

Pengaruh Variasi Ketebalan Penampang Segiempat pada *Crashbox* Terhadap Kemampuan Menyerap Energi menggunakan Simulasi Numerik

Prembayun Bakti Prasetyo^{1*}, Diah Wulandari², Ferly Isnomo Abdi³, Aji Nugroho⁴

^{1,2,4} Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, 60231 Surabaya, Indonesia

³ Teknologi Rekayasa Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, 60231 Surabaya, Indonesia

ABSTRAK – Tingginya angka kecelakaan lalu lintas dengan tipe tabrakan frontal mendorong pengembangan sistem keselamatan pasif kendaraan, salah satunya adalah *crashbox*. *Crashbox* berfungsi menyerap energi tumbukan melalui deformasi plastis sehingga gaya yang diteruskan ke struktur kendaraan dan penumpang dapat diminimalkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi ketebalan penampang segiempat terhadap kemampuan penyerapan energi dan karakteristik deformasi *crashbox*. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan perangkat lunak ANSYS Explicit Dynamics. Model *Crashbox* berbahan aluminium alloy AA6061-T6 dianalisis dengan variasi ketebalan 2 mm, 3 mm, dan 4 mm. Simulasi tumbukan dilakukan secara aksial dengan impactor. Parameter *crashworthiness* yang dianalisis meliputi *Energy Absorption*, *Specific Energy Absorption*, *Mean Crushing Force*, *Initial Peak Force*, dan *Crash Load Efficiency*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan *Crashbox* meningkatkan kemampuan penyerapan energi dan kestabilan deformasi. *Crashbox* dengan ketebalan 4 mm menghasilkan nilai EA tertinggi sebesar 8,862 kJ, SEA sebesar 13,92 kJ/kg, serta CFE sebesar 38,57%, dengan pola deformasi *progressive axial folding* yang paling stabil. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi ketebalan penampang segiempat berpengaruh signifikan terhadap kinerja *crashworthiness* *Crashbox* dan dapat menjadi referensi dalam perancangan sistem keselamatan kendaraan.

HISTORI ARTIKEL

Diterima: 29 Januari 2026

Revisi: 1 Februari 2026

Diterima: 4 Februari 2025

Diterbitkan: 31 Maret 2026

KATA KUNCI

ANSYS,
Explicit Dynamics,
Crashbox,
penampang segiempat,
penyerapan energi.

1.0 PENDAHULUAN

Kecelakaan lalu lintas, khususnya tabrakan frontal, masih menjadi salah satu penyebab utama kematian dan cedera serius di dunia. *World Health Organization* (WHO) melaporkan bahwa kecelakaan lalu lintas merupakan penyebab kematian yang signifikan, terutama pada kelompok usia produktif [1]. Kondisi tersebut mendorong industri otomotif untuk terus mengembangkan sistem keselamatan kendaraan guna meminimalkan dampak energi tumbukan terhadap struktur kendaraan dan penumpang. Salah satu komponen utama dalam sistem keselamatan pasif kendaraan adalah *crashbox*, yaitu struktur penyerap energi yang ditempatkan di antara bumper dan rangka utama kendaraan. *Crashbox* dirancang untuk mengalami deformasi plastis secara progresif sehingga energi kinetik akibat tumbukan dapat diserap sebelum mencapai struktur utama kendaraan dan kabin penumpang [2]. Mekanisme deformasi yang terkontrol pada *crashbox* berperan penting dalam menurunkan gaya puncak tumbukan dan meningkatkan keselamatan penumpang [3].

Kinerja *crashbox* dipengaruhi oleh beberapa parameter desain utama, antara lain material, bentuk penampang, dan ketebalan struktur. Parameter-parameter tersebut menentukan karakteristik *crashworthiness* seperti kemampuan penyerapan energi, kestabilan deformasi, serta distribusi gaya selama tumbukan [4]. Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi geometri dan material *crashbox* dapat meningkatkan nilai *Energy Absorption* (EA) dan *Specific Energy Absorption* (SEA), serta menghasilkan deformasi yang lebih stabil [5]. *Crashbox* dengan penampang segiempat memiliki keunggulan dari sisi kemudahan manufaktur dan kestabilan pola lipatan selama tumbukan aksial [6]. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada *crashbox* berbentuk silinder, multi-corner, atau struktur dengan modifikasi tambahan seperti *trigger* dan *filler* [7]. Kajian mengenai pengaruh variasi ketebalan pada *crashbox* penampang segiempat tanpa modifikasi tambahan masih relatif terbatas, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memperoleh konfigurasi desain yang optimal.

Selain kemampuan menyerap energi, perancangan *crashbox* juga harus mempertimbangkan pembatasan gaya puncak awal (*Initial Peak Force*) yang diteruskan ke struktur kendaraan. Ketebalan yang terlalu kecil dapat menyebabkan

deformasi tidak stabil, sedangkan ketebalan yang terlalu besar berpotensi meningkatkan kekakuan struktur dan gaya tumbukan awal [8] [9]. Oleh karena itu, analisis variasi ketebalan penampang segiempat menjadi penting untuk mencapai keseimbangan antara penyerapan energi dan kestabilan deformasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi ketebalan penampang segiempat *crashbox* terhadap kemampuan penyerapan energi dan pola deformasi saat tumbukan *frontal*. Analisis dilakukan menggunakan simulasi numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) dengan pendekatan *Explicit Dynamics*. Parameter *crashworthiness* yang dianalisis meliputi *Energy Absorption* (EA), *Specific Energy Absorption* (SEA), *Mean Crushing Force* (MCF), *Initial Peak Force* (IPF), *Crash Load Efficiency* (CFE), serta karakteristik deformasi struktur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dalam perancangan *crashbox* yang lebih aman, efisien, dan aplikatif.

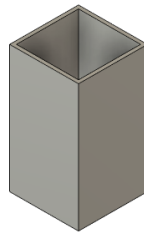
2.0 DASAR TEORI

2.1 *Crashbox*

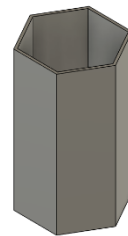
Crashbox merupakan komponen penyerap energi yang ditempatkan di bagian depan rangka kendaraan, tepatnya di antara bumper dan *longitudinal member*. Fungsi utama *crashbox* adalah menyerap energi tumbukan *frontal* melalui deformasi plastik terkontrol sebelum energi tersebut diteruskan ke struktur kendaraan lainnya [2]. Dengan mekanisme ini, *Crashbox* berperan penting dalam mengurangi gaya puncak tumbukan dan meningkatkan keselamatan penumpang. Agar dapat bekerja secara efektif, *crashbox* harus memenuhi beberapa kriteria desain, yaitu memiliki kemampuan menyerap energi yang tinggi, menghasilkan deformasi yang stabil dan progresif, mudah diproduksi, serta tidak menambah bobot kendaraan secara signifikan [3]. Oleh karena itu, pemilihan bentuk penampang dan ketebalan struktur menjadi aspek penting dalam perancangan *Crashbox*.



Gambar 1. Penampang Lingkaran



Gambar 2. Penampang Segiempat



Gambar 3. Penampang Hexagonal

2.2 *Material Crashbox*

Paduan aluminium banyak diaplikasikan dalam bidang rekayasa karena memiliki kombinasi sifat mekanik dan fisik yang unggul, seperti kekuatan spesifik yang tinggi, kemudahan proses pembentukan, metode manufaktur yang efisien, konduktivitas listrik yang baik, serta ketersediaannya yang luas, terutama pada sektor otomotif [10]. Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan paduan aluminium pada industri otomotif terus meningkat seiring dengan tuntutan global terhadap pengurangan massa kendaraan guna menekan konsumsi bahan bakar [11]. Oleh karena itu, paduan aluminium AA6061 dipilih dalam penelitian ini karena memiliki ketangguhan dan modulus resilien yang lebih tinggi dibandingkan dengan AA6060 dan AA6063. Selain itu, kondisi perlakuan panas AA6061-T6 memberikan ketahanan korosi yang cukup baik sehingga sesuai untuk aplikasi struktural.

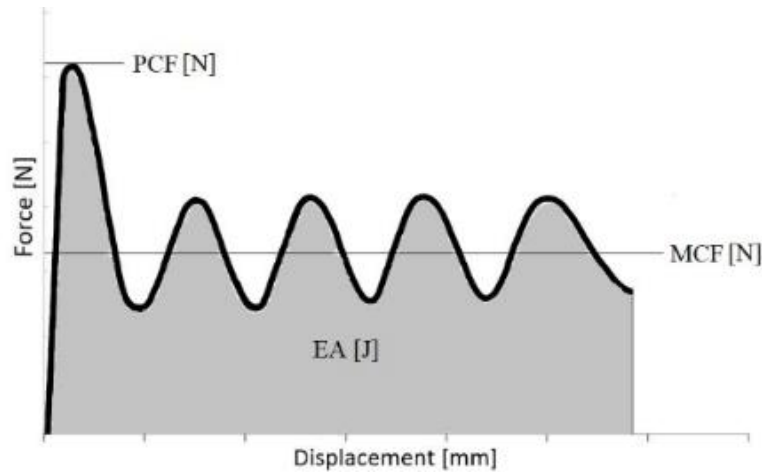
Tabel 1. Sifat Mekanik Aluminium AA6061 T6

Properti	Nilai	Satuan
<i>Density</i>	2700	kg/m ³
<i>Young's Modulus</i>	68,9	Gpa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,33	Mpa
<i>Yield Strength</i> (σ_y)	276	Mpa
<i>Tangent Modulus</i>	562	Mpa
<i>Ultimate Tensile Strenght</i>	319	-

Sumber : [12]

2.3 Crashworthiness

Crashworthiness didefinisikan sebagai kemampuan suatu struktur kendaraan untuk menyerap energi kinetik akibat tumbukan melalui mekanisme deformasi plastis, dengan tujuan utama mengurangi gaya yang diteruskan ke penumpang dan struktur utama kendaraan [13]. Struktur dengan karakteristik *crashworthiness* yang baik mampu menyerap energi dalam jumlah besar, mempertahankan deformasi yang stabil, serta menghindari terjadinya kegagalan struktural yang bersifat tiba-tiba seperti *global buckling* atau robekan material. Evaluasi *crashworthiness* umumnya dilakukan dengan menganalisis hubungan gaya terhadap perpindahan selama proses deformasi. Luas area di bawah kurva gaya–perpindahan menunjukkan besarnya energi yang diserap struktur selama tumbukan [14]. Berikut parameter untuk mengevaluasi kinerja *crashbox* dalam penelitian *crashworthiness*:



Gambar 4. Diagram Penyerapan Energi

$$EA = \int_0^{d_x} F(x) dx$$

Dengan :

- $F(x)$ = gaya tumbukan sebagai fungsi perpindahan (N),
- d_x = panjang deformasi (m)

Nilai EA menjadi dasar perhitungan parameter *crashworthiness* lainnya. Agar energi serap dapat dibandingkan pada *crashbox* dengan massa yang berbeda, EA kemudian di normalisasi terhadap massa sehingga diperoleh *Specific Energy Absorption* (SEA):

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

Dengan :

- m = Massa *Crashbox* (kg)

SEA digunakan untuk membandingkan kinerja *crashbox* dengan ketebalan atau ukuran berbeda. Selanjutnya, dari energi serap (EA) yang sudah dihitung, dapat diturunkan nilai *Mean Crushing Force* (MCF). MCF adalah gaya rata-rata yang bekerja selama deformasi, diperoleh dengan membagi energi serap terhadap panjang deformasi :

$$MCF = \frac{EA}{\delta}$$

Dengan :

- δ = Total Deformasi

MCF memberikan gambaran besarnya gaya efektif yang bekerja sepanjang proses deformasi. Untuk menilai stabilitas gaya, digunakan perbandingan antara gaya rata-rata (MCF) dengan gaya puncak (PCF) dengan rumus :

$$CFE = \frac{MCF}{PCF}$$

Nilai CFE yang tinggi menunjukkan gaya tumbukan lebih stabil, sehingga beban yang diteruskan ke struktur kendaraan lebih aman.

2.4 Pola Deformasi

Pola deformasi merupakan indikator penting dalam evaluasi kinerja *crashbox*. Pada struktur berdinding tipis, mekanisme deformasi yang paling diharapkan adalah *progressive axial folding*, yaitu terbentuknya lipatan plastis secara bertahap dan stabil sepanjang arah tumbukan. Pola deformasi ini memungkinkan energi tumbukan diserap secara bertahap dan menghasilkan distribusi gaya yang lebih stabil. Sebaliknya, deformasi berupa *local buckling* atau *global buckling* bersifat tidak diinginkan karena menyebabkan fluktuasi gaya yang tinggi dan penyerapan energi yang tidak optimal.

2.5 Metode Elemen Hingga

Menurut [15] metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk memecahkan permasalahan dalam bidang rekayasa atau pun bidang fisika lainnya. Metode elemen hingga ini digunakan ketika terdapat penyelesaian yang rumit apabila menggunakan perhitungan analitis. Dengan metode ini akan jauh lebih mudah dalam penyelesaiannya karena menggunakan penyelesaian numerik yang dilakukan oleh komputer. Permasalahan yang melibatkan ketebalan dan pembenan sangat sulit atau bahkan tidak mungkin diselesaikan dengan menggunakan rumus matematis atau perhitungan analitis yang tentunya menyelesaikan dengan persamaan diferensial parsial.

Finite Element Analysis (FEA) atau Metode *FEA* telah menjadi metode standar dalam desain dan analisis komponen mekanik maupun struktural, termasuk pada kendaraan dan sistem transportasi, karena mampu memberikan prediksi awal sebelum produksi fisik dilakukan. Untuk peristiwa tumbukan berdurasi singkat dengan deformasi besar dan kontak nonlinier, digunakan pendekatan *Explicit Dynamics* yang menyelesaikan persamaan gerak menggunakan integrasi waktu eksplisit tanpa iterasi konvergensi. Metode ini sangat sesuai untuk analisis *crashbox* karena mampu merepresentasikan konversi energi kinetik menjadi energi deformasi plastis secara stabil. Kestabilan numerik dipengaruhi oleh ukuran langkah waktu yang bergantung pada ukuran elemen dan sifat material, sehingga pemilihan mesh yang tepat diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi.

Prosedur umum *FEA Explicit Dynamics* meliputi;

- 1) *Engineering Data Material*
- 2) *Input Geometri 3D Model*
- 3) *Meshing*
- 4) *Boundary Conditions*
- 5) *Solving*
- 6) *Result Evaluation*

Proses ini memungkinkan desainer melakukan *what if analysis*, membandingkan alternatif desain hanya dengan simulasi komputer tanpa harus membuat *prototype* fisik sehingga efisien dari segi waktu dan biaya.

3.0 METODE DAN MATERIAL

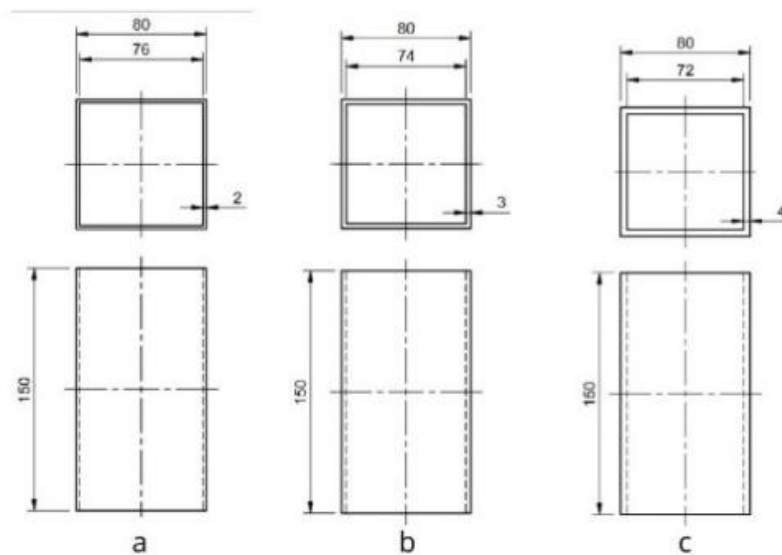
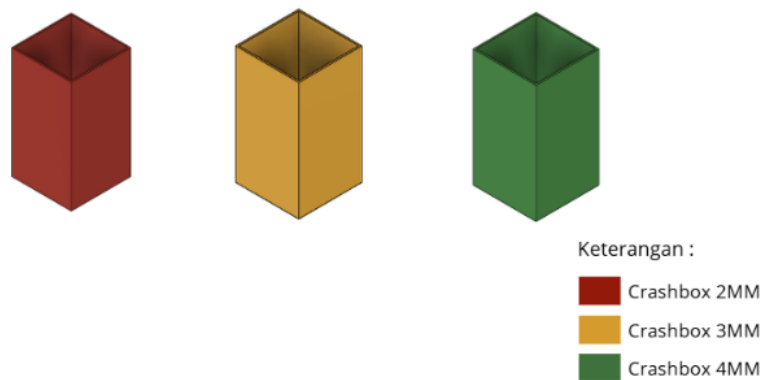
Metode penelitian ini mencakup rangkaian tahapan yang dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan performa dari 3 desain *crashbox* menggunakan pendekatan *Finite Element Analysis*. Proses penelitian dimulai dari pembuatan model geometri, penentuan material dan sifat mekanik, persiapan *mesh*, penetapan kondisi batas, pembebanan, hingga pelaksanaan analisis menggunakan *ANSYS Workbench*. Setiap langkah dirancang untuk memastikan bahwa ketiga model dianalisis dalam kondisi yang sama, sehingga hasil perbandingan terhadap parameter yang di analisis dapat diperoleh secara objektif dan akurat.

3.1 Desain dan Model Crashbox

Desain *crashbox* yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas tiga model berbeda, yaitu Model A, B dan C yang masing-masing memiliki variasi ketebalan dinding. Ketiga desain dibuat menggunakan perangkat lunak Fusion 360, yang banyak digunakan dalam proses rekayasa desain komponen mekanik karena mampu menghasilkan geometri yang presisi dan sesuai standar manufaktur. Model *crashbox* yang dianalisis memiliki penampang segiempat dengan dimensi 80×80 mm dan panjang 150 mm. Variasi ketebalan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 2 mm, 3 mm, dan 4 mm.

Tabel 2. Model Crashbox

No	Crashbox	Ukuran (mm)	Ketebalan (mm)	Massa (kg)
1	Model A	80 x 80	2	0,253
2	Model B	80 x 80	3	0,375
3	Model C	80 x 80	4	0,493

Gambar 5. Desain 2D *Crashbox*Gambar 6. Desain 3D *Crashbox*

Model yang telah selesai dibuat diekspor ke perangkat lunak ANSYS *Workbench* dalam format *STEP* untuk memastikan kompatibilitas geometri dan meminimalkan kehilangan detail selama proses transfer. Format *STEP* umum digunakan dalam analisis numerik karena mampu menjaga ketelitian bentuk geometri kompleks. Model yang telah diekspor kemudian digunakan sebagai input utama dalam proses simulasi *Finite Element Analysis*.

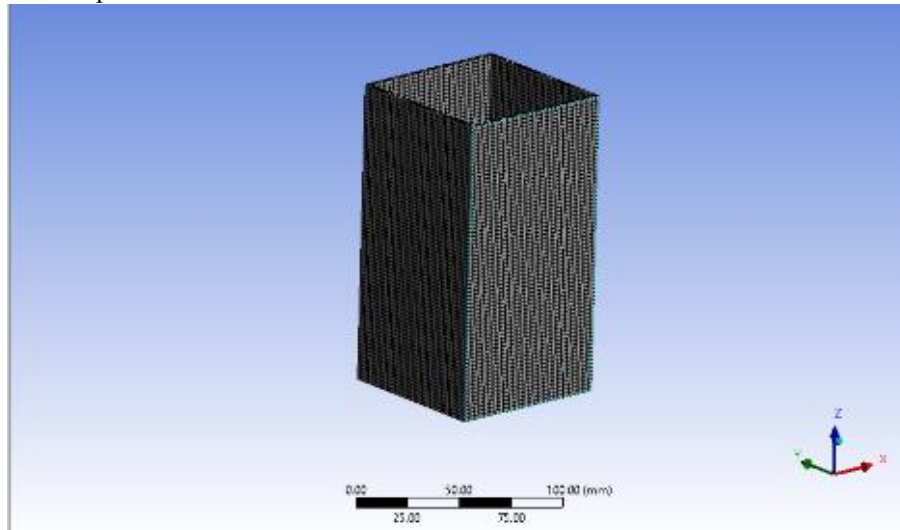
3.2 Pemilihan Material

Material merupakan aspek penting dalam analisis struktur *crashbox* karena sifat mekaniknya memengaruhi respons terhadap pembebanan. Pada penelitian ini digunakan aluminium AA6061 T6 sebagai material *crashbox*, yang dipilih karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang baik serta umum digunakan pada struktur kendaraan ringan. Penggunaan material ini dimaksudkan sebagai pendekatan awal (*preliminary study*) untuk mengevaluasi pengaruh variasi ketebalan penampang terhadap penyerapan energi dan pola deformasi.

3.3 Meshing

Proses *meshing* dilakukan untuk membagi model *crashbox* menjadi elemen-elemen kecil sehingga respons struktural selama tumbukan dapat dianalisis secara numerik. Pada penelitian ini, proses *meshing* dilakukan menggunakan fitur *Automatic Meshing* pada ANSYS *Workbench* dengan tipe elemen *solid* tiga dimensi. Elemen yang digunakan merupakan elemen tetrahedral yang umum diaplikasikan pada analisis *Explicit Dynamics* karena mampu merepresentasikan deformasi besar dan kontak nonlinier secara stabil. Ukuran elemen (*element size*) ditetapkan sebesar 2 mm dan diterapkan secara seragam pada seluruh model *crashbox*. Pemilihan ukuran mesh ini didasarkan pada pertimbangan keseimbangan antara akurasi hasil simulasi dan efisiensi waktu komputasi. Ukuran elemen yang lebih kecil akan meningkatkan ketelitian hasil, namun berdampak pada meningkatnya waktu komputasi secara signifikan. Oleh karena itu, satu konfigurasi mesh yang sama digunakan pada seluruh variasi ketebalan untuk memastikan konsistensi dan objektivitas dalam perbandingan hasil simulasi.

Struktur mesh yang dihasilkan menunjukkan distribusi elemen yang merata pada seluruh volume *crashbox*, khususnya pada daerah yang berpotensi mengalami deformasi plastis selama tumbukan aksial. Dengan konfigurasi *meshing* ini, mekanisme deformasi seperti pembentukan lipatan progresif dapat direpresentasikan dengan baik tanpa menimbulkan instabilitas numerik selama proses simulasi.



Gambar 7. Penambahan Meshing

3.4 Boundary Conditions dan Pembebanan

Boundary condition diterapkan untuk merepresentasikan kondisi pemasangan *crashbox* dan proses tumbukan frontal kendaraan. Bagian belakang *crashbox* diberikan kondisi *fixed support* untuk mengunci seluruh derajat kebebasan, sehingga *crashbox* diasumsikan terpasang kaku pada rangka kendaraan dan tidak mengalami pergerakan selama tumbukan. Kontak antara *crashbox* dan *base plate* didefinisikan sebagai *bonded contact*, yang mengasumsikan tidak terjadi pemisahan maupun pergeseran selama simulasi. Kontak antara permukaan depan *crashbox* dan *impactor* dimodelkan sebagai *frictionless contact* yang diasumsikan untuk menyederhanakan model tumbukan aksial dan memastikan bahwa gaya yang bekerja didominasi oleh gaya normal tumbukan, sehingga pengaruh variasi ketebalan terhadap karakteristik penyerapan energi dan respons deformasi dapat dianalisis secara lebih objektif dan konsisten. Pendekatan ini umum digunakan dalam studi *crashworthiness* numerik untuk menghindari kompleksitas tambahan akibat gesekan yang dapat memengaruhi distribusi gaya dan hasil perbandingan antar model. Pembebanan diterapkan dengan memberikan kecepatan awal (*initial velocity*) sebesar 15,6 m/s pada *impactor* searah sumbu aksial *crashbox*, sementara *crashbox* berada dalam kondisi diam pada awal simulasi. Massa *impactor* ditetapkan sebesar 100 kg. Dengan konfigurasi ini, energi kinetik *impactor* dikonversi menjadi energi deformasi plastis *crashbox* selama proses tumbukan, sehingga karakteristik penyerapan energi dan pola deformasi dapat dianalisis secara akurat.

3.5 Parameter Analisis

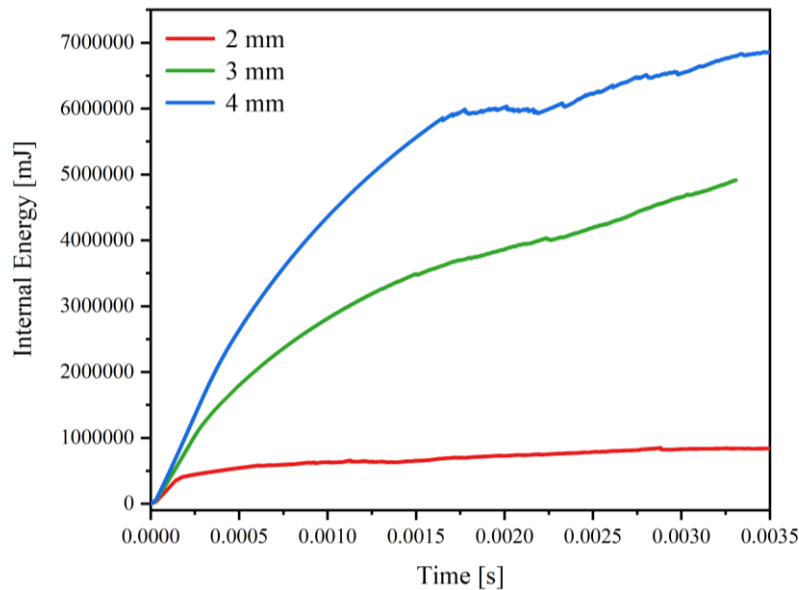
Kinerja *crashworthiness crashbox* dievaluasi menggunakan beberapa parameter utama hasil *post-processing* simulasi. *Energy Absorption* (EA) menunjukkan total energi tumbukan yang diserap selama deformasi. *Specific Energy Absorption* (SEA) merupakan EA yang dinormalisasi terhadap massa untuk menilai efisiensi penyerapan energi. *Mean Crushing Force* (MCF) merepresentasikan gaya rata-rata selama deformasi, sedangkan *Initial Peak Force* (IPF) menunjukkan gaya maksimum awal saat kontak pertama tumbukan. *Crash Load Efficiency* (CFE) didefinisikan sebagai rasio antara MCF dan IPF dan digunakan untuk menilai kestabilan distribusi gaya. Selain parameter kuantitatif tersebut, dilakukan pengamatan pola deformasi untuk memastikan mekanisme deformasi berlangsung secara progresif dan terkendali.

4.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Energy Absorption (EA)

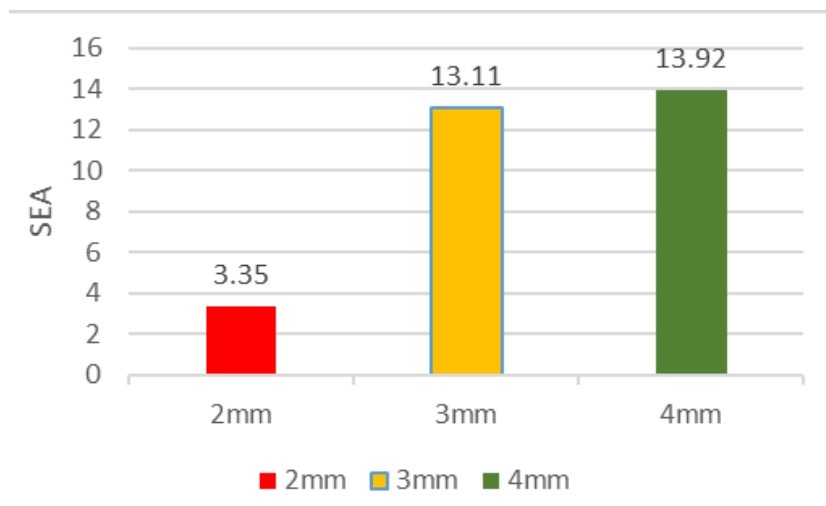
Berdasarkan hasil simulasi, nilai *Energy Absorption* (EA) menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya ketebalan *crashbox*. *Crashbox* dengan ketebalan 2 mm memiliki energi serap terendah sebesar 0,847 kJ, sedangkan *crashbox* 3 mm mampu menyerap energi sebesar 4,912 kJ. Nilai tertinggi diperoleh pada *crashbox* 4 mm dengan energi serap sebesar 6,862 kJ. Nilai EA ini menunjukkan bahwa *crashbox* yang lebih tebal memiliki kemampuan deformasi plastis yang lebih

besar, sehingga mampu menyerap energi tumbukan dalam jumlah yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya volume material yang berperan dalam proses deformasi selama tumbukan.



Gambar 8. Grafik EA

4.2 Specific Energy Absorption (SEA)

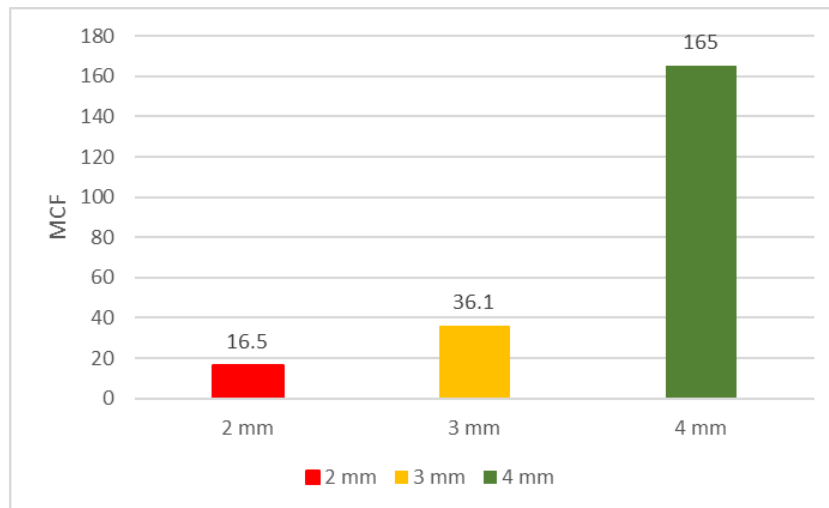


Gambar 9. Diagram Batang Nilai SEA

Untuk mempertimbangkan pengaruh massa, nilai EA kemudian dinormalisasi menjadi *Specific Energy Absorption* (SEA). Nilai SEA juga menunjukkan tren peningkatan dari 3,35 kJ/kg pada ketebalan 2 mm menjadi 13,11 kJ/kg pada ketebalan 3 mm, dan mencapai 13,92 kJ/kg pada ketebalan 4 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa ketebalan tidak hanya meningkatkan energi serap total, tetapi juga meningkatkan efisiensi penyerapan energi per satuan massa.

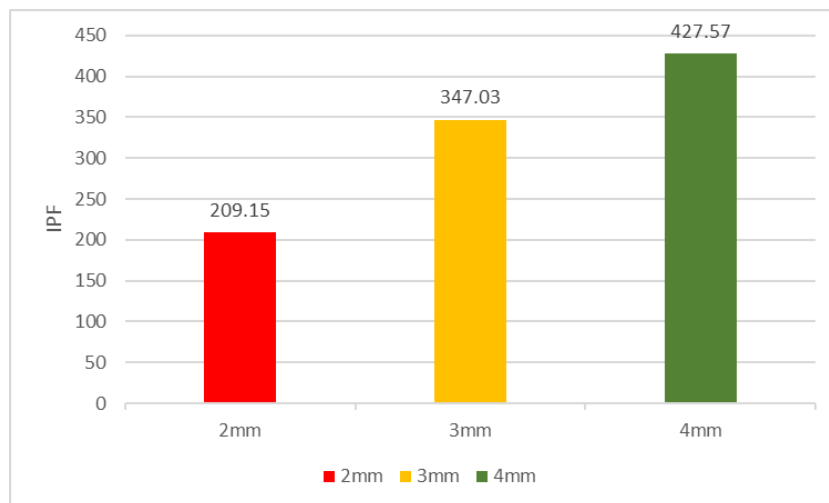
4.3 Mean Crushing Force (MCF)

Diagram menunjukkan bahwa nilai *Mean Crushing Force* (MCF) meningkat seiring bertambahnya ketebalan *crashbox*. *Crashbox* dengan ketebalan 2 mm, 3 mm, dan 4 mm masing-masing memiliki nilai MCF sebesar 16,5 kN, 36,1 kN, dan 165 kN. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa *crashbox* yang lebih tebal mampu menahan gaya rata-rata yang lebih besar selama proses deformasi. Namun, nilai MCF yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan gaya yang diteruskan ke struktur kendaraan, sehingga *crashbox* dengan ketebalan 3 mm dinilai lebih optimal karena memberikan keseimbangan antara kemampuan penyerapan energi dan pembatasan gaya yang diteruskan.



Gambar 10. Diagram Batang Nilai MCF

4.4 Initial Peak Force (IPF)



Gambar 11. Diagram Batang Nilai IPF

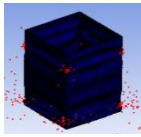
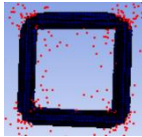
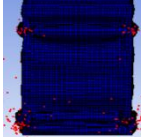
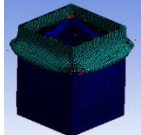
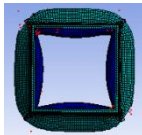
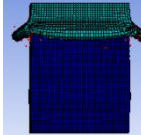
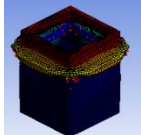
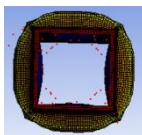
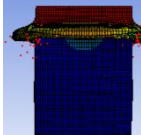
Initial Peak Force (IPF) merupakan parameter penting dalam evaluasi *crashworthiness* karena merepresentasikan gaya maksimum awal yang terjadi saat struktur pertama kali mengalami tumbukan. Nilai IPF yang tinggi menunjukkan kekakuan awal struktur yang besar, namun berpotensi meningkatkan gaya yang diteruskan ke struktur kendaraan dan penumpang. Berdasarkan hasil simulasi, nilai IPF menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya ketebalan *crashbox*. *Crashbox* dengan ketebalan 2 mm menghasilkan IPF sebesar 209,15 kN, sedangkan ketebalan 3 mm dan 4 mm masing-masing menghasilkan IPF sebesar 347,03 kN dan 427,57 kN. Nilai IPF ini menunjukkan bahwa bertambahnya ketebalan *crashbox* menyebabkan peningkatan kekakuan struktur, sehingga gaya puncak awal yang terjadi saat kontak pertama tumbukan menjadi lebih besar. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa struktur yang lebih tebal mampu menahan beban awal tumbukan dengan lebih kuat, namun di sisi lain berpotensi meningkatkan gaya yang diteruskan pada tahap awal deformasi.

4.5 Crash Load Efficiency (CFE)

Crash Load Efficiency (CFE) digunakan untuk mengevaluasi kestabilan gaya selama proses deformasi, yang merupakan rasio antara MCF dan IPF. Nilai CFE meningkat secara signifikan dari 0,79% pada ketebalan 2 mm menjadi 10,39% pada ketebalan 3 mm, dan mencapai 38,57% pada ketebalan 4 mm. Nilai CFE yang lebih tinggi menunjukkan bahwa *crashbox* dengan ketebalan lebih besar memiliki distribusi gaya yang lebih stabil selama tumbukan, sehingga lebih efektif dalam mengurangi fluktuasi gaya yang berpotensi membahayakan struktur kendaraan dan penumpang.

4.6 Pola Deformasi

Tabel 3. Pola Deformasi

Model	Isometric View	Tampak Atas	Tampak Depan
2 mm			
3 mm			
4 mm			

Pada *crashbox* dengan ketebalan 2 mm, deformasi terjadi relatif lebih cepat dengan lipatan yang cenderung tipis dan kurang stabil. Hal ini disebabkan oleh kekakuan struktur yang rendah sehingga *crashbox* lebih mudah mengalami deformasi awal. Meskipun deformasi bersifat progresif, kestabilan lipatan pada ketebalan ini masih terbatas, yang berimplikasi pada rendahnya nilai energi serap dan *Crash Load Efficiency* (CFE). *Crashbox* dengan ketebalan 3 mm menunjukkan pola deformasi yang lebih terkontrol dibandingkan ketebalan 2 mm. Lipatan yang terbentuk lebih seragam dan terjadi secara berurutan dari bagian depan menuju bagian belakang *crashbox*. Kondisi ini menunjukkan adanya keseimbangan antara kekakuan awal struktur dan kemampuan deformasi plastis, sehingga *crashbox* mampu menyerap energi secara lebih efektif dengan distribusi gaya yang lebih stabil selama tumbukan.

Pada *crashbox* dengan ketebalan 4 mm, pola deformasi yang terbentuk paling stabil dan konsisten. Lipatan plastis terbentuk secara teratur tanpa adanya indikasi deformasi lokal yang tidak diinginkan, seperti robekan material atau tekuk global. Ketebalan yang lebih besar meningkatkan kekakuan struktur sehingga mampu menahan gaya tumbukan yang lebih tinggi, namun tetap mempertahankan mekanisme deformasi progresif. Hal ini sejalan dengan nilai *Energy Absorption* (EA), *Mean Crushing Force* (MCF), dan *Crash Load Efficiency* (CFE) yang paling tinggi pada variasi ini. Secara keseluruhan, hasil pengamatan pola deformasi menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan penampang segiempat berpengaruh signifikan terhadap kestabilan deformasi *crashbox*. *Crashbox* dengan ketebalan lebih besar cenderung menghasilkan deformasi yang lebih terkendali, lipatan yang lebih seragam, serta distribusi gaya yang lebih stabil selama tumbukan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi ketebalan penampang segiempat tidak hanya memengaruhi besarnya energi yang diserap, tetapi juga menentukan kualitas dan mekanisme deformasi yang berperan penting dalam meningkatkan keselamatan struktur kendaraan.

5.0 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan pendekatan *Finite Element Analysis*, dapat disimpulkan bahwa variasi ketebalan penampang segiempat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja *crashworthiness crashbox* pada kondisi tumbukan *frontal*. Peningkatan ketebalan *crashbox* terbukti meningkatkan kemampuan penyerapan energi, efisiensi energi spesifik, serta kestabilan distribusi gaya selama proses deformasi. *Crashbox* dengan ketebalan 4 mm menunjukkan kinerja paling optimal dibandingkan variasi lainnya, ditandai dengan kemampuan menyerap energi yang lebih tinggi, respons gaya yang lebih stabil, serta pola deformasi *progressive axial folding* yang paling konsisten. Meskipun peningkatan ketebalan juga menyebabkan kenaikan gaya puncak awal, distribusi gaya selama deformasi berlangsung lebih terkendali sehingga kinerja *crashworthiness* secara keseluruhan tetap meningkat. Dengan demikian, ketebalan penampang segiempat merupakan parameter desain yang krusial dalam perancangan *crashbox*, karena berperan langsung dalam menentukan keseimbangan antara kemampuan penyerapan energi dan kestabilan deformasi struktur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan desain *crashbox* yang lebih aman dan efisien untuk aplikasi kendaraan.

6.0 REFERENSI

- [1] WHO, "Global status report on road safety 2023," World Health Organization, 2023. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>
- [2] Y. Liu, L. Ding, S. Yan, and Y. Yang, "Computer simulations and experimental study on crash box of automobile

- in low speed collision,” *ICEM 2008 Int. Conf. Exp. Mech. 2008*, vol. 7375, no. 11531288, p. 737562, 2008, doi: 10.1117/12.839365.
- [3] N. Y. Thalib, “Analisis Penyerapan Energi dan Pola Deformasi Additional Crash Box Dengan Variasi Panjang dan Diameter pada Uji Frontal Crash,” 2013. [Online]. Available: <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/141828%0Ahttp://repository.ub.ac.id/id/eprint/143624/>
- [4] N. A. Z. Abdullah, M. S. M. Sani, M. S. Salwani, and N. A. Husain, “A review on crashworthiness studies of crash box structure,” 2020. doi: 10.1016/j.tws.2020.106795.
- [5] N. Tawaf, “View of ANALISA DEFORMASI CRASH BOX DENGAN VARIASI DIAMETER MENGGUNAKAN SIMULASI SOFTWARE ANSYS 14.5.pdf,” 2019.
- [6] G. Wang, Y. Zhang, Z. Zheng, H. Chen, and J. Yu, “Crashworthiness design and impact tests of aluminum foam-filled crash boxes,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 180, no. April, p. 109937, 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.109937.
- [7] R. Fajri, H. L. Guntur, and R. Apriadi, “Analysis High Energy Absorption and Numerical Study of *Crashbox*,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 13, no. 5, 2024, [Online]. Available: <http://www.ijert.org>
- [8] G. D. Jiang, Y. H. Cai, C. Qiu, W. W. Zhang, and D. T. Zhang, “Effect of over-aging on the microstructure, mechanical properties and crashing performance of thin-walled Al-Mg-Si-Cu alloy profiles,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 21, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.137.
- [9] M. Rogala and J. Gajewski, “Crashworthiness Analysis of Thin-Walled Square Columns with a Hole Trigger,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 11, 2023, doi: 10.3390/ma16114196.
- [10] A. M. Abd-Elnaiem, A. M. Mebed, A. Gaber, and M. A. Abdel-Rahim, “Effect of the anodization parameters on the volume expansion of anodized aluminum films,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, no. 8, pp. 10515–10525, 2013, doi: 10.1016/s1452-3981(23)13127-0.
- [11] L. Agureev *et al.*, “Study of plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum composites,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 6, pp. 1–12, 2018, doi: 10.3390/met8060459.
- [12] B. A. Wicaksono, M. A. Choiron, and A. Purnowidodo, “Pengembangan Desain Circular Dan Square *Crashbox* Dengan Penambahan Honeycomb Sebagai Filler Pada Model Beban Frontal Dan Oblique,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 1, pp. 291–305, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i1.1289.
- [13] T. A. Setiawan, A. I. Juniani, D. A. Purnomo, N. Rinanto, and H. N. Faruq, “How To Utilize Autodesk Fusion 360 That Reinforces Product Redesign Simulation?,” *JISO J. Ind. Syst. Optim.*, vol. 6, no. 1, p. 48, 2023, doi: 10.51804/jiso.v6i1.48-54.
- [14] M. Ferdynus, P. Rozylo, and M. Rogala, “Energy absorption capability of thin-walled prismatic aluminum tubes with spherical indentations,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 19, pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/ma13194304.
- [15] M. A. Choiron, A. Purnowidodo, and K. Anam, *Buku Ajar Metode Elemen Hingga*. [tidak diketahui / penerbit modul], 2014. [Online]. Available: <https://pt.scribd.com/doc/261191934/Buku-Ajar-Metode-Element-Hingga-1>