

Optimizing crash box design for enhanced vehicle safety: A Gaussian process regression approach

Maulana Hayu Jarwadi^a, Annisa Jusuf^{b,*}, Pramudita Satria Palar^c,
Leonardo Gunawan^b

^aProgram Pascasarjana Teknik Dirgantara

^bKelompok Keahlian Struktur Ringan

^cKelompok Keahlian Fisika Terbang

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Jawa Barat, Indonesia

*Corresponding Author: annisa.jusuf@itb.ac.id

ABSTRACT

Transportation is a fundamental human need that permits mobility, allowing for economic, social, and cultural advancements. The crash box structure, a vital component for crashworthiness, is designed to deform during car collisions to absorb considerable impact energy plastically. This design concept attempts to prevent potential injuries to drivers and passengers. Crash boxes are constantly being developed to optimize their configuration to match needed crashworthiness features. The mean crushing force (P_m), crushing force efficiency (CFE), and specific energy absorption (SEA) are the critical crashworthiness variables that are calculated. With the advancement of data modeling tools, better crash box design can be achieved by revealing recognizable patterns and trends inherent in the data. To that end, this research uses LS-DYNA software to perform a numerical simulation of a hexagonally designed crash box that impacted under axial loading. The simulation includes the variation of thickness and perimeter of the crash box. Following the simulation, the data is modeled using the Gaussian Process Regression (GPR), often known as Kriging. This modeling approach yields surface and contour plots that show the impacts of thickness and perimeter on crashworthiness performance. The results show that the P_m value increases as the structure's thickness and perimeter increase. In comparison, the SEA and CFE values increase when the structure's thickness increases while the perimeter decreases. In summary, the simulation results show that the crash box with a thickness of 3 mm and a perimeter of 400 mm has the highest P_m value. In contrast, the crash box with a thickness of 3 mm and a perimeter of 120 mm achieves the highest CFE and SEA values.

Keywords: Optimization, gaussian process regression, crash box, hexagonal

Received 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

PENDAHULUAN

Transportasi telah menjadi kebutuhan dasar untuk mendorong kebutuhan mobilisasi manusia dalam memenuhi perkembangan ekonomi, sosial, dan budaya. Dalam 5 tahun terakhir, transportasi di Indonesia mengalami perkembangan yang cukup pesat. Pada tahun 2017 sampai 2021, transportasi di Indonesia mengalami pertumbuhan per tahun sebesar 4.53% dengan masing-masing kepulauan di Indonesia mengalami pertumbuhan per tahun dengan rentang persentase sebesar 4-6% [1]. Perkembangan transportasi juga didukung dengan perkembangan aspek keselamatan dengan tujuan untuk mengurangi angka korban jiwa saat terjadi kecelakaan. Kelaikan tabrak menjadi salah satu aspek keselamatan yang penting pada transportasi.

Kelaikan tabrak juga menjadi salah satu bahasan yang sangat penting dalam beberapa tahun terakhir pada pengembangan aspek keselamatan

pada transportasi. Kelaikan tabrak merupakan kemampuan struktur alat transportasi yang memiliki fungsi untuk melindungi penumpang saat terjadi tabrakan. Kelaikan tabrak mengacu pada kapasitas suatu struktur dalam mengurangi energi kinetik tumbukan yang terjadi dengan sendirinya melalui deformasi yang terkendali dan dapat diprediksi [2]. Pada transportasi, beberapa struktur memiliki fungsi sebagai struktur yang mampu menyerap energi akibat tabrakan. Salah satu struktur tersebut adalah *crash box*. *Crash box* diharapkan mampu menyerap energi akibat dampak sebesar mungkin agar cedera yang dialami oleh penumpang dapat diminimalkan.

Struktur berdingding tipis digunakan untuk merancang *crash box* dengan pertimbangan bahwa struktur tersebut murah, ringan, mudah diproduksi, mudah dibentuk, dan mampu menyerap energi kinetik dalam jumlah besar dengan memanfaatkan deformasi plastis [3, 4,

5]. Salah satu contoh penggunaan struktur ber dinding tipis pada alat transportasi adalah *front rail* dan *front cross* pada mobil yang diharapkan dapat mengurangi energi kinetik yang terjadi melalui deformasi secara memanjang dan melintang [6].

Pada beberapa tahun terakhir penelitian terus dilakukan dengan berbagai konfigurasi *crash box* untuk memperoleh konfigurasi yang memiliki kemampuan penyerapan energi yang terbaik dengan melihat bagaimana karakteristik kelaikan tabrak. Karakteristik yang sering dipertimbangkan dalam melakukan analisis kelaikan tabrak adalah *mean crushing force* (P_m), *crushing force efficiency* (CFE), dan *specific energy absorption* (SEA).

Kemampuan struktur dalam menyerap energi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti konfigurasi penampang, kondisi batas, properti material, keliling penampang, ketebalan struktur, dan sebagainya. Beberapa studi berfokus kepada pengaruh keliling dan ketebalan penampang [7, 8], pemberian penambahan struktur seperti *multi-cell* dan *foam-filled* [3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12] dan pemberian berbagai sudut pembebanan [10, 13, 14].

Pengembangan *crash box* tidak hanya melibatkan studi kelaikan tabrak, tetapi juga melibatkan pemodelan data. Pemodelan data merupakan konsep yang digunakan untuk menggambarkan struktur database seperti tipe data, hubungan dari suatu data, dan menyediakan sarana yang diperlukan untuk mencapai suatu kesimpulan [15]. Dalam pengembangan *crash box*, pemodelan data dapat digunakan untuk melihat pengaruh dari suatu parameter terhadap karakteristik kelaikan tabrak.

Pemodelan data dapat menggunakan banyak metode, salah satunya adalah *Gaussian Process Regression* (GPR) atau biasa disebut dengan metode Kriging. Kriging merupakan metode prediksi spasial dengan meminimalkan *mean squared error* dan menggunakan metode interpolasi dengan nilai interpolasinya dimodelkan oleh *gaussian process* [16, 17]. Metode ini mampu memprediksi nilai yang belum tersedia dengan memanfaatkan hubungan spasial dari data yang telah diamati. Pada pengembangan *crash box*, Kriging dapat memberikan nilai parameter yang belum diamati untuk dapat membantu membentuk model yang dapat memberikan gambaran pengaruh dari parameter terhadap karakteristik dalam bentuk plot data. Selain itu, Metode ini juga dapat

digunakan untuk melakukan optimasi pada struktur *crash box* dengan memanfaatkan prediksi sampel baru dan mempertimbangkan nilai karakteristik yang telah diperoleh.

Oleh karena itu, studi ini dilakukan untuk memperoleh performa dari struktur *crash box* dengan penampang segi enam yang dikenai pembebanan dinamik aksial. Selain itu, dilakukan pemodelan data dengan menggunakan metode Kriging untuk memperoleh tren dari setiap karakteristik kelaikan tabrak terhadap parameter yang telah ditetapkan.

METODOLOGI

Studi kelaikan tabrak struktur *crash box* dilakukan dengan simulasi numerik dengan menggunakan perangkat lunak LS-DYNA untuk memperoleh nilai gaya reaksi dan deformasi yang terjadi pada struktur *crash box*. Dari gaya reaksi dan deformasi yang terjadi kemudian dibuat grafik gaya terhadap perpindahan yang dapat membantu untuk memperoleh performa kelaikan tabrak pada struktur *crash box* segi enam.

Pemodelan data dilakukan sebagai tindak lanjut dari hasil simulasi numerik untuk memperoleh tren data berdasarkan parameter yang telah ditetapkan berdasarkan karakteristik kelaikan tabrak. Pemodelan data dibuat dengan menggunakan Kriging *surrogate model* dengan membuat *surface* dan *contour plot*. Penjelasan mengenai karakteristik kelaikan tabrak dan Kriging *surrogate model* dijelaskan sebagai berikut.

1. Karakteristik kelaikan tabrak

Perhitungan performa kelaikan tabrak dapat dihitung dengan mencari nilai *mean crushing force* (P_m), *specific energy absorption* (SEA), dan *crushing force efficiency* (CFE). Nilai P_m (kN) merupakan total energi yang diserap oleh *crash box* dibagi dengan perpindahan maksimum yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$P_m = \frac{EA}{\delta_{max}} \quad (1)$$

dengan EA = *energy absorption* (J), dan δ_{max} = perpindahan maksimum atau *crushing distance* (mm). Nilai EA dapat dihitung dengan mencari luas di bawah garis dari grafik gaya terhadap perpindahan atau dapat menggunakan persamaan berikut.

$$EA = \int_0^{\delta_{max}} F(x) dx \quad (2)$$

dengan $F(x) = \text{instantaneous crushing force}$ (kN) pada arah aksial. Kemudian SEA merupakan nilai energi yang diserap oleh *crash box* tiap satuan massa yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$SEA = \frac{EA}{m_{deform}} \quad (3)$$

dengan m_{deform} = massa *crash box* yang mengalami deformasi (kg). Karakteristik terakhir yaitu akan dihitung adalah CFE merupakan parameter yang menentukan efektivitas dari penyerapan energi pada struktur *crash box*. Parameter tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (4)$$

dengan P_{max} = *peak crushing force* (kN) atau nilai maksimum dari *crushing force* yang terjadi selama fenomena impact.

2. Kriging surrogate modeling

Kriging atau *Gaussian Process Regression* (GPR) banyak digunakan sebagai model pengganti untuk model komputer deterministik dengan sampel acak. Kriging merupakan model regresi linier umum yang memperhitungkan korelasi dalam residual antara model regresi dan pengamatan [18]. Kriging melakukan prediksi nilai pada lokasi yang tidak diamati dengan memanfaatkan hubungan spasial dari titik-titik yang diamati agar mendapatkan estimasi yang lebih akurat.

Terdapat hubungan tiap sampel dengan memanfaatkan hubungan fungsi antara titik i dan j yang dinyatakan sebagai $k(\xi^{(i)}, \xi^{(j)})$. Korelasi antara titik i dan j dijelaskan pada persamaan yang disebut dengan fungsi *covariance* dari Kriging [19].

$$k(\theta; \xi^{(i)}, \xi^{(j)}) = \exp\left(-\frac{|\xi^{(i)} - \xi^{(j)}|^2}{2\theta^2}\right) \quad (5)$$

dengan θ = *correlation length* dan ξ = notasi yang mempresentasikan sampel acak. Persamaan tersebut menunjukkan kekonvergenan dari hubungan dari setiap titik atau sampel. Sedangkan GPR sendiri dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan berikut.

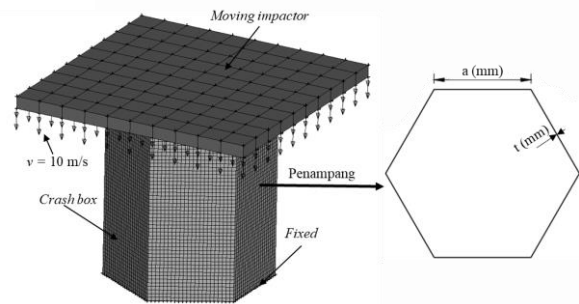
$$\hat{y}(\xi) = \Psi(\xi)^T \beta + r(\xi)^T R^{-1}(y - F\beta) \quad (6)$$

Dengan Ψ = vektor regresi, β = koefisien regresi, r = vektor korelasi, R = matriks korelasi, y = respons dari titik sampel, dan F = matriks regresi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Model elemen hingga

Simulasi *crash box* dilakukan secara numerik dengan memberikan beban impact dinamik aksial. *Crash box* dengan penampang segi enam diberikan beban impact menggunakan impactor dengan dimensi $(200 \times 200 \times 10) \text{ mm}^3$ yang diberikan kecepatan 10 m/s dengan arah gerak ke sumbu z negatif (arah bawah) dan massa tertentu yang diilustrasikan pada Gambar 1. Sebanyak 35 sampel konfigurasi *crash box* disimulasikan dengan variasi ketebalan dari 1 mm sampai 3 mm, keliling 120 mm sampai 400 mm, dan panjang 150 mm dengan persebaran data ketebalan dan keliling dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 1. Ilustrasi *crash box* dan geometri penampang

Crash box menggunakan material Mild Steel St37 yang dimodelkan menggunakan MAT24 *piecewise linear plasticity* dengan sifat material: massa jenis = $7.33 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, modulus elastisitas = 222 GPa, poisson ratio = 0.3, tegangan luluh = 0.29 GPa, dan koefisien cowper-symonds $D = 6.844 \text{ s}^{-1}$ dan $q = 4.12$ [20]. Material yang digunakan oleh impactor memiliki sifat material: massa jenis = $7.5 \times 10^{-4} \text{ kg/mm}^3$, modulus elastisitas = 193 GPa, dan poisson ratio = 0.3.

Crash box menggunakan elemen *shell* dengan ukuran elemen $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ untuk keliling di bawah 200 mm dan ukuran elemen $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ untuk keliling di atas 200 mm. Ukuran elemen tersebut diperoleh setelah melakukan uji konvergensi. Kemudian, komponen impactor menggunakan elemen *solid* dengan jumlah elemen $10 \times 10 \times 1$. Pada bagian bawah *crash box* diberikan kondisi batas *fixed* sehingga tidak akan terjadi pergerakan secara translasi maupun

rotasi. Koefisien gesek statis dan dinamis yang digunakan adalah 0,4 dan 0,3 [21].

2. Hasil simulasi numerik

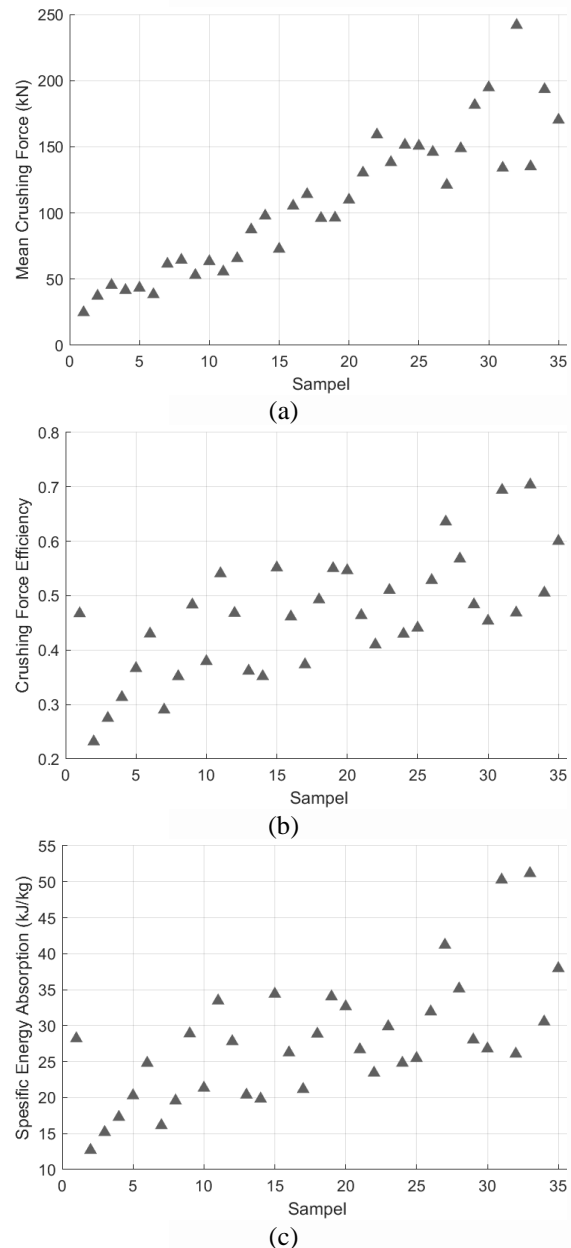
Gambar 2 dan Tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan nilai P_m , CFE, dan SEA dari *crash box* dengan penampang segi enam dari 35 sampel yang telah disimulasikan. Dari gambar dan tabel tersebut menunjukkan bahwa *crash box* dengan nilai P_m maksimum dimiliki oleh *crash box* dengan konfigurasi tebal 3 mm dan keliling 400 mm. *Crash box* dengan nilai CFE dan SEA maksimum dimiliki oleh *crash box* dengan konfigurasi tebal 3 mm dan keliling 120 mm.

Tabel 1. Hasil perhitungan karakteristik kelaikan tabrak pada 35 sampel

n	a (mm)	t (mm)	P_m (kN)	CFE	SEA (kJ/kg)
1	1	120,00	24,81	0,47	28,21
2	1	400,00	37,24	0,23	12,70
3	1,077	378,91	45,43	0,27	15,19
4	1,095	299,86	41,60	0,31	17,28
5	1,196	243,76	43,34	0,37	20,28
6	1,2	176,00	38,40	0,43	24,80
7	1,31	396,63	61,44	0,29	16,13
8	1,341	335,07	64,43	0,35	19,56
9	1,476	169,48	52,97	0,48	28,89
10	1,497	270,60	63,36	0,38	21,34
11	1,627	139,33	55,60	0,54	33,46
12	1,66	194,17	65,70	0,47	27,81
13	1,7	344,00	87,36	0,36	20,38
14	1,795	375,01	97,84	0,35	19,83
15	1,861	155,04	72,76	0,55	34,40
16	1,927	284,08	105,33	0,46	26,25
17	2,025	363,13	114,06	0,37	21,16
18	2,051	221,27	95,99	0,49	28,86
19	2,179	177,11	96,27	0,55	34,03
20	2,264	202,74	109,87	0,55	32,66
21	2,286	291,48	130,32	0,46	26,68
22	2,4	386,00	159,11	0,41	23,43
23	2,426	260,14	138,22	0,51	29,88
24	2,44	341,20	151,38	0,43	24,81
25	2,466	327,15	150,62	0,44	25,47
26	2,596	240,14	145,96	0,53	31,94
27	2,657	150,86	121,10	0,64	41,22
28	2,72	212,29	148,71	0,57	35,14
29	2,78	317,49	181,46	0,48	28,05
30	2,882	344,07	194,75	0,45	26,79
31	2,972	122,40	134,03	0,69	50,27
32	3	400,00	241,86	0,47	26,07
33	3	120,00	135,04	0,70	51,17
34	3	288,00	193,38	0,51	30,54
35	3	204,00	170,26	0,60	37,95

Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa untuk membuat *crash box* dengan nilai P_m tinggi harus

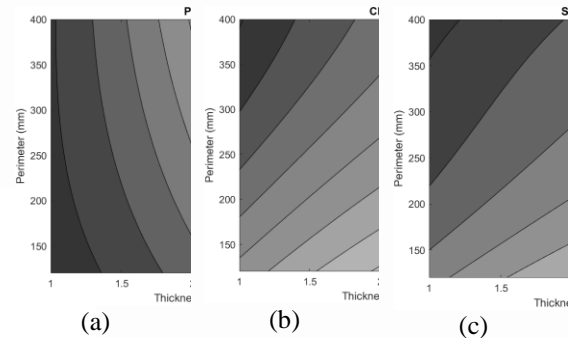
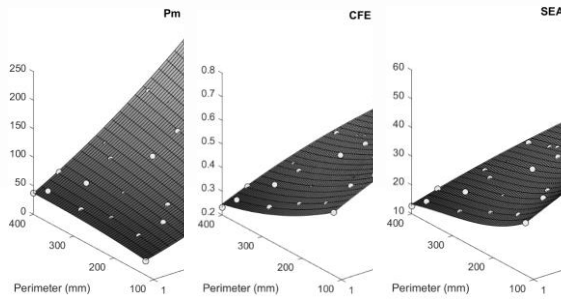
membuat *crash box* dengan tebal dan keliling yang besar. Kondisi tersebut berbanding terbalik apabila ingin membuat *crash box* nilai CFE dan SEA tinggi. Untuk membuat *crash box* dengan nilai CFE dan SEA tinggi, maka *crash box* harus di desain dengan struktur yang tebal, namun dengan keliling yang kecil.



Gambar 2. Perbandingan nilai (a) P_m , (b) CFE, dan (c) SEA dari setiap sampel

3. Pemodelan data

Pemodelan data dilakukan untuk mendukung studi yang dilakukan dengan memodelkan hasil simulasi yang telah diperoleh menggunakan *surface* dan *contour plot*. Pemodelan data dilakukan menggunakan metode Kriging dengan memanfaatkan prediksi nilai sampel dengan



Gambar 3. Pemodelan data dengan *surface* dan *contour plot* untuk nilai (a) P_m , (b) CFE, dan (c) SEA

pendekatan regresi untuk mendapatkan nilai yang dapat membentuk *surface plot*. Pemodelan ini menunjukkan tren dari karakteristik kelaikan tabrak pada struktur *crash box* dengan variasi ketebalan dan keliling. Gambar 3 menunjukkan *surface* dan *contour plot* dari *crash box* segi enam.

Geometri struktur *crash box* memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap karakteristik kelaikan tabrak. Pada *surface* dan *contour plot* untuk nilai P_m , nilai P_m meningkat seiring dengan penambahan ketebalan dan keliling penampang. Dari plot tersebut memperkuat hasil bahwa *crash box* akan memiliki nilai P_m tinggi apabila memiliki ketebalan dan keliling yang besar, sedangkan akan memiliki nilai P_m yang rendah apabila memiliki ketebalan dan keliling yang kecil. Namun, pengaruh ketebalan dan keliling terhadap nilai P_m tidak sama. Berdasarkan plot, ketebalan memiliki pengaruh yang lebih signifikan dibandingkan dengan keliling.

Plot nilai CFE dan SEA menunjukkan tren yang berbeda dengan plot nilai P_m . Data ketebalan menunjukkan tren data yang berbanding terbalik dengan data keliling. Seiring bertambah tebal struktur *crash box*, nilai CFE dan SEA semakin besar. Namun, seiring bertambah keliling *crash box*, nilai CFE dan SEA semakin berkurang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik, "Statistik Transportasi Darat," BPS-Statistic Indonesia, Jakarta, 2022.
- [2] J. Diaz dan M. Costas, "Crashworthiness," dalam *Encyclopedia of Continuum*

KESIMPULAN

Setelah dilakukan studi kelaikan tabrak dengan melakukan simulasi numerik struktur *crash box* segi enam sebanyak 35 sampel dengan variasi ketebalan dan keliling, diperoleh hasil bahwa nilai P_m terbaik dimiliki oleh konfigurasi *crash box* dengan tebal 3 mm dan keliling 400 mm, kemudian nilai CFE dan SEA terbaik dimiliki oleh konfigurasi *crash box* dengan tebal 3 mm dan keliling 120 mm. Untuk mendukung studi, pemodelan data menggunakan *surface* dan *contour plot* dilakukan dengan metode Kriging *surrogate modeling*. Dari plot tersebut diperoleh hasil bahwa nilai P_m akan meningkat seiring dengan penambahan ketebalan dan keliling penampang, namun berbanding terbalik dengan nilai CFE dan SEA. Dua nilai tersebut akan meningkat seiring dengan penambahan ketebalan, namun pengurangan keliling penampang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada beasiswa *Ganesha Talent Assistanship* (GTA) Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan bantuan pendidikan program pascasarjana.

Mechanics, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2020, pp. 469-486.

- [3] X. Zhang dan G. Cheng, "A Comparative Study of Energy Absorption Characteristics of Foam-filled and Multi-cell Square Columns," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 34, no. 11, pp. 1739-1752, 2007.
- [4] A. A. Nia dan M. Parsapour, "Comparative Analysis of Energy Absorption Capacity

- of Simple and Multi-cell Thin-walled Tubes with Triangular, Square, Hexagonal, and Octagonal Sections," *Thin-Walled Structures*, vol. 74, pp. 155-165, 2014.
- [5] Z. Tang, S. Liu dan Z. Zhang, "Energy Absorption Properties of Non-convex Multi-corner Thin-walled Columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 51, pp. 112-120, 2012.
- [6] J. H. Smith, *An Introduction to Modern Vehicle Design*, Oxford: Reed Educational and Professional Publishing, 2001.
- [7] Y. Liu, "Crashworthiness design of multi-corner thin-walled columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 46, pp. 1329-1337, 2008.
- [8] S. Hou, Q. Li, S. Long, X. Yang dan W. Li, "Multiobjective Optimization of Multi-cell Sections for the Crashworthiness Design," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, pp. 1355-1367, 2008.
- [9] A. Jusuf, "Crashworthiness Analysis of Multi-Cells and Double Walled Foam Filled Prismatic Structures Under Axial Loading," Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung, 2013.
- [10] N. Qiu, Y. Gao, J. Fang, Z. Feng, G. Sun dan Q. Li, "Crashworthiness Analysis and Design of Multi-cell Hexagonal Columns under Multiple Loading Case," *Finite Element in Analysis and Design*, vol. 104, pp. 89-101, 2015.
- [11] T. Tran, S. Hou, X. Han, W. Tan dan N. Nguyen, "Theoretical Prediction and Crashworthiness Optimization of Multi-cell Triangular Tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 82, pp. 183-195, 2014.
- [12] X. Zhang dan H. Zhang, "Some Problems on the Axial Crushing of Multi-cells," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 103, pp. 30-39, 2015.
- [13] J. Fang, Y. Gao, G. Sun, N. Qiu dan Q. Li, "On Design of Multi-cell Tubes under Axial and Oblique Impact Loads," *Thin-Walled Structures*, vol. 95, pp. 115-126, 2015.
- [14] C. Qi, S. Yang dan F. Dong, "Crushing Analysis and Multiobjective Crashworthiness Optimization of Tapered Square Tubes under Oblique Impact Loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 59, pp. 103-119, 2012.
- [15] R. Elmasri dan S. B. Navathe, *Fundamentals of Database Systems (4th Edition)*, Boston: Pearson Education, Inc., 2004.
- [16] N. A. C. Cressie, *Statistics for Spatial Data (Revised Edition)*, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 1993.
- [17] J. Sacks, W. J. Welch, T. J. Mitchell dan H. P. Wynn, "Design and Analysis of Computer Experiments," *Statistical Science*, vol. 4, pp. 409-423, 1989.
- [18] X. Wu, C. Wang dan T. Kozłowski, "Kriging-based Surrogate Models for Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis," dalam *International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering*, Jeju, 2017.
- [19] P. S. Palar, K. Shimoyama dan L. R. Zuhair, "Uncertainty Quantification Methods of Evolutionary Optimization under Uncertainty," dalam *The Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Cancun, 2020.
- [20] A. Dimas, T. Dirgantara, L. Gunawan, A. Jusuf dan I. S. Putra, "The Effects of Spot Weld Pitch to the Axial Crushing Characteristics of Top-Hat Crash Box," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 660, pp. 578-582, 2014.
- [21] I. S. Putra, T. Dirgantara, H. A. Ly, H. Homma dan K. Kishimoto, "Behavior of Thin-Walled Square Tube and Tubular Hat Sections Subjected to Low Velocity Impact Loading," *Advanced Materials Research*, Vol. 1 dari 233-37, pp. 387-394, 2008.