
А	2	1,18	0,65%	1,18	0,59	16,60	0,0036
В	2	0,24	0,13%	0,24	0,12	3,37	0,1044
С	2	178,49	98,10%	178,49	89,25	2510,40	0,0000
D	2	0,82	0,45%	0,82	0,41	11,50	0,0089
A*B	4	0,54	0,30%	0,54	0,14	3,81	0,0709
A*C	4	0,27	0,15%	0,27	0,07	1,93	0,2255
B*C	4	0,18	0,10%	0,18	0,05	1,29	0,3702
Error	6	0,21	0,12%	0,21	0,04		
Total	26	181,94	100,00%				

Tabel 8: ANOVA S/N ratio penyerapan energi

Analisis Taguchi memberikan informasi tentang efektivitas parameter kontrol tetapi tidak memberikan informasi tentang tingkat kontribusi pada karakteristik kualitas dari parameter tersebut. Informasi yang tidak dapat diperoleh dengan analisis Taguchi diperoleh melalui ANOVA. *Analisis of varians* dilakukan menganalisis faktor secara statistik signifikan dan sangat mempengaruhi kualitas. Penelitian ini menggunakan uji signifikansi parameter kontrol sesuai dengan tingkat kepercayaan 95% dan p-value -0,05. Nilai F yang dihitung (Uji-F) merupakan rasio *mean kuadrat eror* terhadap residual dan digunakan untuk menentukan signifikansi faktor kontrol.

Hasil hitung ANOVA berdasarkan data S/N ratio diperoleh nilai F hitung masing-masing faktor yaitu posisi peletakan lubang (P) sebesar 16,60, jarak posisi lubang (L) sebesar 3,37, tebal *crash box* (t) sebesar 2510,40 dan diameter lubang (D) sebesar 11,50. Hasil F tabel diperoleh dari  $F_{0,05,2,6} = 5,14$ . Oleh karena itu, Faktor yang memiliki nilai F Hitung  $\geq$  F Tabel maka faktor tersebut signifikan atau berpengaruh terhadap respon. Faktor yang signifikan atau berpengaruh *multi-cell hexagonal crash box* dalam menyerap energi *impact* yaitu faktor C (tebal crash box), faktor A (posisi peletakan lubang) dan Faktor D (diameter lubang). Kontribusi masing-masing faktor yaitu posisi peletakan lubang (P) sebesar 0,65 %, jarak posisi lubang (L) sebesar 0,13 %, tebal *crash box* (t) sebesar 98,10 % dan diameter lubang (D) sebesar 0,45 %.

# 4 KESIMPULAN

Penambahan lubang dengan variasi letak posisi lubang, jarak posisi lubang dan diameter lubang dapat menurunkan *first peak load* dan resiko terjadinya beban *buckling* dapat dikurangi. Dengan demikian, penambahan lubang pada *multi-cell hexagonal crash box* dengan mudah terjadi deformasi dan membentuk *folding*. Semakin tebal *multi-cell hexagonal crash box* maka kemampuan dalam menyerap energi *impact* semakin besar. Selain itu, Kondisi optimal *multi-cell hexagonal crash box* menggunakan metode Taguchi dengan karakteristik kualitas kemampuan menyerap energi *impact large the better* yaitu posisi peletakan lubang (P) = dinding dalam, jarak posisi lubang (L) = 112,5 mm, tebal crash box (t) = 2 mm, dan diameter lubang (D) = 6,6 mm. Penyerapan energi *impact* tertinggi *multi-cell hexagonal crash box* terjadi pada eksperimen konfirmasi dibawah kondisi optimal (A1, B3, C3 dan D1) dengan nilai sebesar 13,56 kJ/kg dan pola deformasi yang terjadi adalah concertina mode. Berdasarkan nilai F Hitung  $\geq$  F Tabel maka faktor P, t dan D berpengaruh terhadap kemampuan dalam menyerap energi *impact*. Tebal crash box (t) memiliki kontribusi paling tinggi sebesar 98,10% dalam meningkatkan nilai penyerapan energi *impact*.

### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] BADAN PUSAT STATISTIK, "Polantas Dalam Angka." 2018.
- [2] Z. AHMAD, D. P. THAMBIRATNAM, AND A. C. C. TAN, "International Journal of Impact Engineering Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading," Int. J. Impact Eng., vol. 37, no. 5, pp. 475–488, 2010.
- [3] D. B. HALMAN, MOCH. AGUS CHOIRON, DARMADI, J. Teknik, M. Universitas, and B. Malang, "423pengaruh variasi sambungan pada crash box multi segmen terhadap kemampuan penyerapan

energi dengan uji quasi static," vol. 9, no. 1, pp. 43-49, 2018.

- [4] S. KOKKULA, "Bumper beam longitudinal system subjected to off set impact loading," Thesis. Nor. Univ. Sci. Technol. Norw. Trondheim, no. August, 2005.
- [5] R. M. R. VELMURUGAN, "Energy absorption characteristics of annealed steel tubes of various cross sections in static and dynamic loading," Solids Struct., vol. 6, pp. 385–412, 2009.
- [6] F. TARLOCHAN, F. SAMER, A. M. S. HAMOUDA, S. RAMESH, AND K. KHALID, "Thin-Walled Structures Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces," Thin Walled Struct., vol. 71, pp. 7–17, 2013.
- [7] S. SANTOSA AND T. WIERZBICKI, "Crash behavior of box columns ® lled with aluminum honeycomb or foam," vol. 68, 1998.
- [8] D. D. DESAI, "analysis and development of energy absorbing crash box," no. 3, pp. 3776–3782, 2016.
- [9] N. A. CHOIRON, MOCH, AGUS., PURNOWIDODO, ANINDITO. SISWANTO, EKO,. HIDAYATI, "Crash Energy Absorption Of Multi-Segments Crash Box Under Frontal Load," J. Teknol., vol. 5, pp. 347–350, 2016.
- [10] A. JUSUF, T. DIRGANTARA, L. GUNAWAN, AND I. S. PUTRA, "International Journal of Impact Engineering Crashworthiness analysis of multi-cell prismatic structures," Int. J. Impact Eng., vol. 78, pp. 34–50, 2015.
- [11] N. QIU, Y. GAO, J. FANG, Z. FENG, G. SUN, AND Q. LI, "Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases," Finite Elem. Anal. Des., vol. 104, pp. 89– 101, 2015.
- [12] S. S. SHINDE, "Structural Optimization Of Thin Walled Tubular Structure For Crashworthiness," Thesis. Purdue Univ. Indianapolis, Indiana, 2014.
- [13] Q. ESTRADA ET AL., "Thin-Walled Structures Effect of radial clearance and holes as crush initiators on the crashworthiness performance of bi-tubular profiles," Thin Walled Struct., vol. 140, no. March, pp. 43–59, 2019.
- [14] T. DIRGANTARA, L. GUNAWAN, I. S. PUTRA, S. A. SITOMPUL, AND A. JUSUF, "Numerical and Experimental Impact Analysis of Square Crash Box Structure With Holes," vol. 393, pp. 447–452, 2013.
- [15] S. CHAHARDOLI, H. HADIAN, AND R. VAHEDI, "Thin-Walled Structures Optimization of hole height and wall thickness in perforated capped-end conical absorbers under axial quasi-static loading ( using NSGA-III and MOEA / D algorithms)," Thin Walled Struct., vol. 127, no. November 2017, pp. 540–555, 2018.
- [16] J. BI, H. FANG, Q. WANG, AND X. REN, "Modeling and optimization of foam-filled thin-walled columns for crashworthiness designs," Finite Elem. Anal. Des., vol. 46, no. 9, pp. 698–709, 2010.
- [17] I. SOEJANTO, "*Rekayasa Kualitas : Eksperimen dengan Teknik Taguchi*," Surabaya Yayasan Hum., 2009.
- [18] K. KRISHNAIAH AND P. SHAHABUDEEN, Applied Design of Experiments and Taguchi Methods. 2012.
- [19] N. C. NGHIA, T. DIRGANTARA, AND S. P. SANTOSA, "Impact Behavior of Square Crash Box Structures," vol. 660, pp. 613–617, 2014.
- [20] S. S. J. ISTIYANTO, S. HAKIMAN, D.A. SUMARSONO, G. KISWANTO, A.S. BASKORO, "experiment and numerical study – effects of crush initiators under quasi-static axial load of thin wall square tube," vol. 660, pp. 628–632, 2014.