

## Optimasi Desain *Crashworthiness* pada Tabung Persegi Berdinding Tipis Dengan Variasi *Crush Initiator* : *Stripe-Parallelogram-Trigon*

Felix Dionisius<sup>1</sup>, Jos Istiyanto<sup>2</sup>, Tito Endramawan<sup>3</sup>, Andri<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup>Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Indramayu, <sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia  
<sup>1,3,4</sup>Jl. Raya Lohbener Lama No. 08 Indramayu 45252 Fax / Tlp. (0234) 5746464, <sup>2</sup>Kampus Baru UI Depok Jawa Barat – 16424 Indonesia Phone: +62 21 7270032 Fax +62 21 7270033  
E-mail : felix.dionisius@polindra.ac.id<sup>1</sup>, josist@eng.ui.ac.id<sup>2</sup>, titoendramawan@gmail.com<sup>3</sup>, andrihardianah14@gmail.com<sup>4</sup>

### Abstrak

*Crashworthiness* merupakan kemampuan struktur pada kendaraan yang digunakan untuk mengurangi cedera pada penumpang saat terjadi kecelakaan. *Crashworthiness* mempunyai kriteria antara lain gaya tumbukan puncak ( $F_{max}$ ), penyerapan energi spesifik (SEA), dan efisiensi gaya tumbukan (CFE). Bagian struktur kendaraan yang terkait *crashworthiness* adalah front rail yang pada umumnya terbuat dari tabung berdinding tipis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui desain terbaik dari spesimen tabung persegi berdinding tipis dengan variasi *crush initiator* dimana lubang berdiameter 3 mm, yang pada awalnya disusun berbentuk stripe dengan 4 lubang, lalu dilakukan penambahan lubang secara bertingkat membentuk parallelogram hingga trigon. Pengujian ini menggunakan metode eksperimental uji tekan dengan pembebanan kuasi statik dimana kecepatan aktuator sebesar 0,5 mm/s. Optimasi desain dilakukan dengan menggunakan Multi Criteria Decision Making (MCDM) dengan permodelan Simple Additive Weighting (SAW). Hasilnya menunjukkan bahwa spesimen dengan *crush initiator* berbentuk trigon merupakan desain terbaik dengan nilai keputusan sebesar 0,98 dimana kriteria *crashworthiness* untuk gaya tumbukan maksimum, penyerapan energi spesifik dan efisiensi gaya tumbukan sebesar 19193,81 N; 5100,93 J/kg; dan 46,44%.

**Kata Kunci:** *crashworthiness*, *crush initiators*, simple additive weighting, optimasi desain, *stripe-parallelogram-trigon*

### Abstract

*Crashworthiness* is an ability of a vehicle structure in order to reduce injury when occurred in collision. *Crashworthiness* criteria are peak force ( $F_{max}$ ), specific energy absorption (SEA), and crush force efficiency (CFE). The part of structure of vehicle in *crashworthiness* is front rail which is generally tube as thin walled structure. The aim was to know the best design in thin walled square tube as specimen by variance of *crush initiator* which arranged holes 3 mm of diameter in shaping stripe with 4 holes, then added graded holes in parallelogram to trigon. This research used compression experiment method under quasi static loading with 30 mm/minute of actuator velocity. Optimum design was done by using Multi Criteria Decision Making (MCDM) with Simple Additive Weighting (SAW) modelling. This research presents that specimen with trigon of *crush initiator* is the best design with 0.98 of decision score in which *crashworthiness* criteria for peak force, specific energy absorption and crush force efficiency are 19193.81 N; 5100.93 J/kg; and 46.44%.

**Keywords:** *crashworthiness*, *crush initiators*, simple additive weighting, optimum design, *stripe-parallelogram-trigon*

## I. PENDAHULUAN

Jumlah kendaraan khususnya mobil penumpang selalu meningkat dari tahun ke tahun. Ini dapat dibuktikan dari data yang dikeluarkan oleh Badan Pusat Statistik dimana pada tahun 2016 mencapai sekitar 14,5 juta yang pada sebelumnya di tahun 2015 sebesar 13,4 juta (Badan Pusat Statistik, 2018). Produksi kendaraan tersebut harus memenuhi standar keselamatan penumpang jika terjadi kecelakaan yang dikenal dengan *crashworthiness*. Struktur berdinding tipis digunakan sebagai komponen

dalam *crashworthiness* dimana terletak pada daerah *crumple zone* yang dikenal dengan *front rail*. Struktur *front rail* tidak diperbolehkan mempunyai kekakuan yang terlalu lemah dikarenakan dapat mengenai penumpang dan jika terlalu kuat dapat membawa penumpang terlempar (Dionisius, et al., 2017). Selain dari pada itu, *front rail* yang pada umumnya berbentuk tabung juga dapat menyerap energi kinetik sebesar 40% saat terjadi tabrakan dari depan yang (frontal) (Istiyanto, et al., 2014; Sun, et al., 2017). Istiyanto melakukan investigasi mengenai pengaruh variasi diameter (Istiyanto, et al.,

2016) dan sudut (Istiyanto & Dionisius, 2016) *crush initiator*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan *crush initiator* dapat mempengaruhi kriteria *crashworthiness* antara lain gaya tumbukan maksimum, penyerapan energi spesifik dan efisiensi gaya tumbukan.

Oleh karena itu, paper ini membahas pengaruh *crush initiator* berbentuk lubang lingkaran berdiameter 3 mm yang pada awalnya 4 lubang disusun *stripe* (segaris), selanjutnya dilakukan penambahan lubang yang berbentuk *parallelogram* hingga *trigon*. *Crush initiator* ini diletakkan pada tabung persegi ber dinding tipis dan diberikan pembebanan kuasi statik. Selain dari itu, optimasi desain akan menggunakan *Multi Criteria Decision Making* (MCDM) dan *Simple Additive Weighting* (SAW) untuk mendapatkan desain terbaik sebagai gambaran awal untuk peneliti dalam bidang kendaraan khususnya *crashworthiness*.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Johnson et al (Johnson, et al., 1977) dan Wierzbicki serta Abramowicz (Wierzbicki & Abramowicz, 1983) sudah melakukan penelitian mengenai tabung ber dinding tipis yang dapat mengalami *progressive folding/buckling* yang merupakan lipatan secara berkelanjutan saat dikenai tumbukan. Abramowicz (Abramowicz & Jones, 1984) juga sudah melakukan penelitian dengan melakukan variasi panjang kolom berbentuk persegi yang diberikan beban aksial dinamik serta melakukan analisa teoritik antara kuasi static dan dinamik. Selanjutnya Abramowicz (Abramowicz & Jones, 1997) melakukan eksperimen pada tube silinder dan persegi yang bertujuan untuk mengetahui sifat lokal hingga *progressive buckling* dengan pembebanan kuasi statik dan dinamik. Setelah itu Abramowicz juga melakukan eksperimen pada tabung ber dinding tipis sebagai komponen struktur yang dapat menyerap energi dengan melakukan analisa pada *superfolding element* (SE) (Abramowicz, 2003).

Pengaruh *crush initiator* juga sudah diteliti oleh Cho et al (Cho, et al., 2006) dengan mengetahui optimasi desain pada variasi ukuran *hole-type* dan *dent-type* sebagai *crush initiator* dimana diletakkan pada sudut tabung saat diberikan beban aksial. Eren et al (Eren, et al., 2009) juga sudah melakukan penelitian mengenai *crush initiator* tipe *rib* pada *front side rail* dengan menggunakan metode elemen hingga eksplisit dengan ANSYS/LS-DYNA. Tabung persegi aluminium AA6061-T6 dengan *through hole-discontinuitas* juga diinvestigasi oleh Cheng et al (Cheng, et al., 2006) dengan mendapatkan kapasitas penyerapan energi saat tabung tersebut diberikan beban aksial secara kuasi statik. Zhang et al (Zhang, et al., 2009) melakukan eksperimen terhadap tabung persegi aluminium yang diberikan *buckling initiator* dengan menerapkan *pulling strip* dengan tujuan mendapatkan penyerapan energi. Analisa teoritik dikaji oleh Nghia et al (Nghia, et al., 2013; Nghia, et al., 2014) dengan memprediksi kriteria *crashworthiness* pada tabung persegi dan mempunyai 1 lubang *crush initiator* untuk setiap sisi spesimen yang terletak di tengah dari kedua ujung spesimen. Selain dari itu Rezvani et al (Rezvani & Jahan, 2015) juga melakukan optimasi desain dari multi-kriteria *crashworthiness* mengenai pengaruh *initiator*

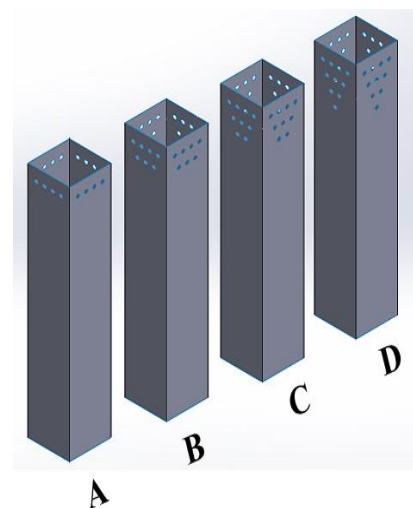
dengan menggunakan variabel jumlah annular rings terhadap spesimen silinder yang diisi oleh polyurethane foam. Optimasi dilakukan dengan menggunakan metode Vikor. Karakteristik kerusakan pada profil aluminium dengan lubang sebagai *crush initiator* juga dikaji oleh Estrada et al (Estrada, et al., 2017) dimana menggunakan variabel jarak initiator diletakkan dari ujung spesimen. Penambahan *crush initiator* berbentuk lubang dengan menjaga pola *rectangle* pada spesimen tabung persegi juga diteliti oleh Dionisius et al (Dionisius, et al., 2017) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh kriteria *crashworthiness*. Berbagai penelitian di atas menunjukkan modifikasi *crush initiator* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh kriteria *crashworthiness*. Oleh sebab itu, penelitian ini menggunakan variabel *crush initiator* yang berbeda dengan melakukan penyusunan 4 lubang (*initiator*) berbentuk *stripe* dilanjutkan penambahan lubang yang berbentuk *parallelogram* hingga *trigon*.

## III. METODE

Sebuah tabung persegi ber dinding tipis sebagai spesimen dengan dimensi 35 x 35 x 200 (mm) akan digunakan pada penelitian ini. Desain eksperimen akan digunakan dengan melakukan variasi *crush initiator* berdiameter 3 mm dengan menyusun lubang berbentuk *stripe* dilanjutkan penambahan *crush initiator* yang berbentuk *parallelogram* hingga *trigon* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Table 1. Desain Eksperimen

Desain	Banyak Lubang	Bentuk	Diameter Lubang (mm)
A	4	<i>Stripe</i>	3
B	7	<i>Parallelogram</i>	3
C	9	<i>Parallelogram</i>	3
D	10	<i>Trigon</i>	3



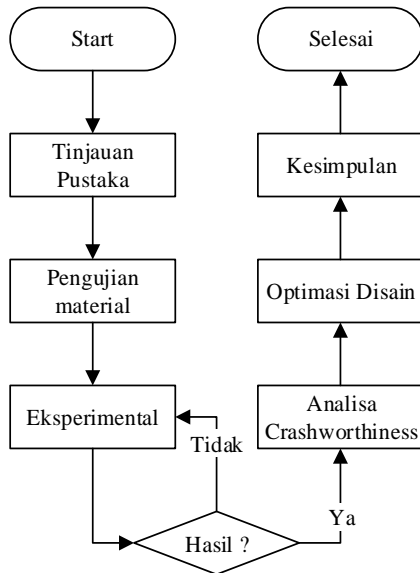
Gambar 1. Spesimen dengan *crush initiator*

## Uji Tarik

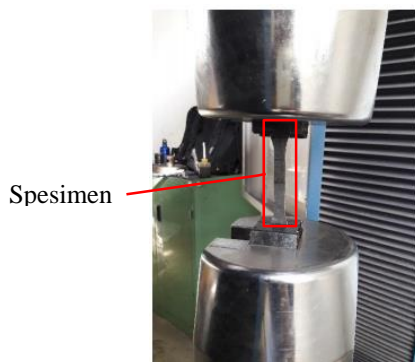
Uji Tarik dilakukan dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 200 kN

yang ada di Politeknik Negeri Indramayu. Plat akan diambil dari spesimen menggunakan mesin CNC *milling* dengan standard dimensi yang ada di ASTM E8/E8M (ASTM, 2010) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pengujian material dalam bentuk plat tersebut menghasilkan *properties material* yang dapat dilihat pada Gambar 4.

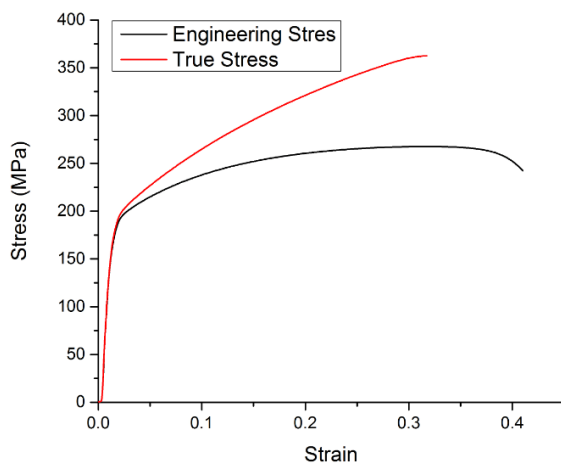
Metode dalam penelitian ini mengikuti diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian



Gambar 3. Uji tarik spesimen



Gambar 4. *Properties material* spesimen

### Pengujian *Crashworthiness*

*Crashworthiness* merupakan kemampuan struktur dalam menyerap energi saat terjadi tabrakan dimana pada akhirnya energi yang diterima oleh penumpang dalam jumlah yang sedikit (Rezvani & Jahan, 2015). *Crashworthiness* terdiri dari beberapa kriteria antara lain gaya tumbukan maksimum ( $F_{max}$ ), penyerapan energi spesifik (SEA), dan efisiensi gaya tumbukan (CFE). Uji tekan dilakukan secara kuasi statik pada spesimen dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 200 kN dan kecepatan aktuator 0,5 mm/s (Istiyanto, et al., 2014; Dionisius, et al., 2017; Davis, 2004) hingga mengalami deformasi 100 mm dengan konsep seperti pada Gambar 5 dengan menghasilkan gaya tumbukan serta displacement. Kemudian dilakukan pengolahan data untuk mendapatkan kriteria *crashworthiness* dengan menggunakan persamaan 1 sampai 4 (Istiyanto, et al., 2014; Dionisius, et al., 2017; Estrada, et al., 2017)

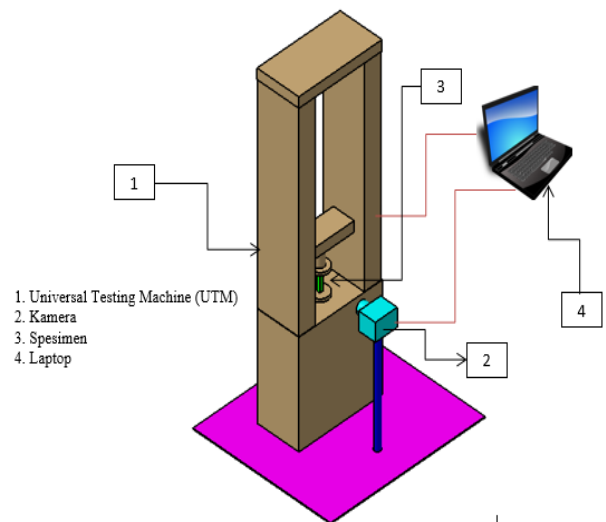
$$EA = \sum_{m=2}^{n-1} F_m \left( \frac{\delta_{m+1} - \delta_{m-1}}{2} \right) \quad (1)$$

$$SEA = \frac{EA}{mass} \quad (2)$$

$$F_{mean} = \frac{1}{\delta_t} \sum_{m=2}^{n-1} F_m \left( \frac{\delta_{m+1} - \delta_{m-1}}{2} \right) \quad (3)$$

$$CFE = \frac{F_{mean}}{F_{max}} \quad (4)$$

dimana EA = penyerapan energi,  $m, n = \{1, 2, 3, \dots, x\}$ ,  $F_{mean}$  = gaya tumbukan rata-rata.



Gambar 5. Konsep Pengujian *Crashworthiness* kuasi statik

### Optimasi Desain

Dengan metode MCDM, optimasi desain dapat dilakukan dengan proses *screening*, prioritas, ranking serta seleksi dari beberapa desain dimana mempunyai kriteria yang saling berkaitan (Anupama, et al., 2015). MCDM dapat diformulasikan dengan matriks di bawah ini.

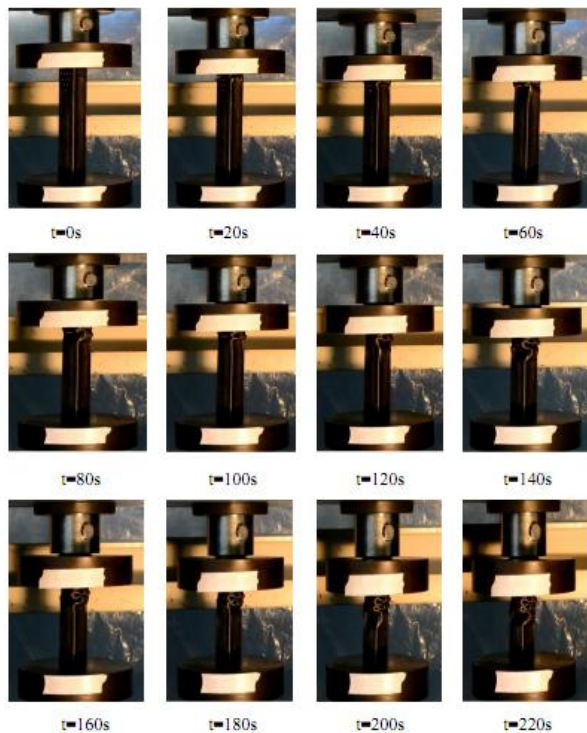
$$A = \{a_i | i = 1,2,3, \dots, p\} \quad (5)$$

$$C = \{a_j | j = 1,2,3, \dots, q\} \quad (6)$$

$$W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_p\} \quad (7)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \dots & x_{qp} \end{bmatrix} \quad (8)$$

dimana A merupakan kondisi desain, C = kriteria sedangkan  $x_{ij}$  = nilai dari desain p dengan kriteria *crashworthiness* q yang terdapat pada matriks X,  $w_p$  = bobot setiap kriteria *crashworthiness* q.



Gambar 6. Proses progressive buckling

Setiap kriteria *crashworthiness* menjadi pertimbangan dalam pemilihan desain terbaik dimana terdapat 3 kriteria antara lain gaya tumbukan maksimum ( $F_{max}$ ) yang paling kecil, penyerapan energi spesifik (SEA) dan efisiensi gaya tumbukan (CFE) maksimum dalam setiap kondisi desain spesimen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Nilai tertinggi dari CFE diharapkan sebesar 100% (Tang, et al., 2013) Oleh karena itu, metode *Simple Additive Weighting* (SAW) diperlukan dalam penentuan kriteria yang berbanding terbalik seperti gaya tumbukan maksimum paling kecil dan penyerapan energi spesifik terbesar. Ada beberapa tahapan (Adriyendi, 2015) seperti:

1. Penentuan tipe terbaik,

Untuk nilai paling besar sebagai Desain terbaik

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{max}} \quad (9)$$

Untuk nilai paling kecil sebagai Desain terbaik

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}^{min}}{x_{ij}} \quad (10)$$

2. Tentukan matriks keputusan berdasarkan bobot

$$v_{ij} = w_p \times r_{ij} \quad (11)$$

dimana  $\sum_{i=1}^p w_p = 1$

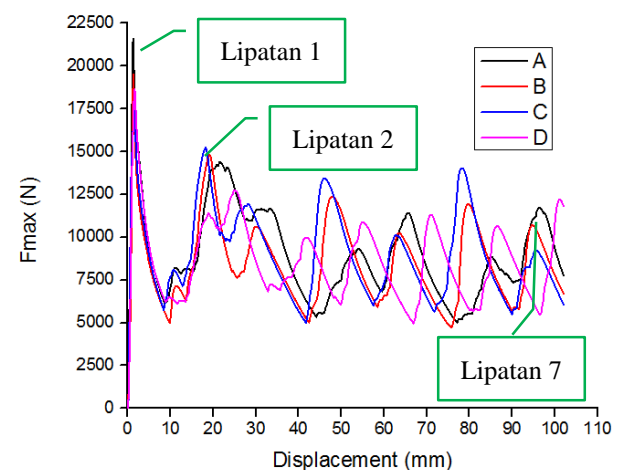
3. Jumlahkan nilai keputusan setiap Desain

$$S_i = \sum_{j=1}^q v_{ij} \quad (12)$$

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian *crashworthiness* dilakukan dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dengan metode pembebanan kuasi statik 0,5 mm/s secara eksperimental. Spesimen tabung berdinding tipis dengan variasi *crush initiator* dengan penyusunan *stripe* hingga *trigon* akan mengalami proses *progressive buckling* dari awal sebelum terjadi pembebanan hingga 220 sekond seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Seiring proses ini terjadi, akan dihasilkan kurva gaya tumbukan dan *displacement* yang dihasilkan oleh mesin UTM seperti pada Gambar 7. Hal ini sesuai dengan yang dilakukan oleh Wierzbicki (Wierzbicki & Abramowicz, 1983) dan Abramowicz (Abramowicz & Jones, 1997) yang menggunakan tabung berdinding tipis dimana menggunakan *crush initiator*. Setiap kurva pada desain tertentu yang mengalami fluktuatif menunjukkan lipatan secara berkelanjutan hingga 7 lipatan dimana lipatan pertama mengalami gaya tumbukan maksimum ( $F_{max}$ ) sebagai salah satu kriteria *crashworthiness*. Hasil kurva tersebut juga diolah dengan persamaan 1 hingga 4 untuk mendapatkan kriteria *crashworthiness* yang lain seperti penyerapan energi spesifik (SEA) dan efisiensi gaya tumbukan (CFE) seperti terlihat pada Gambar 8.  $F_{max}$  dan CFE dari kondisi desain “A” ke “D” terlihat fluktuatif sedangkan SEA mengalami peningkatan dari desain “A” hingga “D”.

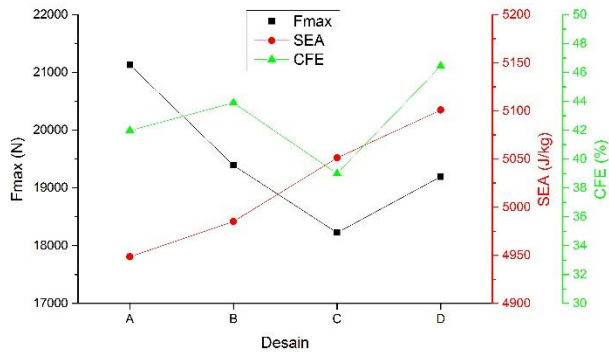


Gambar 7. Kurva gaya tumbukan vs displacement

Jika dilihat dari kriteria gaya tumbukan maksimum  $F_{max}$ , desain terbaik ada pada desain “C” sebesar 18.225,14 N dimana merupakan nilai gaya maksimum yang terendah dari semua desain sehingga peluang penumpang



terlempar dari kendaraan juga semakin kecil (Dionisius, et al., 2017). Pada Gambar 9, kondisi C terlihat mengalami *initial buckling* pada setiap tingkat *crush initiator* khususnya tingkat 1 dan 2 secara serentak sehingga luas penampang pada daerah luasan yang terkena *buckling* akan mengalami penurunan yang berpengaruh pada penurunan gaya tumbukan maksimum seperti yang diteliti Cho et al (Cho, et al., 2006) dan Istiyanto et al (Istiyanto, et al., 2016).



Gambar 8. Kriteria *crashworthiness*

Desain optimum dilakukan untuk mengetahui desain terbaik dengan pertimbangan ketiga kriteria *crashworthiness* yang saling berkaitan. Dengan menerapkan *Multi Criteria Decision Making* (MCDM) dapat mempermudah mengambil keputusan yang terbaik berdasarkan ketiga kriteria tersebut yang diinginkan dimana F<sub>max</sub> yang paling kecil dan SEA serta CFE yang paling besar. Dengan menggunakan persamaan 8, matriks dapat dibuat sebagai berikut :

Desain	Kriteria		
	F <sub>max</sub>	SEA	CFE
A	21.129,94	4.948,46	41,97
B	19.390,85	4.985,16	43,89
C	18.225,14	5.051,16	38,99
D	19.193,81	5.100,93	46,44

Setelah itu melakukan penentuan tipe terbaik dimana F<sub>max</sub> minimum dari beberapa desain merupakan tipe terbaik sedangkan SEA dan CFE maksimum dari beberapa Desain merupakan tipe terbaik, sehingga dengan menggunakan persamaan 9 dan 10, matriks akan terbentuk menjadi :

Desain	Kriteria		
	F <sub>max</sub>	SEA	CFE
A	0.86	0.97	0.90
B	0.94	0.98	0.95
C	1.00	0.99	0.84
D	0.95	1.00	1.00

Ketiga kriteria *crashworthiness* mempunyai peran yang sama dimana ketiga kriteria tersebut dapat mempengaruhi kekuatan struktur dalam keselamatan penumpang saat berkendara (Istiyanto, et al., 2014) sehingga bobot yang diberikan untuk setiap kriteria sebesar 0,33 yang jumlah dari ketiga bobot tersebut sebesar 1. Dengan membuat

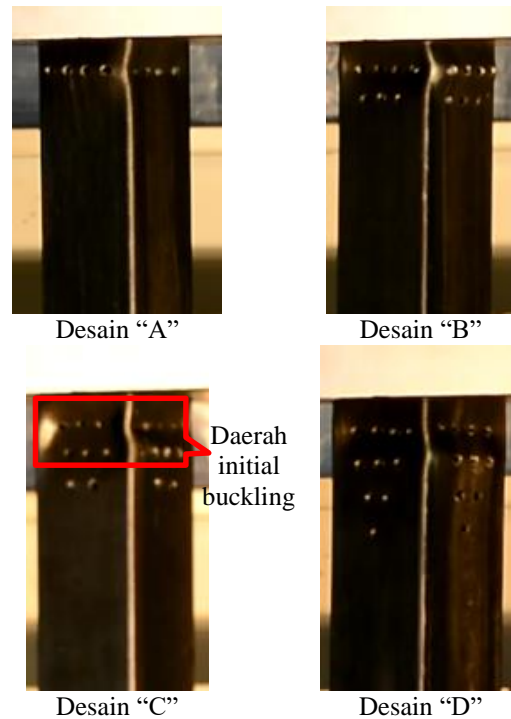
matriks keputusan yang dipengaruhi bobot dapat menggunakan persamaan 11 sebagai berikut :

Desain	Kriteria		
	F <sub>max</sub>	SEA	CFE
A	0.29	0.32	0.30
B	0.31	0.33	0.32
C	0.33	0.33	0.28
D	0.32	0.33	0.33

Setelah pembobotan, setiap kriteria untuk setiap desain akan dijumlahkan dengan menggunakan persamaan 12 dengan hasil yang dapat dilihat pada Tabel 2. Dengan melakukan screening berdasarkan urutan dimana nilai keputusan yang paling besar merupakan Desain terbaik adalah desain "D" dengan *crush initiator* berbentuk *inverted trigon* diikuti "B", "C", dan "A" dengan nilai keputusan sebesar 0,98 ; 0,95 ; 0,94 ; dan 0,91. Sedangkan untuk nilai kriteria *crashworthiness* untuk desain D sebesar 19.193,81 N untuk F<sub>max</sub>, 5.100,93 J/kg untuk SEA, dan 46,44% untuk CFE.

Tabel 2. Nilai keputusan dan ranking setiap desain

Desain	Nilai keputusan	Ranking
A	0.91	4
B	0.95	2
C	0.94	3
D	0.98	1



Gambar 9. *Initial buckling* setiap desain

## V. PENUTUP

### Kesimpulan

Spesimen tabung persegi ber dinding tipis dengan variasi lubang sebagai *crush initiator* yang disusun dari bentuk *stripe* hingga *trigon* telah dilakukan pembeban secara kuasi statik. Variasi tersebut mempunyai pengaruh dalam

menentukan nilai kriteria *crashworthiness* antara lain gaya tumbukan maksimum ( $F_{max}$ ), penyerapan energi spesifik (SEA) dan efisiensi gaya tumbukan (CFE). Dengan mempertimbangkan setiap kriteria *crashworthiness* pada variasi *crush initiator*, desain terbaik dapat dihasilkan dengan metode *Multi Criteria Decision Making* (MCDM) dan *Simple Additive Weighting* (SAW). Metode tersebut menghasilkan desain terbaik pada spesimen dengan *crush initiator* berbentuk *trigon* dimana mempunyai nilai keputusan 0,98 dengan kriteria *crashworthiness* sebesar 19.193,81 N untuk  $F_{max}$ , 5.100,93 J/kg untuk SEA, dan 46,44% untuk CFE.

#### Saran

Dari hasil penelitian tersebut, desain terbaik perlu dilakukan pengujian kembali secara kuasi dinamik untuk mendapatkan nilai kriteria *crashworthiness*.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Politeknik Negeri Indramayu.

#### VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik, "Badan Pusat Statistik," 8 February 2018. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/1133>.
- [2] F. Dionisius, J. Istiyanto, Suliono and Y. N. Rohmat, "Pengembangan Pengujian *Crashworthiness* dengan Simulasi Numerik Menggunakan Model Impact Transferability," *Jurnal Teknologi Terapan (JTT)*, vol. 3, no. 1, pp. 12-17, 2017.
- [3] J. Istiyanto, S. Hakiman, D. A. Sumarsono, G. Kiswanto, A. S. Baskoro and S. Supriadi, "Experiment And Numerical Study - Effect of *Crush initiators* Under Quasi-Static Axial Load of Thin Wall Square Tube," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 660, pp. 628-632, 2014.
- [4] G. Sun, T. Pang, J. Fang, G. Li and Q. Li, "Parameterization of Cris-Cross Configuration for Multiobjective *Crashworthiness* Optimization," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vols. 124-125, pp. 145-157, 2017.
- [5] J. Istiyanto, F. Dionisius, M. Yudha, M. Malawad and S. Hakiman, "Pengaruh Diameter *Crush initiator* Terhadap *Crashworthiness* Pada Hollow Box Beam," in *Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa (SENTRA) 2016*, Malang, 2016.
- [6] J. Istiyanto and F. Dionisius, "Pengaruh Sudut *Crush initiator* Berbentuk Lubang Lingkaran Terhadap Kriteria *Crashworthiness* Pada Tabung Persegi Berdinding Tipis," in *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV*, Bandung, 2016.
- [7] F. Dionisius, J. Istiyanto, T. Endramawan, I. J. Sianturi and S. , "Pengaruh *Crush initiator* Pola Bertingkat terhadap kriteria *Crashworthiness* pada Tabung Persegi Berdinding Tipis," in *Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa #3 (SENTRA)*, Malang, 2017.
- [8] W. Johnson, P. D. Soden and S. T. Al-Hassani, "Inextensional collapse of thin-walled tubes under axial compression," *The Journal of Strain Analysis*, vol. 12, no. 4, pp. 317-330, 1977.
- [9] T. Wierzbicki and W. Abramowicz, "On the crushing mechanics of thin-walled structures," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 50, pp. 727-734, 1983.
- [10] W. Abramowicz and N. Jones, "Dynamic Axial Crushing of Square Tubes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 179-208, 1984.
- [11] W. Abramowicz and N. Jones, "Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 19, no. 5-6, pp. 415-437, 1997.
- [12] W. Abramowicz, "Thin-walled structures as impact energy absorbers," *Thin-Walled Structures*, vol. 41, no. 2-3, pp. 91-107, 2003.
- [13] Y.-B. Cho, C.-H. Bae, M.-W. Suh and H.-C. Sin, "A Vehicle Front Fame Crash Design Optimization using Hole-Type and Dent-Type *Crush initiator*," *Thin-Walled Structure*, vol. 44, no. 4, pp. 415-428, April 2006.
- [14] I. Eren, Y. Gur and Z. Aksoy, "Finite Element analysis of Collapse of Front Side Rails with New Types of *Crush Initiator*," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 451-457, 2009.
- [15] Q. Cheng, W. Altenhof and L. Li, "Experimental investigations on the crush behaviour of AA6061-T6 aluminum square tubes with different types of through-hole discontinuities," *Thin-Walled Structures*, vol. 44, pp. 441-454, 2006.
- [16] X. W. Zhang, H. Su and T. X. Yu, "Energy Absorption of An axially Crushed Square Tube With A Buckling Initiator," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, no. 3, pp. 402-417, March 2009.
- [17] N. C. Nghia, T. Dirgantara, L. Gunawan, I. S. Putra and L. H. Anh, "Analytical Prediction of Square Crash Box Structure With Holes Due To Impact Loading," in *Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, Kuala Lumpur, 2013.
- [18] N. C. Nghia, T. Dirgantara, S. P. Santosa, A. Jusuf and I. S. Putra, "Impact Behavior of Square Crash Box Structures Having Holes at Corners," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 660, pp. 613-617, 2014.
- [19] M. J. Rezvani and A. Jahan, "Effect of initiator, design, and material on *crashworthiness* performance of thin-walled cylindrical tubes : A primary multi-criteria analysis in lightweight

- design," *Thin-Walled Structures*, vol. 96, pp. 169-182, November 2015.
- [20] Q. Estrada, D. Szwedowicz, J. Silva-Aceves, T. Majewski, J. Vergara-Vazquez and A. Rodriguez-Mendez, "Crashworthiness behavior of aluminum profiles with holes considering damage criteria and damage evolution," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vols. 131-132, pp. 776-791, 2017.
- [21] I. ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials Designation : E8/E8M-09," Universidad Del Valle, Pennsylvania, 2010.
- [22] J. R. Davis, *Tensile Testing*, 2nd ed., Ohio: Materials Park, 2004.
- [23] K. S. Anupama, D. S. Gowri, D. B. PrabhakaraRao and P. Rajesh, "Application of MADM Algorithms to Network Selection," *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation, and Control Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 64-67, 2015.
- [24] Z. Tang, S. Liu and Z. Zhang, "Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 62, pp. 75-84, 2013.
- [25] Adriyendi, "Multi-Attribute Decision Making Using Simple Additive Weighting and Weighted Product in Food Choice," *International Journal Information Engineering and Electronic Business*, vol. 6, pp. 8-14, 2015.