

**Analisis Penyerapan Energi Tabung *Crash* Ganda Variasi Bentuk
Tabung Dalam Menggunakan *Polycarbonate***

***Double Crash Tube Energy Absorption Analysis of Inner Tube Shape
Variations Using Polycarbonate***

Mahlina Ekawati¹, Muh farid Hidayat¹, Roberth M. Ratlalan¹

¹Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng, Bantaeng, Indonesia

e-mail: mahlina1@akom-bantaeng.ac.id, faridhidayat1@akom-bantaeng.ac.id,
roberthmratlalan1@gmail.com

Abstrak

Tabung *crash* merupakan komponen penting dalam sistem keselamatan kendaraan yang berfungsi untuk menyerap energi benturan guna mengurangi dampak tabrakan terhadap penumpang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik *crashworthiness* dari *crash box* ganda yang terdiri dari tabung luar berbentuk lingkaran dan tabung dalam dengan variasi bentuk, yaitu bulat, segitiga, segiempat, segilima, segienam, segitujuh, dan segidelapan. Material yang digunakan adalah *Polycarbonate* yang memiliki kekuatan mekanik baik serta ketahanan terhadap panas dan benturan. Simulasi dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan pembebanan aksial tipe tekanan *pressure* untuk mengevaluasi parameter *crashworthiness*, termasuk gaya maksimum, energi serap spesifik, dan efisiensi gaya tekan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tabung dalam berbentuk segitiga memiliki nilai total energi serap tertinggi sebesar 115.96 J dan energi serap spesifik terbaik sebesar 8.28 kJ/kg. Sedangkan tabung dalam berbentuk segitujuh memiliki energi serap terendah sebesar 96.09 J. Tabung dalam berbentuk segiempat memiliki gaya rata-rata tertinggi sebesar 2.82 kN. Berdasarkan hasil ini, tabung *crash* bagian dalam dengan bentuk segitiga dapat dikategorikan sebagai bentuk yang paling optimal dalam meningkatkan performa *crashworthiness* dari tabung *crash* ganda berbahan *polycarbonate*.

Kata kunci: *crashworthiness*, metode elemen hingga, *polycarbonate*, tabung *crash* ganda

Abstract

Crash tube is an important component in vehicle safety system that function to absorb impact energy to reduce the impact of collision on passengers. This study aims to analyze the crashworthiness characteristics of a double crash box consisting of a circular outer tube and an inner tube with various shapes, namely round, triangular, square, pentagon, hexagon, heptagon, and octagon. The material used is Polycarbonate which has good mechanical strength and resistance to heat and impact. Simulations were carried out using the finite element method with pressure type axial loading to evaluate crashworthiness parameters, including maximum force, specific absorption energy, and compression force efficiency. The simulation results show that the triangular inner tube has the highest total absorption energy value of 115.96 J and the best specific absorption energy of 8.28 kJ/kg. While the heptagon inner tube has the lowest absorption energy of 96.09 J. The rectangular inner tube has the

highest average force of 2.82 kN. Based on these results, the inner crash tube with a triangular shape can be categorized as the most optimal shape in improving the crashworthiness performance of the polycarbonate double crash tube.

Keywords : crashworthiness, double crash tube, finite element method, polycarbonate

1. PENDAHULUAN

Dalam industri otomotif, sistem keselamatan kendaraan menjadi aspek krusial untuk mengurangi risiko cedera saat terjadi tabrakan. Salah satu komponen utama dalam sistem ini adalah *crash box*, yang berfungsi sebagai penyerap energi benturan untuk mengurangi dampak yang diterima oleh penumpang. Ketika terjadi tabrakan, *crash box* berperan menyerap energi tabrakan sebelum ke penumpang didalam kendaraan (Liu et al., 2013).

Crash box terbuat dari material logam seperti aluminium dan baja (G & K, 2019; Stein et al., 2012). Tabung *crash box* berdinding tipis dengan material logam diuji secara simulasi menggunakan *LS-DYNA software* dengan mempertimbangkan tipe parameter material (Jie & Lin, 2014). Material aluminium sering pula digunakan untuk memperoleh hasil serapan energi terbaik dan memprediksi kerusakan yang terjadi pada tabung *crash* (Renreng et al., 2020; Taylor et al., n.d.). Pengujian *crashworthiness* dengan material baja karbon rendah untuk memperhatikan deformasi yang terjadi setelah dilakukan simulasi menggunakan ABAQUS Software (M. Shah et al., 2016; Mirzaei et al., 2011).

Tetapi dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan material polimer mulai dikembangkan sebagai alternatif karena sifatnya yang ringan. Salah satu wujud transformasi ialah dengan menggunakan teknologi 3D Printing dalam melakukan proses manufaktur pembuatan komponen otomotif (Hao & Lin, 2020). Studi tabung *crash* dengan banyak rangka menggunakan material PLA yang dicetak menggunakan 3D printing telah dilaksanakan secara eksperimen (Hidayat et al., 2023). pengisian bagian dalam tabung *crash* menggunakan material dari 3D Printing untuk mengetahui energi serap yang dihasilkan tabung tersebut (Tao et al., 2023).

Desain tabung *crash* merupakan penentu serapan energi dengan memperhatikan variasi bentuk tabung (Dastjerdi et al., 2019). Tabung berbentuk persegi telah dilakukan analisis untuk mengetahui gaya tumbukan maksimum, penyerapan energi spesifik, dan efisiensi gaya tumbukan yang terjadi (Dionisius et al., 2018). Selain itu, penelitian tentang perbandingan bentuk penampang tabung *crash* antara lingkaran, persegi, dan persegi panjang telah dilakukan yang mana penampang lingkaran menyerap energi spesifik lebih besar dibandingkan kedua penampang tabung *crash* tersebut (Velmurugan & Muralikannan, 2009).

Oleh karena itu, penting untuk menganalisis bagaimana variasi bentuk tabung dalam pada tabung *crash* ganda dapat mempengaruhi karakteristik penyerapan energi, terutama ketika menggunakan material *polycarbonate* sebagai bahan utama.

2. METODE

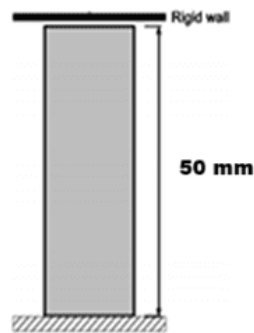
Penelitian ini akan menguji *crash box* ganda yang mana tabung tersebut terdiri dari tabung luar (*outer tube*) dan tabung dalam (*inner tube*). Tabung dalam yang digunakan bervariasi dari segi bentuk, diantaranya ialah bentuk segitiga, kotak, segiempat, segilima, segienam, segitujuh dan segidelapan. Tabung ganda tersebut akan diuji secara simulasi menggunakan metode elemen hingga.

Material spesimen yang digunakan ialah *Polycarbonate* (PC). PC merupakan bahan spesimen memiliki kekuatan yang baik, tahan panas, dan tahan terhadap benturan. Adapun sifat mekanik *Polycarbonate* terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *Material properties* dari *polycarbonate* (Hafad et al., 2021)

Properties	Nilai
Density	2.3 Kg/m ³
Ultimate Strength	42.01 Mpa
Tensile Modulus	35 Mpa
Impact strength izod	13-19.5 kJ.m ²
Hardness, Rockwell	M70, R118

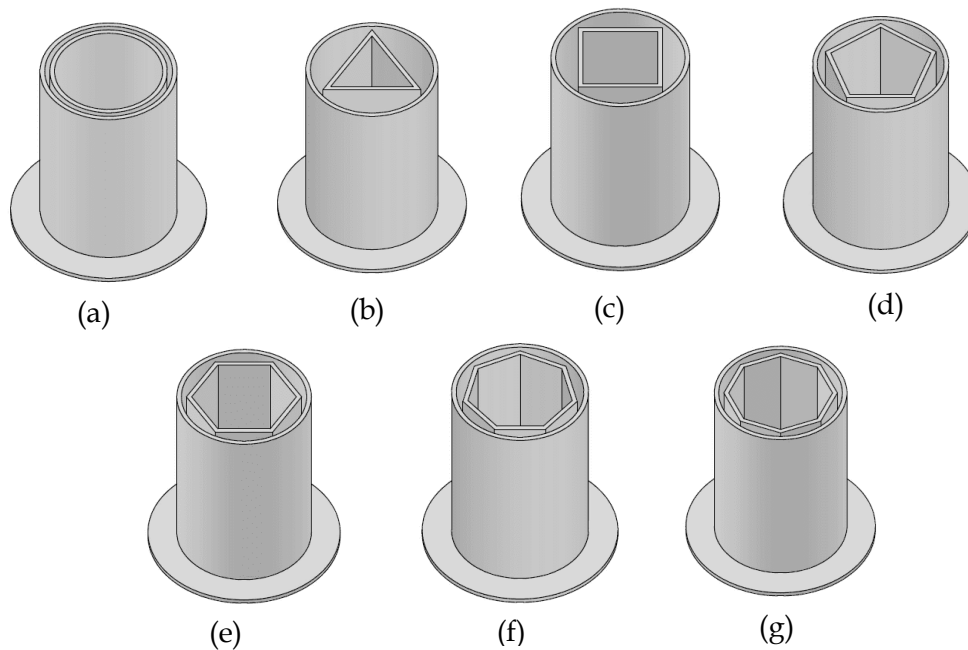
Tahapan pembuatan simulasi dilakukan dengan metode *finite element* secara pembebanan aksial pada tabung *crash* dengan tipe pembebanan *ialah pressure*. Jenis tabung yang digunakan ialah tabung ganda yang mana tabung luar berbentuk lingkaran dan tabung dalam bentuk divariasikan. Pembuatan desain rancangan tabung beserta impactor dan fix tabung dilaksanakan pada aplikasi yang disesuaikan ukuran simulasi nantinya. Geometri tabung *crash* untuk tabung luar memiliki diameter sebesar 35 mm. sedangkan untuk tabung dalam dengan bentuk yang bervariasi diambil penampang terluar sebesar Ø30 mm. Pada tabung dalam yang mana bentuk penampang bervariasi memiliki lebar penampang yang sama setiap variasi. Tabung ganda memiliki penampang alas untuk menggabungkan antara tabung luar dan dalam dengan ukuran Ø50 mm.



Gambar 1. Skema pembebanan

Persiapan spesimen dimulai dengan pembuatan komponen pada software Nastran. Ada empat komponen yang dibuat dimana tabung luar berbentuk *circle* dan tabung dalam yang bentuknya di variasikan yaitu bulat, segitiga, segiempat, segilima, segienam, segitujuh, dan segidelapan (Gambar 2). Selain itu 2 komponen lainnya ialah penampang atas sebagai pembeban dan penampang bawah sebagai *rigid*. Material yang digunakan ialah *Polycarbonate* dimana sifat mekanik ditampilkan pada Tabel 1. Ketebalan spesimen ialah 2 mm baik itu tabung luar dan dalam.

Pada proses simulasi, pembebanan yang dilakukan ialah secara aksial dengan menepatkan objek tabung *crash* tidak bergerak. Dari hasil simulasi akan diketahui nilai penyerapan terbaik dari setiap tabung *crash* ganda. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan parameter *crashworthiness* diantaranya Gaya Maksimum, Energi Serap Spesifik, dan Efisiensi gaya tekan. Parameter tersebut akan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik.



Gambar 2. Spesimen tabung *crash* ganda (a) bulat, (b) segitiga, (c) segiempat, (d) segilima, (e) segienam, (f) segitujuh, (g) segidelapan

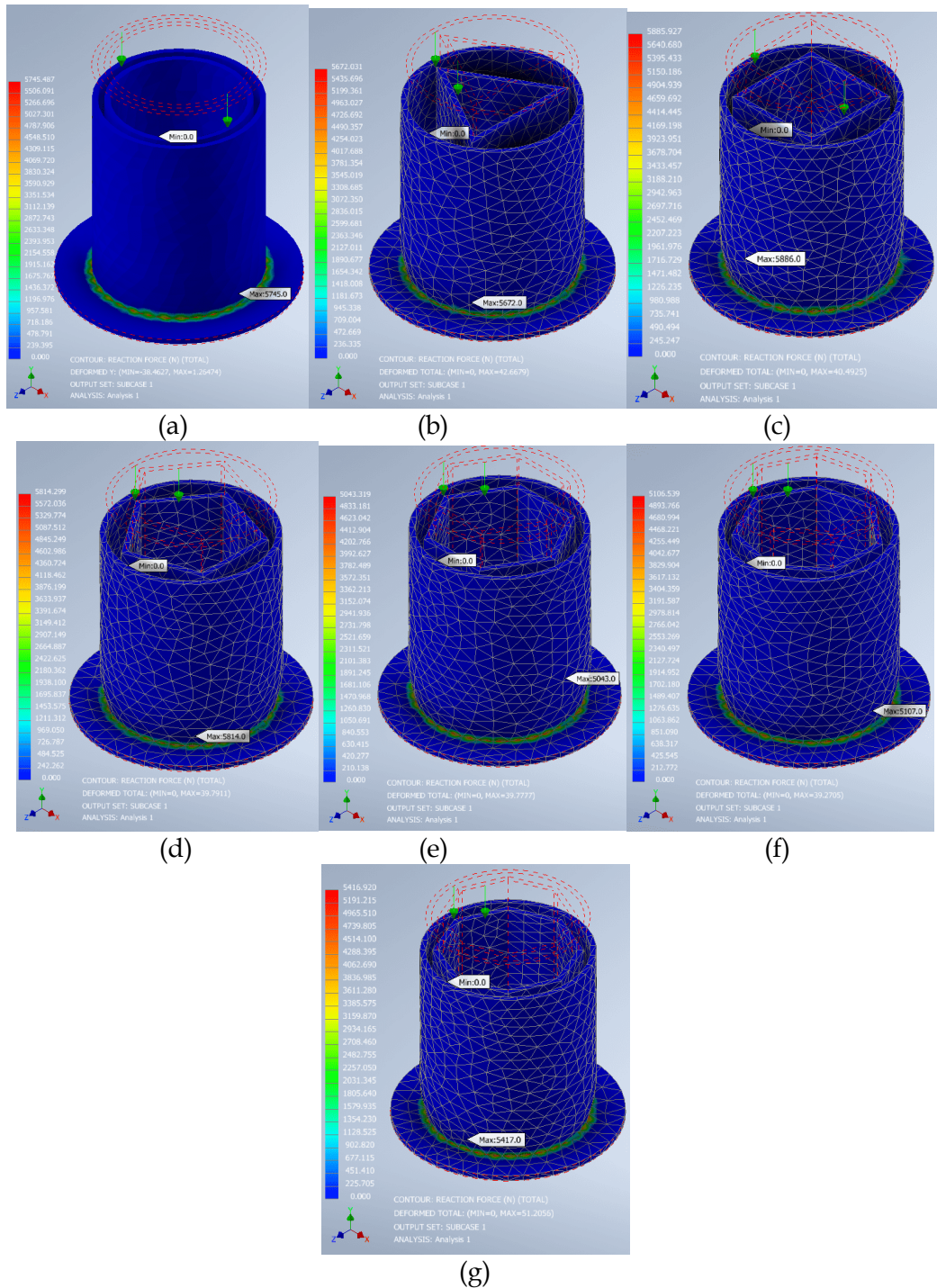
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dilakukan pada 7 jenis spesimen tabung ganda yang mana bentuk tabung bagian dalam divariasikan. Bentuk tabung bagian dalam tersebut ialah bulat, segitiga, segiempat, segilima, segienam, segitujuh, dan segidelapan. Jenis pembebanan yang dilakukan ialah penekanan aksial pada tabung. Dari hasil penelitian akan diperoleh beberapa parameter *crash* seperti total penyerapan energi, energi serap spesifik, gaya maksimum, gaya rata-rata dan efisiensi gaya tekan.

Pada tabung luar dan tabung dalam diikat dengan penampang bawah dengan memilih *constraint fixed* sebagai jenis sambungan. Tipe pembebanan yang diberikan ialah pembebanan statik (*static load*) dengan kategori tekan (*preasure*). Ukuran *mesh* pada permukaan tabung diberikan nilai 3.27 mm.

Tabung ganda dengan variasi bentuk tabung bagian dalam dianalisa secara simulasi. Dari hasil simulasi, terlihat visual deformasi setelah pembebanan pada Gambar 3. Langkah penekanan (*loading stroke*) dalam membebani setiap tabung sekitar 40mm. Dari gambar tersebut terlihat titik kritis setiap tabung berada pada sambungan tabung tersebut. Penyerapan energi maksimum yang diperoleh dari pembebanan terjadi pada jarak penekanan terakhir.

Simulasi pembebanan dengan pengujian tekan pada spesimen tabung ganda yang mana bentuk tabung bagian dalam divariasikan telah dianalisa. Dari simulasi tersebut, Parameter *crash* bisa dilihat pada Tabel 2. Beberapa indikator yang ditampilkan seperti; total energi serap (*TEA, total energy absorption*), energi serap spesifik (*SEA, spesific energi absorption*), beban maksimum (*Fmax*), beban rata-rata (*Fmean*) dan efisiensi beban hancur (*CFE, crash force efficiency*). Berat spesimen yang diberikan ialah sesuai dengan massa jenis material dan dimensi pada setiap spesimen. Karena perbedaan bentuk, maka berat setiap spesimen juga berbeda terlihat pada Tabel 2. Nilai berat spesimen bisa diketahui melalui software Autodesk Inventor. Sedangkan jarak total penekanan (*displacement*) didapatkan dari hasil simulasi. Dari setiap spesimen didapatkan jarak total penekanan sekitar 40 mm.



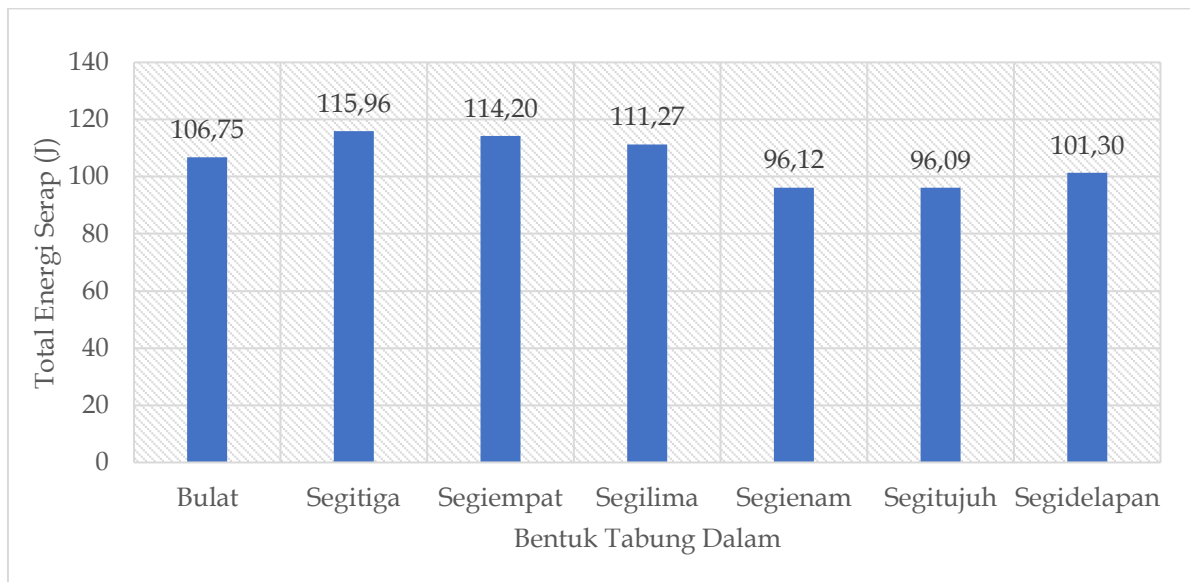
Gambar 3. Hasil simulasi tabung (a) bulat, (b) segitiga, (c) segiempat, (d) segilima, (e) segienam, (f) segitujuh, dan (g) segidelapan

Total energi serap bisa diketahui dari total nilai gaya penekanan setiap *displacement* pada tabung spesimen. Pada gambar 4, terlihat grafik total energi serap pada tabung ganda dengan variasi bentuk tabung bagian dalam. Spesimen dengan variasi tabung dalam tersebut memiliki nilai total energi serap yang berbeda namun selisihnya tidak terlalu jauh. Nilai total energi serap yang paling besar ialah tabung dalam bentuk segitiga dengan nilai serap 115.96 J. Sedangkan tabung dalam bentuk segitujuh mendapatkan nilai total energi serap yang paling

rendah dengan total energi serap sebesar 96.09 J, mendekati nilai total energi serap pada tabung segienam sebesar 96.12 J.

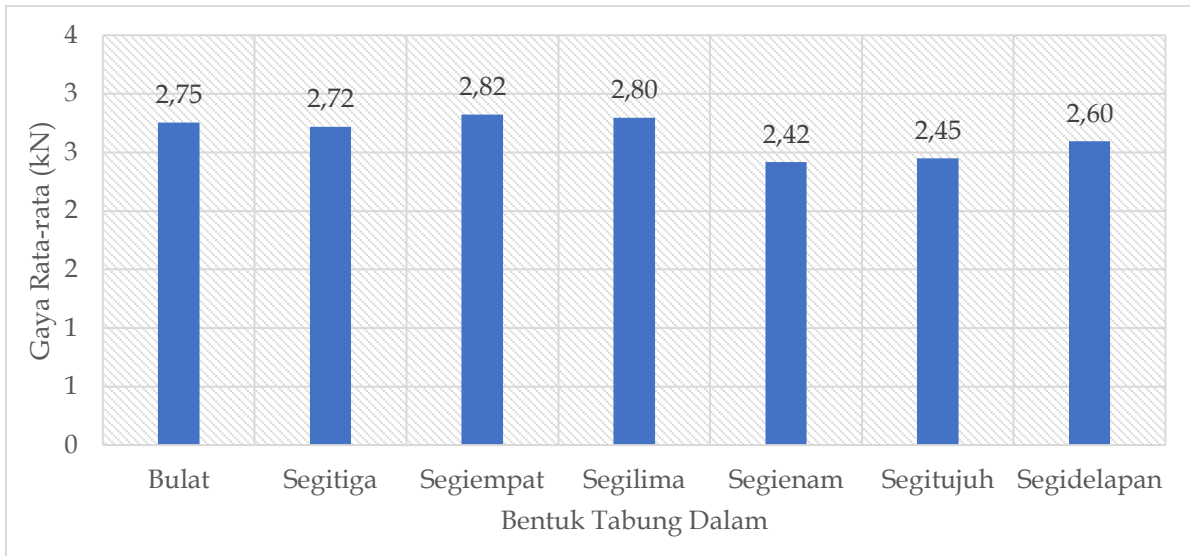
Tabel 2. Parameter penyerapan energi pada tabung ganda dengan variasi bentuk tabung bagian dalam

Jenis Tabung Bagian Dalam	Parameter						
	Berat (kg)	Jarak penekanan (mm)	TEA (J)	SEA (kJ/kg)	Fmax (kN)	Fmean (kN)	CFE (%)
Bulat	0.015	38.77	106.75	7.12	8.89	2.75	30.97
Segitiga	0.014	42.67	115.96	8.28	9.66	2.72	28.13
Segiempat	0.014	40.49	114.20	8.16	9.51	2.82	29.66
Segilima	0.015	39.79	111.27	7.42	9.23	2.80	30.30
Segienam	0.015	39.78	96.12	6.41	8.01	2.42	30.17
Segitujuh	0.015	39.27	96.09	6.41	8	2.45	30.59
Segidelapan	0.015	39.03	101.30	6.75	8.44	2.60	30.75



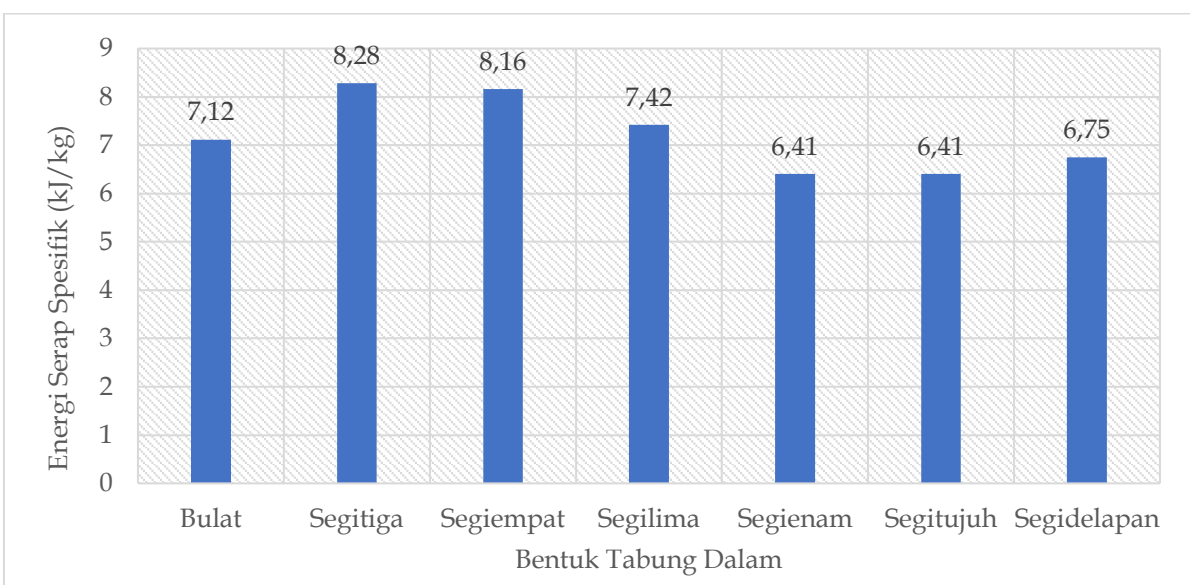
Gambar 4. Grafik nilai total energi serap yang didapatkan pada tabung ganda dengan variasi bentuk tabung bagian dalam

Nilai gaya rata-rata didapatkan dari perhitungan total energi serap dibagi dengan total jarak penekanan yang terjadi dalam simulasi. Dalam variasi bentuk tabung bagian dalam terlihat pada gambar 5. Tabung dalam dengan bentuk segiempat memiliki nilai gaya rata-rata paling besar yaitu 2.82 kN. Sedangkan tabung dalam dengan bentuk segienam memiliki nilai gaya rata-rata paling rendah yaitu 2.42 kN. Namun pada tabung dalam bentuk segitiga memiliki nilai gaya rata-rata yang hampir sama dengan bentuk segilima yaitu 2.80 kN. Dari kedua bentuk tabung dalam ini hanya memiliki nilai selisih yang sangat kecil yaitu sekitar 0.02 kN (2 N).



Gambar 5. Grafik nilai gaya rata-rata yang didapatkan pada tabung ganda dengan variasi bentuk tabung bagian dalam

Energi serap spesifik merupakan jumlah total energi yang didapatkan pada persatuan massa pada spesimen yang diuji. Gambar 6 menampilkan nilai energi serap spesifik secara grafik pada tabung ganda yang divariasikan bentuk tabung bagian dalam. Adapun massa setiap spesimen berbeda karena memiliki tabung bagian dalam yang berbeda bentuk. Perbedaan massa dari spesimen akan mempengaruhi nilai energi serap spesifik yang didapatkan. Terlihat pada grafik bahwa energi serap spesifik terbaik diantara setiap tabung dalam ialah tabung bentuk Segitiga sebesar 8,28 kJ/kg. Kemudian, tabung yang menyerap energi spesifik terbaik kedua ialah tabung dalam bentuk segiempat sebesar 8,16 kJ/kg, hal ini didapatkan karena tabung dalam segitiga dan segiempat lebih ringan diantara semua tabung. Berbeda halnya dengan tabung dalam bentuk segienam dan segitujuh yang memiliki nilai energi serap spesifik jauh dibawah segitiga sebesar 6,41 kJ/kg. Walaupun kedua tabung tersebut memiliki selisih berat tidak jauh terhadap tabung segitiga.



Gambar 6. Grafik nilai energi serap spesifik yang didapatkan pada tabung ganda dengan variasi bentuk tabung bagian dalam

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian dan analisis tabung *crash* ganda material *polycarbonate* disimulasikan dibawah pembebanan aksial yang telah dilakukan secara simulasi. Diperoleh bahwa total energi serap (TEA) paling kecil ialah tabung dalam bentuk segitujuh dengan nilai 96.09 Joule, sedangkan tabung yang menyerap energi paling besar ialah tabung dalam bentuk segitiga dengan nilai TEA sebesar 115.96 Joule. Nilai gaya rata-rata tertinggi ialah tabung dalam bentuk segiempat sebesar 2.82 kN. Selanjutnya, energi serap spesifik terbaik pada tabung *crash* dalam bentuk segitiga sebesar 8.28 kJ/kg. Sehingga diperoleh tabung *crash* bagian dalam terbaik ialah bentuk segitiga dalam menyerap energi ketika dilakukan pembebanan

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng karena telah memberikan dukungan dalam bentuk bantuan dana hibah terhadap penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Dastjerdi, A. A., Shahsavari, H., Eyvazian, A., & Tarlochan, F. (2019). Crushing analysis and multi-objective optimization of different length bi-thin walled cylindrical structures under axial impact loading. *Engineering Optimization*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1562551>
- Dionisius, F., Istiyanto, J., Endramawan, T., & Andri. (2018). Optimasi Desain Crashworthiness pada Tabung Persegi Berdinding Tipis Dengan Variasi Crush Initiator: Stripe - Parallelogram - Trigon. *Jurnal Teknologi Terapan (JTT)*, 4(1), 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.008>
- G, B., & K, A. (2019). Numerical investigation of honeycomb filled crash box for the effect of honeycomb's physical parameters on crashworthiness constants. *International Journal of Crashworthiness*, 24(2), 184–198. <https://doi.org/10.1080/13588265.2018.1424298>
- Hafad, S. A., Hamood, A. F., Alsalihi, H. A., Ibrahim, S. I., Abdullah, A. A., Radhi, A. A., Al-Ghezi, M. K., & Alogaidi, B. R. (2021). Mechanical properties study of polycarbonate and other thermoplastic polymers. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012001>
- Hao, B., & Lin, G. (2020). 3D Printing Technology and Its Application in Industrial Manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 782(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/782/2/022065>
- Hidayat, D., Istiyanto, J., Sumarsono, D. A., Kurniawan, F., Ardiansyah, R., Wandono, F. A., & Nugroho, A. (2023). Investigation on the Crashworthiness Performance of Thin-Walled Multi-Cell PLA 3D-Printed Tubes: A Multi-Parameter Analysis. *Designs*, 7(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/designs7050108>
- Jie, L., & Lin, D. (2014). Influence of material properties on automobile energy-absorbing components crashworthiness. *Open Mechanical Engineering Journal*, 8(1), 113–116. <https://doi.org/10.2174/1874155X20140501002>
- Liu, Y. J., Xia, C. Y., Ding, L., & Liu, C. H. (2013). Influence of material on automotive crash-box crashworthiness subjected to low velocity impact. *Advanced Materials Research*, 655–657, 169–172. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.655-657.169>
- M. Shah, M. K., Noorhifantylaily, A., Wani, O. I., & Sahari, J. (2016). Study of Crashworthiness Behavior of Thin-Walled Tube under Axial Loading by using Computational Mechanics. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 10(8), 1170–1175.

- Mirzaei, M., Shakeri, M., Sadighi, M., & Akbarshahi, H. (2011). Crashworthiness design for cylindrical tube using neural network and genetic algorithm. *Procedia Engineering*, 14, 3346–3353. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.423>
- Renreng, I., Hidayat, M. F., & Djamaluddin, F. (2020). Crashworthiness analysis of octagonal-inner double tube with different thickness under offaxis oblique load. *International Journal of Mechanics*, 14, 226–232. <https://doi.org/10.46300/9104.2020.14.29>
- Stein, M., Schwanitz, P., & Sankarasubramanian, H. (2012). Unified parametric car model – A simplified model for frontal crash safety. *11.LS-Dyna Forum*. <http://www.dynamore.de/de/download/papers/ls-dyna-forum-2012/documents/crash-3-3>
- Tao, C., Zhou, X., Liu, Z., Liang, X., Zhou, W., & Li, H. (2023). Crashworthiness Study of 3D Printed Lattice Reinforced Thin-Walled Tube Hybrid Structures. *Materials*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/ma16051871>
- Taylor, P., Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., Werner, H., Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., & Werner, H. (n.d.). *A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions*. November 2012, 37–41. <https://doi.org/10.1533/ijcr.2004.0289>
- Velmurugan, R., & Muralikannan, R. (2009). Energy absorption characteristics of annealed steel tubes of various cross sections in static and dynamic loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 6(4), 385–412.