

Pengaruh Penambahan Konfigurasi *Foam Nine Cell Square Crash box* terhadap Pola Deformasi dan Penyerapan Energi

Prayogo Arie Bowo^{1*}, Kholis Nur Faizin²

^{1,2}Program Studi Teknologi Rekayasa Otomotif, Politeknik Negeri Madiun

^{1,2}Jln. Ring Road Barat, Winongo, Kec. Manguharjo, Kota Madiun, Jawa Timur 63162, Indonesia

E-mail: prayogo_arie@pnm.ac.id¹, kholis@pnm.ac.id²

Info Naskah:

Naskah masuk: 27 Mei 2025

Direvisi: 26 Juni 2025

Diterima: 11 Juli 2025

Abstrak

Crash box adalah komponen penting dalam struktur kendaraan yang dirancang untuk menyerap energi benturan. Rekayasa desain pada *crash box* telah dikembangkan untuk meningkatkan efektifitas penyerapan energi. Dalam penelitian ini, *crash box* persegi sembilan sel divariasikan dengan konfigurasi *foam*. Penambahan *foam* dipilih karena bobotnya yang ringan sebagai pengisi pada kotak peredam benturan. Simulasi komputer menggunakan perangkat lunak ANSYS digunakan sebagai metode penelitian. Model *crash box* persegi sembilan sel terdiri dari tiga persegi dengan panjang masing-masing 30 mm, 50 mm, dan 65 mm dengan ketebalan rusuk penghubung sebesar 2 mm. Kinerja *nine cell crash box* dievaluasi dari pola deformasi dan penyerapan energi. Pemodelan beban *frontal* pada *crash box* dilakukan dengan kecepatan 12 m/s. Berdasarkan hasil simulasi, ditemukan bahwa konfigurasi *foam* pada *nine cell crash box* berpengaruh terhadap pola deformasi dan penyerapan energi. Model CF-CB 3 memberikan penyerapan energi sebesar 34% dibandingkan dengan *crash box* tanpa busa karena pola deformasi yang lebih seragam.

Keywords:

square crash box;
foam configuration;
energy absorption;
deformation pattern.

Abstract

Crash box is a crucial component in a vehicle's structure, designed to absorb impact energy. Crash box design has been developed to improve energy absorption capability. In this study, the square nine-cell crash box is varied with foam configuration. The addition of foam was chosen due to its lightweight as a filler for crash box. The research method used a computer simulation using ANSYS software. The nine-cell square crash box model consists of three squares, each with a length of 30 mm, 50 mm, and 65 mm, with a connecting rib thickness of 2 mm. Crash box performance is evaluated based on energy absorption and deformation patterns. Frontal load modeling on crash box was modeled with a speed of 12 m/s. Based on the simulation results, it can be found that the configuration of foam on the crash box affects the absorption energy and deformation patterns. The CF-CB 3 model provides energy absorption of 34% compared with no foam crash box due to a more uniform deformation pattern.

*Penulis korespondensi:

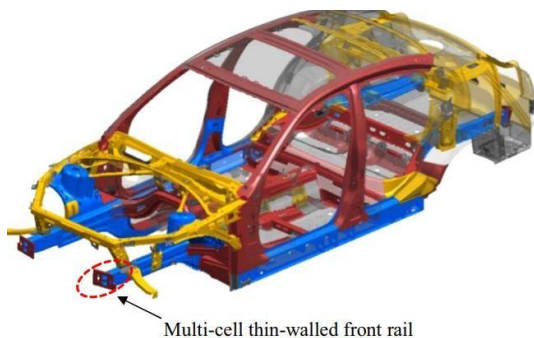
Prayogo Arie Bowo

E-mail: prayogo_arie@pnm.ac.id

1. Pendahuluan

Di Indonesia jumlah kendaraan bermotor semakin meningkat setiap tahunnya. Badan Pusat Statistik (BPS) telah mencatat jumlah kendaraan bermotor di Indonesia mencapai 157 juta unit pada 2024, naik jika dibandingkan dengan tahun 2019 yaitu sekitar 133 juta unit [1]. Kondisi tersebut menunjukkan laju peningkatan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia sangat pesat. Peningkatan jumlah kendaraan akan berdampak terhadap potensi peningkatan kecelakaan lalu lintas. Telah tercatat dari Badan Pusat Statistik (BPS) jumlah kecelakaan pada tahun 2022 sebanyak 139.258 jumlah kecelakaan dengan korban meninggal sebanyak 28.131 [2]. Permasalahan tersebut memunculkan solusi dengan menambahkan sistem keamanan pada kendaraan sehingga meningkatkan keselamatan pengemudi dan membuat dampak dari kecelakaan bisa dikurangi. Solusi dari permasalahan tersebut adalah dengan pengembangan sistem keamanan terhadap kendaraan. Salah satu komponen sistem keamanan pasif (*crashworthiness*) adalah *crash box*. *Crash box* merupakan komponen dari sistem yang *crashworthy system* yang mengurangi kerusakan fisik akibat tabrakan *frontal* pada mobil dan penumpangnya [3,4].

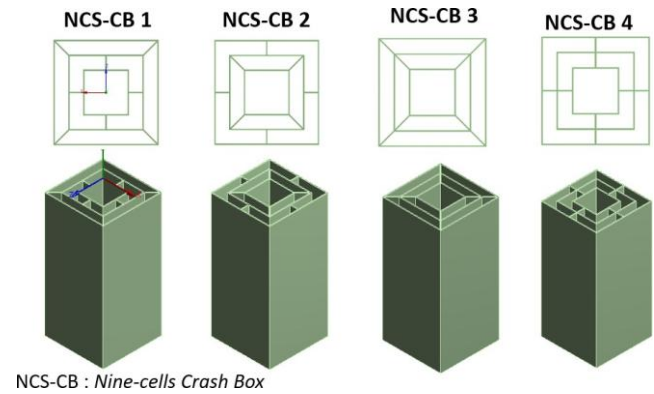
Crash box ditempatkan diantara bagian rangka dan bumper kendaraan bagian depan seperti pada gambar 1. Untuk meningkatkan kemampuannya dalam menyerap energi tabrakan, *crash box* biasanya berupa konstruksi berdingding tipis yang dibuat untuk mengalami deformasi plastis terkontrol pada saat terjadi benturan [4,5]. Deformasi ini memungkinkan *crash box* untuk menyerap sebagian besar energi tabrakan sebelum energi tersebut mencapai kompartemen penumpang.



Gambar 1. Peletakan *crash box* pada rangka kendaraan [6]

Perkembangan penelitian *crash box* telah banyak dilakukan untuk mendapatkan penyerapan energi yang baik. Pengembangan dari desain *crash box single cell* dengan penampang persegi, lingkaran dan *hexagonal* dengan pengujian *quasi static* dan dinamik telah dikembangkan [5,7]. Terdapat performa luas penampang *crash box* dalam bentuk lingkaran paling baik dibandingkan segi enam dan persegi. Pada penelitian *double cell crash box* bentuk persegi, lingkaran dan *hexagonal* [8] mendapatkan hasil bahwa penyerapan energi model lingkaran terbaik dari persegi dan segi enam. Pendekatan alternatif untuk meningkatkan penyerapan energi *crash box* adalah dengan menciptakan *crash box model multi cell*. [9-

10]. Keunggulan *crash box model multi cell* yaitu dapat membentuk suatu pola deformasi lebih seragam dan meningkatkan kapasitas penyerapan energi yang terjadi secara *frontal* akibat tabrakan [10]. Penelitian sebelumnya tentang model *nine cell crash box* berpengaruh terhadap penyerapan energi dan pola deformasi [11]. Didapat hasil yang memiliki rusuk lurus (NCS-CB 4) penyerapan energinya terbaik diantara semua model, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Model *nine cell square crash box* [11]

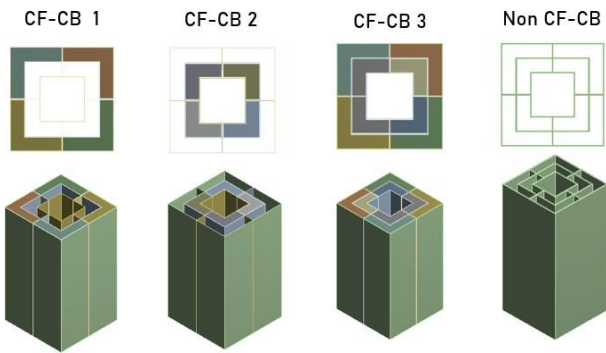
Pembuatan desain *crash box* memiliki tujuan untuk meningkatkan kapasitasnya dalam penyerapan energi. Penambahan aluminium *foam* pada *crash box* membuat penyerapan energi meningkat dari tanpa *foam* [12-13]. Menurut parameter teknologi yang digunakan, aluminium *foam* dapat mencapai kepadatan hingga sepuluh kali lebih rendah daripada material padat sambil mempertahankan potensi besar sebagai penyerap energi mekanik [14]. Penambahan *foam crash box* mempunyai banyak keuntungan dengan berat yang ringan serta memiliki mekanisme deformasi yang stabil dibanding komposit, akan tetapi *foam* memiliki daya hancur rendah [14]. Meskipun aluminium *foam* memiliki kemampuan menyerap energi, kapasitas penyerapan energinya per unit massa masih terbatas karena kekuatannya yang relatif rendah saat digunakan secara murni. Untuk mengatasi keterbatasan penyerapan energi aluminium *foam* murni, aluminium *foam* digunakan sebagai bahan pengisi ke dalam struktur *crash box* [15]. Sebuah pendekatan penting untuk mengoptimalkan penyerapan energi adalah dengan menganalisis dan menentukan konfigurasi aluminium *foam* terbaik di dalam *crash box*.

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan *foam* pada *crash box* mampu meningkatkan kapasitas penyerapan energi [16]. Namun, hal ini berdampak pada peningkatan massa *crash box* dan menurunkan nilai penyerapan energi spesifik (rasio energi yang diserap per unit massa). Oleh karena itu, diperlukan optimasi konfigurasi busa untuk mendapatkan desain *crash box* dengan performa penyerapan energi yang optimal. Penelitian ini akan berfokus pada analisis pengaruh konfigurasi *crash box* persegi sembilan sel (*nine-cell*) yang dilengkapi dengan penambahan konfigurasi *foam* spesifik terhadap performa penyerapan energinya dan identifikasi pola deformasi. Konfigurasi *foam* tersebut dirancang secara

husus untuk lebih meningkatkan kemampuan penyerapan energi tabrakan, yang pada akhirnya mengurangi kerusakan fisik pada kendaraan dan penumpang.

2. Metode

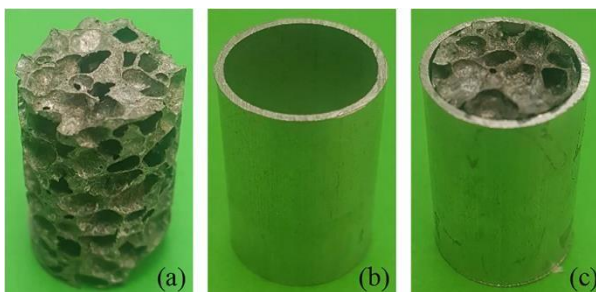
Penelitian terhadap *nine cell crash box* menggunakan rekayasa simulasi komputer dengan menggunakan bantuan software ANSYS ver.19.2 dengan model pembebanan arah *frontal*. Jenis *crash box* yang digunakan merupakan berpenampang persegi dengan *nine-cell crash box*. Variabel bebas yang digunakan adalah *nine-cell crash box* dengan memvariasikan konfigurasi *foam* yaitu CF-CB 1 (konfigurasi *crash box foam* luar), CF-CB 2 (konfigurasi *crash box foam* dalam), CF-CB 3 (konfigurasi *crash box foam* luar dalam), dan Non CF-CB (*crash box* tanpa *foam*) yang dapat dilihat pada Gambar 3. Material *crash box* yang penelitian adalah aluminium A6060 dengan *mechanical properties* pada Tabel 1.



Gambar 3. Model *nine-cell crash box* masing-masing variabel

Tabel 1. *Mechanical properties* aluminium *crash box*

No	Properties	Units	Value
1	Density	kg/m ³	2700
2	Poisson's Ratio	-	0,3
3	Modulus Elastisitas	GPa	68,2
4	Yield Strength	MPa	280
5	Shear Modulus	GPa	26



Gambar 4. Model aluminium dan aluminium *foam*

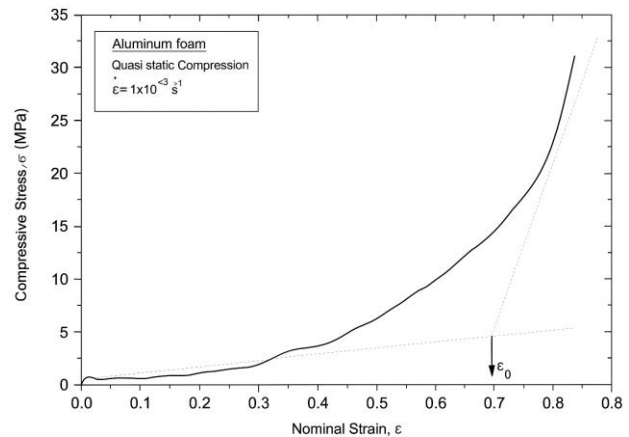
Aluminium *foam* mempunyai banyak keuntungan dengan berat yang ringan serta memiliki pola deformasi yang stabil [14,15]. Kapasitas penyerapan energi per unit aluminium *foam* terbatas karena kekuatan hancur yang

rendah bila digunakan sendiri. Untuk mengatasi keterbatasan, *foam* dibuat untuk menjadi bahan pengisi ke dalam struktur ber dinding tipis yang ditunjukkan pada gambar 4. Dapat dilihat gambar 4 menunjukkan bentuk aluminium *foam* murni (Gambar 4 a), aluminium *crash box* (Gambar 4 b) dan model *crash box* dengan penambahan *foam* (Gambar 4 c).

Pemodelan aluminium *foam* diasumsikan dengan model *crushable foam* dengan menggunakan data *mechanical properties* pada tabel 2 dan *mechanical diagram* aluminium *foam* pada gambar 5. Pemodelan material pada *nine-cell square crash box* sebagai *bilinear isotropic hardening*, sedangkan perancangan *impactor* menggunakan material *structural steel* yang dapat diasumsikan sebagai *rigid body*.

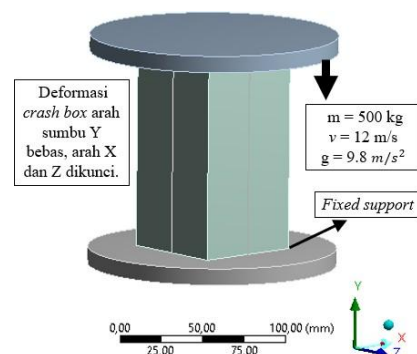
Tabel 2. *Mechanical properties* aluminium *foam*

No	Properties	Units	Value
1	Density	kg/m ³	0.41
2	Relative Density	-	0.16
3	Young Modulus	GPa	0.7
4	Plateau Stress	GPa	2.5
5	Densification Strain	-	0.57



Gambar 5. *Mechanical diagram* aluminium *foam*

Metode uji tabrakan *frontal* digunakan dalam pemodelan pembebanan. Pemodelan ini mengasumsikan bahwa kecepatan *impactor* adalah 12 m/s, panjang deformasi 84 mm, dan percepatan gravitasi 9,8 m/s². Berat massa *impactor* yaitu 500 kg ditunjukkan pada gambar 6.

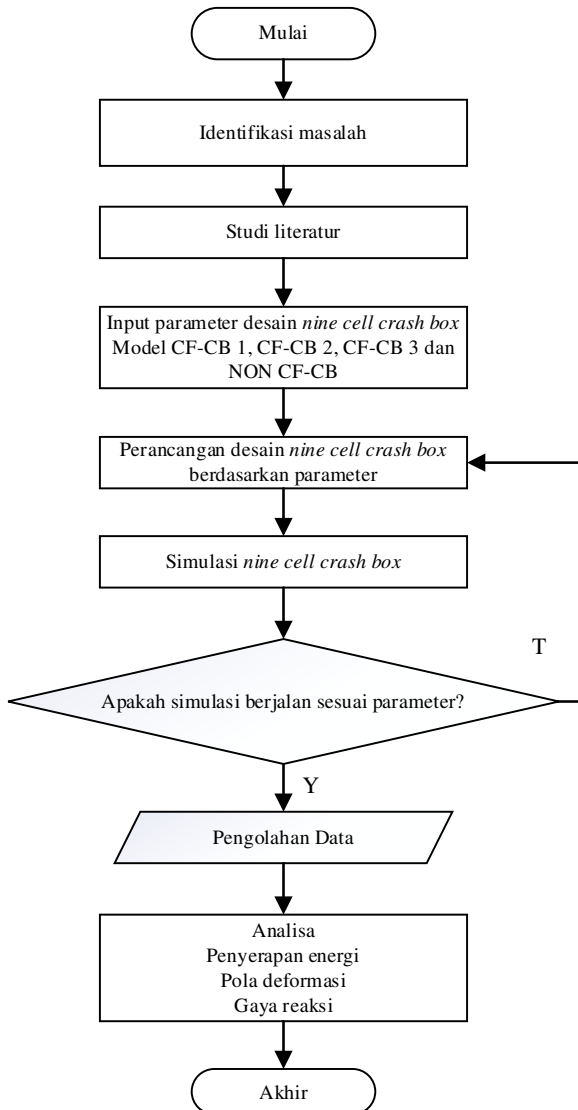


Gambar 6. *Boundary condition* *crash box*

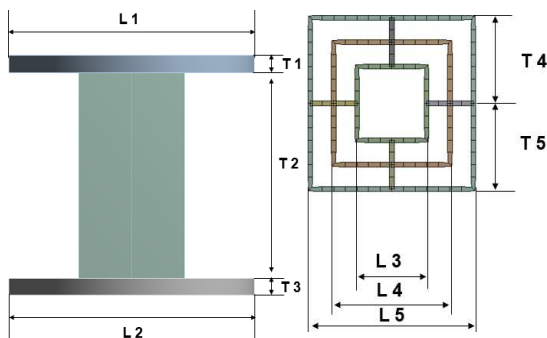
Ukuran *meshing* komponen *impactor* diatur secara default dari perangkat lunak ANSYS, dan ukuran *meshing crash box* diatur ke 2.0 mm. Diagram alir penelitian ditampilkan pada gambar 7 dan dimensi *crash box* ditampilkan pada gambar 8.

Keterangan:

- O = Outer M = Middle I= Inner
- T 1 = 30 mm T 4 = 32,5 mm L 3 = 30 mm
- T 2 = 150 mm L 1 = 200 mm L 4 = 50 mm
- T 3 = 32,5 mm L 2 = 70 mm L 5 = 65 mm



Gambar 7. Diagram alir penelitian

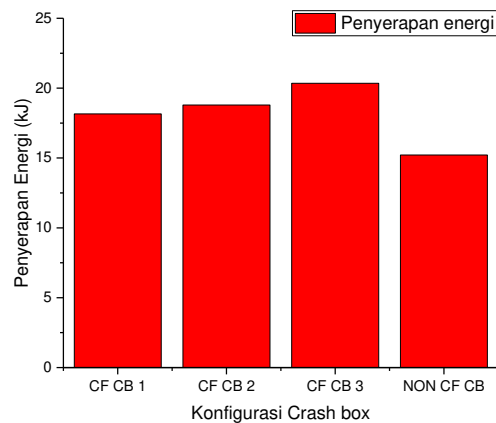


Gambar 8. Dimensi *nine cell crash box* untuk bagian *body crash box* tanpa *foam*

3. Hasil dan Pembahasan

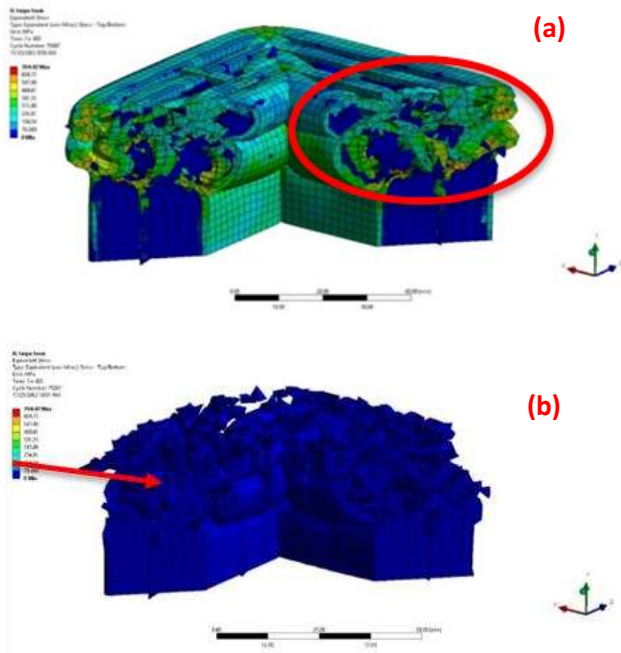
3.1 Analisis Penyerapan Energi

Perubahan bentuk *crash box* diakibatkan oleh energi tumbukan yang diubah menjadi energi regangan ketika *crash box* dan *impactor* bertabrakan. Hasil dari energi yang diserap oleh *crash box* ditampilkan pada gambar 9. Dari hasil dari pengujian menunjukkan CF-CB 3 memiliki penyerapan energi tertinggi dengan nilai 20,349 kJ dilanjut CF-CB 2 dengan nilai 18,790 kJ, CF-CB 2 dengan 18,154 kJ dan NON CF-CB 15,218 kJ. Dapat diketahui semakin banyak aluminium *foam* pada *crash box* maka kemampuan penyerapan energinya mengalami peningkatan. Kapasitas penyerapan energi per unit aluminium *foam* terbatas karena kekuatan hancur yang rendah, sehingga saat terjadi tumbukan dengan *impactor*. Aluminium *foam* cenderung hancur lebih awal daripada aluminium *crash box* [14].



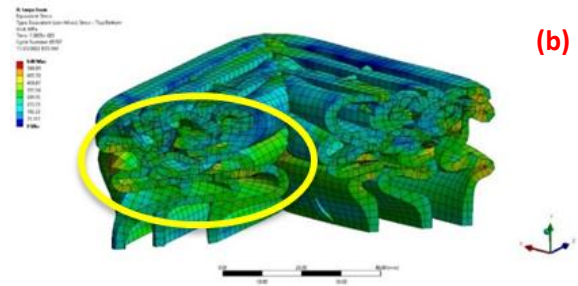
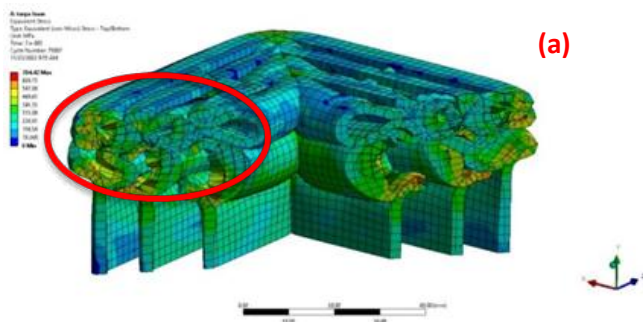
Gambar 9. Grafik hubungan penyerapan energi untuk semua model konfigurasi *crash box*

Untuk menunjukkan fenomena *foam* pada *crash box* dapat membantu penyerapan energi dapat dilihat pada gambar 10-11. Di awal ketika *impactor* bertumbukan dengan *crash box* CF-CB 3, aluminium *foam* yang mempunyai kapasitas hancur lebih rendah dibanding *body crash box* akan hancur terlebih dahulu. Kemudian setelah hancur akan memungkinkan aluminium *foam* membentuk serpihan-serpihan kecil dan sebagian masuk ke dalam lipatan-lipatan logam yang dapat membantu *folding* (gambar 10 a). Aluminium *foam* membantu *folding* tanpa merusak dinding *nine cell crash box*. Fenomena *foam* yang hancur tanpa merusak dinding *crash box* dan membantu *folding* lebih baik membuat penyerapan energi yang terjadi semakin tinggi. Untuk karakteristik hancurnya *foam* dapat dilihat pada (gambar 10 b). Pada saat *folding* CF-CB 3, aluminium *foam* mengikuti bentuk *folding body nine cell crash box* ditunjukkan lingkaran merah.



Gambar 10. *Folding* model CF-CB 3 (a). *Folding* pada model CF-CB3 (*body nine cell* dan *foam*) (b). *Folding foam* dengan tampilan *body nine cell crash box* disembunyikan.

Kemudian CF-CB 3 dilakukan perbandingan dengan Non CF-CB yang *folding* dapat dilihat pada gambar 11. Untuk non CF-CB dikarenakan multi-cell *crash box* tanpa *foam*, *folding* yang terjadi lebih panjang lancip dari pada CF-CB 3 ditunjukkan oleh lingkaran kuning. Dikarenakan pada saat tumbukan dengan *impactor* Non CF-CB terdeformasi alami tanpa bantuan *foam* dan membentuk lipatan kurang seragam seperti ditunjukkan pada lingkaran kuning. Non CF-CB mempunyai penyerapan energi terendah dari semua model. Penambahan *foam* dapat membantu *folding* menjadi lebih seragam sehingga penyerapan energi yang terjadi lebih tinggi.



Gambar 11. (a). *Folding* model CF-CB 3 dengan tampilan *foam* disembunyikan, (b). *Folding* model Non CF-CB

Konfigurasi penambahan *foam* pada CF-CB 3 membuat penyerapan energi lebih baik dengan peningkatan persentase 34% (tabel 3) jika dibandingkan dengan model *crash box* tanpa *foam* (non CF-CB). Sedangkan pada *crash box* non CF-CB memiliki nilai penyerapan energi terkecil, hal ini disebabkan karena tidak adanya aluminium *foam* yang dapat membantu untuk penyerapan energi [17]. Ini disebabkan oleh mekanisme deformasi khusus yang dimiliki oleh aluminium *foam*, yaitu sel-selnya yang kolaps secara progresif saat menerima beban, sehingga menyerap energi tumbukan secara efektif [18].

Tabel 3. Hasil penyerapan energi *crash box* keseluruhan

No	Model	EA (kJ)	Peningkatan Persentase
1	Non CF CB	15,218	-
2	CF CB 1	18,154	19%
3	CF CB 2	18,790	23%
4	CF CB 3	20,349	34%

3.2 Penyerapan Energi Spesifik

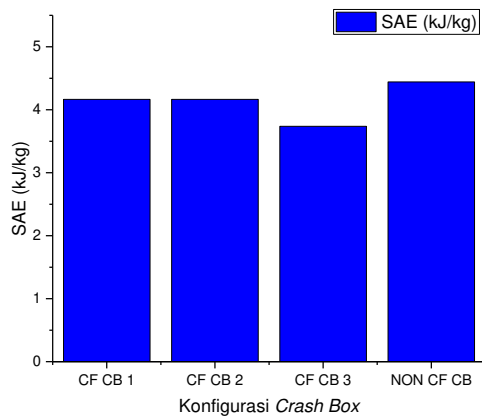
Jumlah energi yang diserap oleh *crash box* per satuan massa dinyatakan sebagai penyerapan energi spesifik. Tujuan menghitung penyerapan energi spesifik adalah untuk menilai seberapa baik model *crash box* yang disimulasikan telah bekerja. Rumus untuk menghitung energi spesifik ditampilkan pada persamaan (1) [14]:

$$SEA = \frac{EA}{m} \tag{1}$$

m = massa (kg)

EA = *energy absorption* (kJ)

SEA = *specific energy absorption* (kJ)



Gambar 12. Grafik hubungan penyerapan energi spesifik *crash box* untuk semua model

Gambar 12 menunjukkan grafik hubungan penyerapan energi spesifik *crash box* tiap model berbeda. Nilai penyerapan energi spesifik dapat dilihat pada tabel 4. Dapat dilihat bahwa seiring dengan penambahan *foam* membuat massa dari *crash box* semakin tinggi dan penyerapan energi spesifik semakin rendah. Kenaikan massa CF-CB 3 mencapai 58,91% jika dibandingkan dengan kenaikan penyerapan energi 34%, yang membuat penyerapan energi spesifik menjadi rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin banyak penambahan *foam crash box* maka akan kurang efektif pula dalam menyerap energi. Hal ini disebabkan oleh rasio kenaikan massa (58,91% pada CF-CB 3) jauh lebih besar daripada kenaikan penyerapan energi (misalnya 34%), maka penyerapan energi spesifik (total energi dibagi massa) akan menurun seperti terlihat pada tabel 4. Penambahan aluminium *foam* yang berlebih di luar titik optimal (semakin banyak) dapat mengurangi efektivitas penyerapan energi [18].

Tabel 4. Hasil penyerapan energi spesifik *crash box*

No	Model	Absorbed Energy (kJ)	Massa (kg)	Kenaikan Massa (%)	SEA (kJ/kg)
1	CF CB 1	18,15	4,359	27,27%	4,165
2	CF CB 2	18,79	4,510	31,67%	4,166
3	CF CB 3	20,35	5,443	58,91%	3,739
4	non CF CB	15,22	3,425	-	4,443

3.3 Force Reaction

Gaya yang digunakan *crash box* untuk menahan benturan dari beban *impactor* dikenal sebagai gaya reaksi. Pada grafik hubungan gaya reaksi deformasi dapat dianalisis berdasarkan luas daerah dibawah kurva masing-masing model *crash box*. Luas daerah di bawah kurva menunjukkan usaha yang dilakukan oleh *impactor* pada *crash box*. Energi regangan tercipta ketika gaya *impactor* diterapkan pada *crash box*. Gambar 13 menunjukkan grafik hubungan gaya reaksi deformasi untuk semua model. Pada

saat *impactor* menghantam *crash box* dengan adanya penambahan *foam* membuat daya hancur dari *crash box* semakin tinggi. Membuat gaya reaksi puncak yang terjadi semakin tinggi. Pada *crash box* tanpa *foam* dengan 376,84 kN sedangkan pada model *foam* terbanyak CF-CB 3 dengan gaya reaksi puncak sebesar 397,87 kN dapat dilihat pada tabel 3.

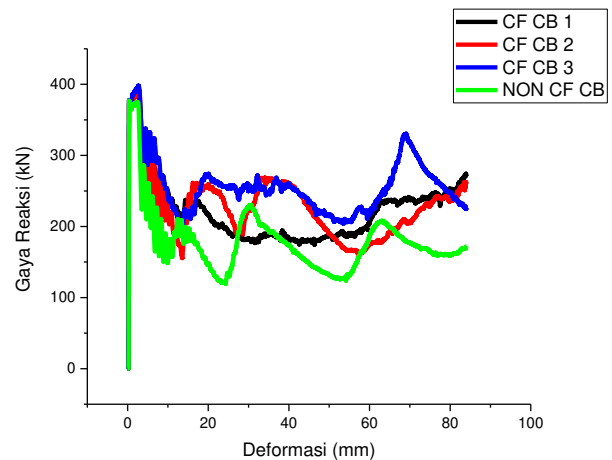
Dapat dianalisis pada deformasi ke 70 mm terdapat nilai gaya yang dapat diserap *crash box* cukup signifikan antara CF-CB 3 dan non CF-CB. CF-CB 3 dengan gaya reaksi 315 kN berbanding non CF-CB dengan 185 kN. Dilakukan analisa pada deformasi 70 mm untuk mengetahui penyebabnya pada gambar 9-12. CF-CB 3 dengan penambahan *foam* terbanyak memiliki *folding* yang cukup baik karena bantuan *foam* yang terdeformasi sebagian masuk disela dinding *crash box*, sehingga penyerapan energi lebih tinggi dibandingkan non CF-CB.

Penambahan pengisi *foam* membuat kecenderungan gaya reaksi semakin tinggi dibandingkan dengan tanpa *foam*. Hal ini sesuai persamaan 2 energi regangan [16].

$$U = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta \tag{2}$$

dengan:

- U = Energi Regangan (J)
- P = Gaya Reaksi (N)
- δ = Perpindahan (m)



Gambar 13. Grafik hubungan gaya reaksi dan deformasi semua model

Tabel 5. Data hasil simulasi semua model *crash box*

No	Model	F max (kN)	MCF (kN)	CFE (%)
1	CF CB 1	385,08	220,42	57%
2	CF CB 2	391,38	225,80	58%
3	CF CB 3	397,87	255,73	64%
4	non CF CB	376,84	176,68	47%

Gambar 13 juga menunjukkan *mean crushing force* (MCF) menggunakan persamaan 2 yang datanya terdapat pada tabel 5. Urutan MCF tertinggi sampai terendah yaitu CF-CB 3, CF-CB 2, CF-CB1 dan non CF-CB. Dengan nilai urutan MCF sesuai dengan penyerapan energi maka semakin deformasi seragam akan memberikan gaya reaksi yang tinggi sehingga energi regangannya semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan persamaan 1. Persamaan 1 menunjukkan bahwa energi dan beban berhubungan langsung, yang berarti bahwa semakin tinggi nilai beban, semakin tinggi pula nilai energi.

Dari gambar 13 grafik hubungan gaya reaksi deformasi dapat dianalisis *crushing force efficiency* CFE dengan menggunakan persamaan 3. CFE digunakan untuk mengevaluasi efisiensi penyerapan energi pada *crash box*. Terdapat urutan CFE dari tertinggi ketertendah yaitu CF-CB 3, CF-CB 2, CF-CB 1 dan non CF-CB dengan nilai dimpikan pada tabel 5. Dengan penambahan *foam crash box* dapat membuat CFE juga semakin tinggi. Hal ini dikarenakan untuk model dengan penambahan *crash box* membuat nilai MCF semakin tinggi sehingga membuat efisien dalam penyerapan energi sesuai dengan persamaan 3 [10].

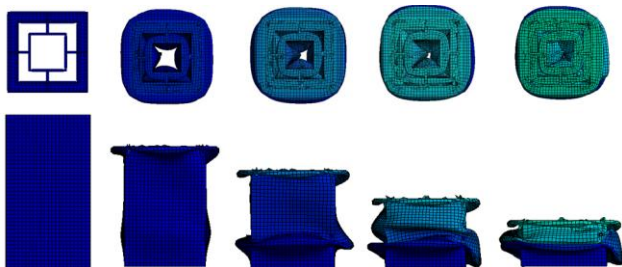
$$CFE = \frac{MCF}{F_{max}} \times 100\% \quad (3)$$

dengan:

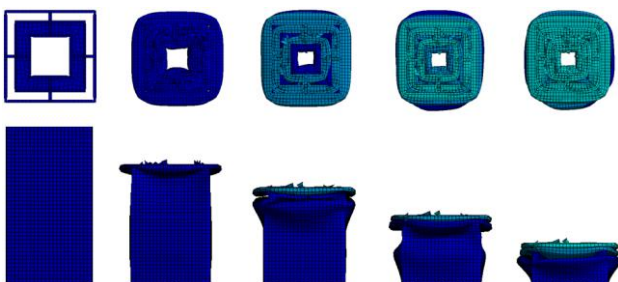
CFE = Efisiensi penyerapan energi pada *crash box*.

MCF = Gaya hancur rata rata *crash box*

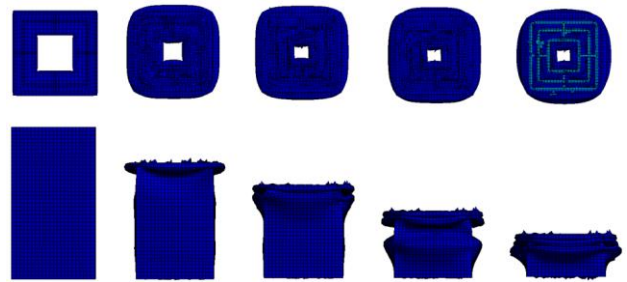
F max = Gaya maksimum yang ketika tumbukan awal



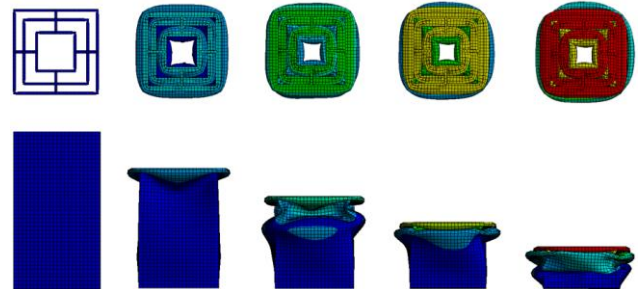
Gambar 14. Pola deformasi CF-CB 1



Gambar 15. Pola deformasi CF-CB 2



Gambar 16. Pola deformasi CF-CB 3



Gambar 17. Pola deformasi non CF-CB



Gambar 18. Pola deformasi tampak dalam semua model *crash box*

3.4 Pola Deformasi

Pola deformasi dari *crash box* yang memiliki struktur ber dinding tipis (*thin-walled*) mempunyai tiga kemungkinan, yaitu *concertina* (*axisymmetric*), *mixed mode* (*axisymmetric-diamond*) dan *diamond* (*non-axisymmetric*) [19]. Penelitian memiliki pola deformasi dari masing-masing model *crash box* bisa dilihat pada gambar 14-17, dan pola deformasi tampak dalam untuk semua model terdapat pada gambar 18. Pola deformasi *crash box* dengan panjang 0 hingga 84 mm sesuai dengan nilai $d/3$ dari panjang keseluruhan *crash box*. Untuk pola deformasi masing masing model dibagi menjadi 5 bagian yaitu 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang total deformasi 84 mm. Pada gambar 14-17 terdapat lingkaran kecil berwarna biru yang menunjukkan bahwa pola deformasi *concertina* dan warna lingkaran merah menunjukkan pola deformasi *diamond*.

Pola lipatan *concertina* terjadi pada CF-CB 2 dan CF-CB 3 sedangkan CF-CB1 dan non CF-CB mengalami pola *diamond*. Penambahan *foam* pada *crash box* menunjukkan deformasi simetris, sementara itu *crash box* kosong menunjukkan banyak ketidakstabilan yang mengakibatkan tekuk asimetris. Penambahan *foam* berkontribusi pada pola deformasi berupa penghancuran yang halus dan simetris sehingga dengan mudah dapat mengisi *folding* pada dinding luar *body nine cell crash box* [20]. Ketika terjadi deformasi membuat *foam* hancur secara seragam ke membentur dinding *crash box* tanpa merusak, membuat *crash box* memiliki bentuk deformasi yang lebih seragam yaitu bentuk *concertina* pada CF-CB 2 dan CF-CB 3 seperti pada

gambar 15-16. Dinding luar *crash box* didesain dengan lipatan concertina dengan penambahan *foam* juga berkontribusi meningkatkan penyerapan energi [21]. Penambahan *foam* ketika diisi pada konfigurasi dinding luar seperti CF-CB 1, memiliki dampak berbeda untuk pola deformasi. Untuk non CF-CB dengan tidak adanya penambahan *foam* membuat pola lipatan cenderung *diamond* seperti yang ditunjukkan pada gambar 16. Untuk memperjelas gambar 18 ditampilkan sebagai tampak dalam dari semua model *crash box*.

4. Kesimpulan

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi desain penambahan konfigurasi *foam* yang optimal untuk *crash box* kendaraan. Dalam penelitian ini, variasi penambahan aluminium *foam crash box* mempengaruhi penyerapan energi dan pola deformasi. Dengan penambahan aluminium *foam* pada CF-CB 3 memiliki persentase peningkatan penyerapan energi 34% dibandingkan dengan model *crash box* tanpa *foam* dan memiliki pola deformasi yang lebih seragam. Menganalisis material *foam* sangat penting di samping konfigurasi *foam crash box*. Dengan menggunakan *foam* berdensitas beragam, seperti aluminium *foam*, polimer *foam*, atau *foam* komposit, diharapkan bisa mendapatkan pemahaman mendalam tentang bagaimana karakteristik material memengaruhi kemampuan penyerapan energi dan pola deformasi. Penelitian *crash box* di masa mendatang sebaiknya berfokus pada pembuatan model eksperimental yang didasarkan pada hasil simulasi. Model-model ini nantinya dapat diterapkan langsung pada kendaraan untuk mengoptimalkan penyerapan energi tabrakan, sehingga meningkatkan keselamatan pengguna.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Program Studi Teknologi Rekayasa Otomotif, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun atas fasilitas Laboratorium Studio Perancangan dan CAD yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian sampai penulisan karya tulis ini selesai.

Daftar Pustaka

- [1] Kompas. "Menurut Badan Pusat Statistik : jumlah kendaraan bermotor di Indonesia," Indonesia, 2024. <https://www.kompas.com/>.
- [2] Badan Pusat Statistik. "Jumlah kecelakaan korban mati luka berat luka ringan dan kerugian materi," Indonesia, 2022. <https://www.bps.go.id/>
- [3] PTtensor. "Desain dan analisis *crash box* pada mobil," Indonesia, 2024. <https://pttensor.com/>.
- [4] Helman. "Multi-Segment *crash box* energy absorption ability using computer simulation." Jurnal Teknologi Media Perspektif. 2020. ISSN: 1214-3819
- [5] Michał Rogala, Jakub Gajewski. "Crashworthiness Analysis of Thin-Walled Square Columns with a Hole Trigger." Materials. 2023. doi: 10.3390/ma16114196
- [6] C.D. Horvath. "Advanced steels for lightweight automotive structures." Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-818712-8.00002-1
- [7] Choiron, M. A. Analysis of multi-cell hexagonal *crash box* design with *foam* filled under frontal load model. Journal of Physics: Conference Series, 1446 (1), 012022. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1446/1/012022
- [8] Li, Z.; Ma, W.; Yao, S.; Xu, P. Crashworthiness performance of corrugation- reinforced multicell tubular structures. Int. J. Mech. Sci. 2021. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106038
- [9] W. Shun, M. Qi-hua, G. Xue-hui, Z. Tian-jun. "Crashworthiness analysis and multi-objective optimization of Al/CFRP tubes with induced holes." Polym. Compos., 42 pp. 5280-5299. 2021. doi:10.1002/pc.26222
- [10] W. Cai, Q. Ma, Y. Wang, X. Gan. "Crashworthiness analysis and multi-objective optimization of Al/CFRP hybrid tube with initial damage under transverse impact." Polym. Compos., 44 pp. 7953-7971. 2023. doi:10.1002/pc.27678
- [11] Bowo, Prayogo Arie. et al., "Rekayasa model square nine-cells *crash box* terhadap penyerapan energi dan pola deformasi," Prosiding SNRTM, Vol 2 No 1. 2022.
- [12] Rogala, M.; Ferdynus, M.; Gawdzińska, K.; Kochmański, P. "The Influence of Different Length Aluminum *Foam* Filling on Mechanical Behavior of a Square Thin-Walled Column." Materials. 2021. doi:10.3390/ma14133630
- [13] Sampath V., Laksmana C., Dan Reddy S., "Energy absorption of *foam* filled aluminium tubes under dynamic bending", Procedia Manufacturing, 225-233, 2017. doi: 10.1016/j.promfg.2016.12.054
- [14] Linul E., Khezzzadeh O., "Axial crashworthiness performance of *foam*-based composite structures under extreme temperature conditions" Composite Structures. 114156, 2021. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114156
- [15] Sun G., Liu T., Huang X., "Topological configuration analysis and design for *foam* filled multi-cell tubes", Engineering Structures, 235-250, 2018. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.10.063
- [16] A. De Biasio, H. Ghasemnejad. "Development of multi aluminium *foam*-filled *crash box* systems to improve crashworthiness performance of road Service vehicle. European Journal of Mechanics. 2025. doi: 10.1016/j.euromechsol.2024.105433
- [17] Nurfaza, Alyssa Sekar. "Optimasi Desain Multi-Cell *Crash box* Dengan Aluminum *Foam* Menggunakan Response Surface Methodology." repository.ub.ac.id/id234729. 2025.
- [18] Jahuddin, Muh. Ma'ruf R. "Aplikasi Penambahan Aluminium *Foam* Pada Struktur *Crash box* Rangka Mobil Listrik." repository.unhas.ac.id:443. 2023
- [19] Velmurugan, R. And R. Muralikannan, "Energy absorption characteristics of annealed steel tubes of various cross section in static and dynamic loading" Latin American Journal of Solid and Structures, vol. 6, pp. 385-412, 2009.
- [20] Goyal S, Anand .S.C., , "Crashworthiness analysis of *foam* filled star shape polygon of thin-walled structure", Thin-Walled Structures, 144, 2019. doi: 10.1016/j.tws.2019.106312
- [21] Qiang Liu, Jie Fu, Yitao Ma. "Crushing responses and energy absorption behaviors of multi-cell CFRP tubes." Thin-Walled Structures. 2020. doi: 10.1016/j.tws.2020.106930