

Simulasi Desain Alat Pengujian Crashworthiness dengan Metode Drop Test untuk Spesimen Berukuran 25 cm x 25 cm

Muhammad Ridwan, Marsono, Rafil Adnan Zibara, Arrabi Pasya

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,

Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung

Jl. PHH. Mustafa No.23 Bandung 40124

e-mail : rzibara29@gmail.com

Received 20 Agustus 2025 | Revised 3 Juli 2026 | Accepted 10 Juli 2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mensimulasikan desain alat uji crashworthiness dengan metode drop test untuk spesimen berukuran 25×25 cm. Crashworthiness adalah kemampuan struktur menyerap energi benturan guna meningkatkan keselamatan pada bidang otomotif dan teknik struktur. Untuk memperoleh hasil pengujian optimal, dilakukan simulasi desain guna menentukan rangka yang sesuai dan aman. Simulasi bertujuan mengetahui serta mengevaluasi kekuatan rangka melalui parameter tegangan, defleksi, dan faktor keamanan. Alat dirancang dengan komponen utama berbahan baja AISI 1045 dan dianalisis menggunakan perangkat lunak SolidWorks melalui metode FEA (Finite Element Analysis) pada uji pembebanan statik. Variasi ketinggian jatuh bola baja impaktor dibuat dari 1 m hingga 6 m dengan interval 1 m. Hasil simulasi menunjukkan seluruh komponen, yaitu rangka utama, poros penyangga pegas, danudukan spesimen, memiliki tegangan di bawah batas ijin bahan (σ_{allow}) 202,5 mpa, defleksi sangat kecil (<0,1 mm), dan faktor keamanan di atas 4. Desain dinyatakan aman, kaku, dan tidak menimbulkan kesalahan pengukuran signifikan. Perubahan parameter terhadap ketinggian jatuh menunjukkan struktur mampu menyerap energi tumbukan secara efisien melalui deformasi elastis dominan, sehingga layak digunakan untuk uji crashworthiness.

Kata kunci : Crashworthiness, drop test, simulasi desain, Finite Element Analysis (FEA), SolidWorks.

ABSTRACT

This study aims to simulate the design of a crashworthiness testing device using the drop test method for specimens measuring 25×25 cm. Crashworthiness is the ability of a structure to absorb impact energy in order to enhance safety in the automotive and structural engineering fields. To obtain optimal testing results, a design simulation was carried out to determine a frame that is suitable and safe. The simulation aims to identify and evaluate the frame's strength in terms of stress, deflection, and safety factor. The device was designed with its main components made of AISI 1045 steel and analyzed using SolidWorks software through the Finite Element Analysis (FEA) method under static loading conditions. The drop height of the steel ball impactor was varied from 1 m to 6 m in 1 m intervals. The simulation results show that all components namely the main frame, spring support shaft, and specimen holder have stress values below the material's allowable limit (σ_{allow}) of 202.5 MPa, very small deflection (<0.1 mm), and a safety factor above 4. The design is declared safe, rigid, and free from significant measurement errors. Changes in parameters with drop height indicate that the structure can efficiently absorb impact energy through dominant elastic deformation, making it suitable for crashworthiness testing.

Keywords : Crashworthiness, drop test, design simulation, Finite Element Analysis (FEA), SolidWorks.

1. Pendahuluan

Crashworthiness adalah parameter yang menggambarkan kemampuan suatu struktur untuk menyerap dan mengelola energi benturan. Kemampuan dalam menyerap energi ini merupakan aspek krusial dalam menilai faktor keamanan struktur, khususnya pada kendaraan yang dirancang berdasarkan konsep keselamatan. Tujuannya adalah untuk melindungi penumpang dan barang dengan menyerap energi kinetik saat terjadi tabrakan serta menjaga keutuhan kabin meskipun bagian luar kendaraan mengalami kerusakan. *Crashworthiness* sangat penting dalam industri otomotif, penerbangan, dan kereta api [1], [2].

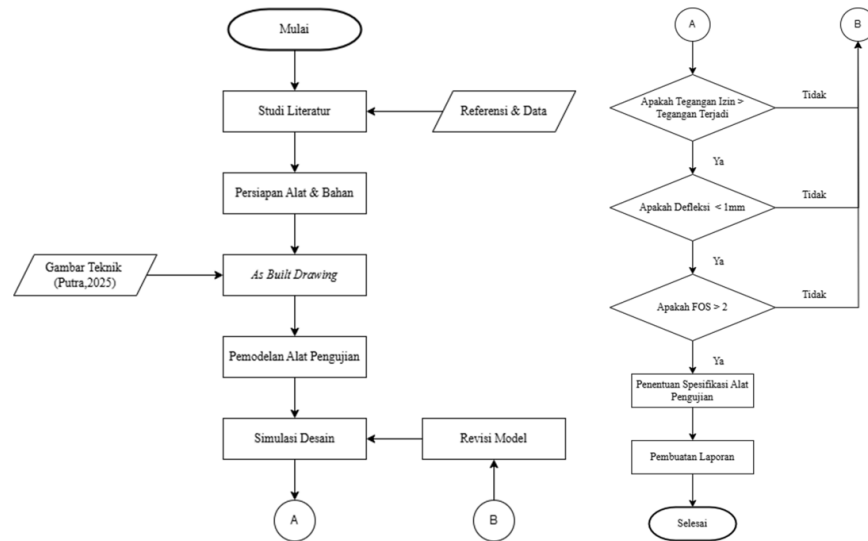
Dalam perancangan kendaraan, aspek *crashworthiness* mencakup pemilihan material yang sesuai, perancangan bentuk struktur, serta penggunaan elemen yang didesain untuk mampu mengontrol deformasi yang terjadi. Dengan cara ini, energi benturan dapat diserap sekaligus dialirkan secara efektif sehingga risiko cedera penumpang dapat ditekan seminimal mungkin. Seiring berkembangnya teknologi dan pemahaman mengenai dinamika tumbukan serta perilaku material, berbagai upaya peningkatan *crashworthiness* terus dilakukan [3], [4], [5]. Di sektor penerbangan, penerapan *crashworthiness* mendapat perhatian yang sangat serius, dimulai dari tahap desain hingga pemilihan komponen. Pesawat dirancang agar tetap mampu menjaga integritas struktural saat menghadapi pendaratan darurat atau kecelakaan. Penggunaan material yang ringan tetapi kuat serta rancangan interior yang mendukung keselamatan menjadi salah satu aspek yang menjadi perhatian serius. Seluruh aspek keselamatan disusun berdasarkan standar yang ditetapkan oleh badan regulasi dan menjadi syarat bagi pesawat untuk menjalani serangkaian pengujian dalam rangka memastikan perlindungan maksimal bagi penumpang [4], [5], [6].

Evaluasi *crashworthiness* dilakukan melalui proses analisis maupun pengujian, baik menggunakan simulasi numerik maupun metode eksperimental. Metode simulasi menawarkan keuntungan dari sisi efisiensi waktu dan biaya, namun metoda uji eksperimen tetap diperlukan untuk memperoleh data nyata mengenai respons struktur terhadap benturan [7]. Data hasil eksperimen tersebut menjadi acuan penting dalam menilai desain serta mengidentifikasi potensi risiko demi peningkatan keselamatan. Salah satu teknik pengujian yang sering digunakan adalah *drop test*, yaitu dengan menjatuhkan beban dari ketinggian tertentu ke spesimen untuk menilai ketahanan serta perilaku strukturnya. Meskipun sederhana, metoda ini cukup efektif dalam mengukur kemampuan struktur menyerap energi akibat benturan. Pelaksanaan *drop test* harus dilakukan pada kondisi terkontrol untuk menjaga akurasi dan konsistensi hasil, [8], [9], [10].

Demikian pentingnya aspek *crashworthiness* dalam rangka ikut serta menjaga keselamatan penumpang dalam kendaraan, maka dalam penelitian ini dilakukan simulasi perancangan alat uji *crashworthiness* dengan menggunakan *software* Solidworks. Alat uji yang dirancang adalah alat uji *crashworthiness* dengan metoda *drop test* dengan spesimen berukuran 25 cm x 25 cm. SolidWorks memiliki fitur *SolidWorks Simulation*, yang memungkinkan analisis berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) untuk menguji bagaimana spesimen bereaksi terhadap tumbukan dalam berbagai kondisi [10]. Dengan melalui simulasi ini dapat diperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai distribusi tegangan, defleksi material, faktor keamanan serta gaya yang bekerja selama uji benturan berlangsung [11], [12], [13]. Penelitian ini adalah kelanjutan dari penelitian sebelumnya, yaitu pembuatan dan pengujian alat uji *crashworthiness* menggunakan metode *drop test* dengan spesimen berupa pelat datar berukuran maksimal 25 × 25 cm dan tebal hingga 3 cm. Alat ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur dalam menyerap energi tumbukan dari bola baja impaktor yang dijatuhkan dari ketinggian mulai dari 1 hingga 6 meter [2].

2. Metodologi

Simulasi desain alat uji crashworthiness dilakukan dengan pendekatan yang mengkombinasikan studi literatur, perhitungan teoritis, analisis elemen hingga (FEA), dan simulasi numerik untuk memastikan alat uji yang dibuat mampu menghasilkan data yang akurat, aman dan presisi. Seluruh tahapan dan keterkaitan antar proses dalam penelitian ini disajikan secara visual dalam diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

Desain alat uji crashworthiness harus bisa memastikan bahwa struktur cukup kuat dan kaku agar tidak mengalami defleksi saat tumbukan. Struktur yang kuat dan kaku akan menjamin bahwa akurasi pengukuran tetap terjaga. Cara kerja alat ini mirip dengan alat uji impak, di mana spesimen dikenai beban tumbukan dan energi yang diserap diukur [2]. Alat Pengujian *Crashworthiness* tipe *Drop Test* diberi pengaturan dengan beberapa asumsi dan ketetapan dasar yaitu penumbuk yang digunakan berupa bola baja dengan diameter 76.2 mm dan massa sebesar 1.79 Kg dengan ketinggian jatuh impaktor adalah 6 meter. Ketinggian tersebut didapatkan dari skenario kecelakaan kendaraan pada kecepatan rendah sekitar 40 km/jam. Disesuaikan dengan persamaan kekekalan energi, dimana benda jatuh yang melibatkan energi potensial dan energi kinetik [2].

$$EP1 + EK1 = EP2 + EK2$$

$$EP1 + 0 = 0 + EK2$$

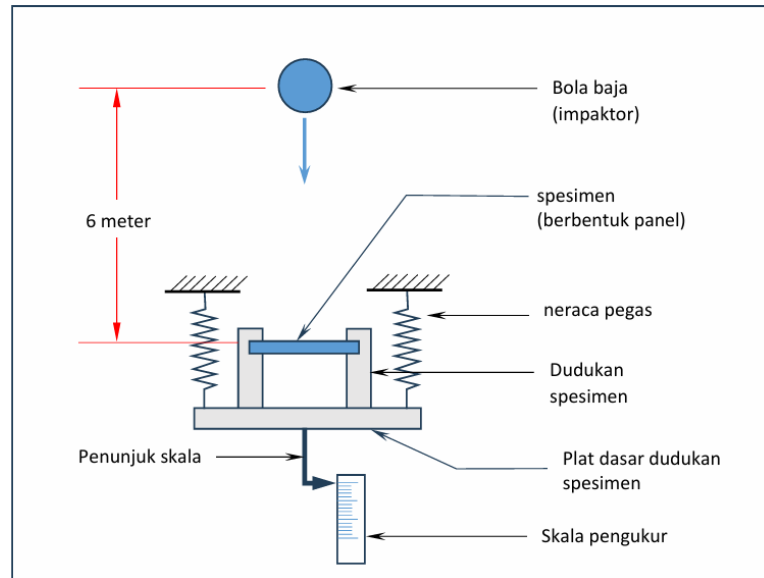
$$EP1 = EK2$$

$$mgh = \frac{1}{2} mv^2$$

$$h = (\frac{1}{2} v^2) / g$$

$$h = [\frac{1}{2} (40 \times 1000 / 3600)^2] / 9,81 = 6,29 \text{ m}$$

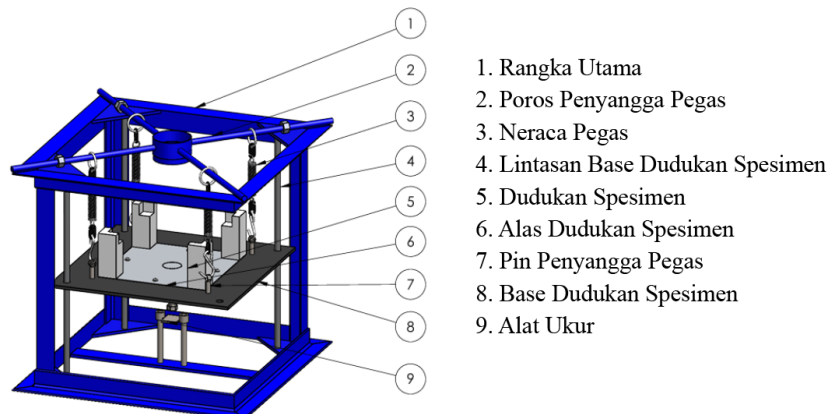
Prinsip kerja alat uji ini yaitu dengan menjatuhkan bola baja/impaktor dengan ketinggian yang sudah ditentukan. Impaktor akan menumbuk spesimen, lalu energi yang disebabkan oleh impaktor akan diserap oleh spesimen dan sebagian energinya akan didistribusikan pada komponen alat ukurnya, skema alat uji ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skematik prinsip kerja alat uji *crashworthiness* dengan metoda *drop test* [2]

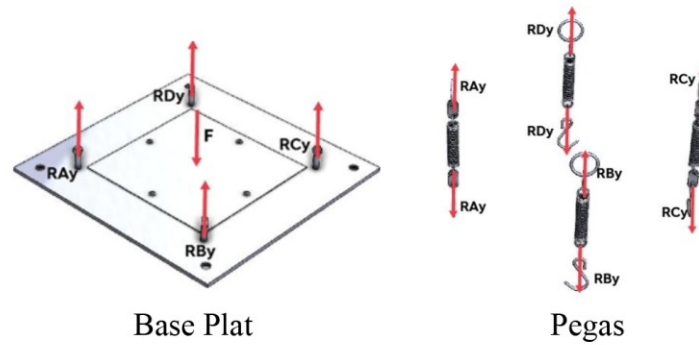
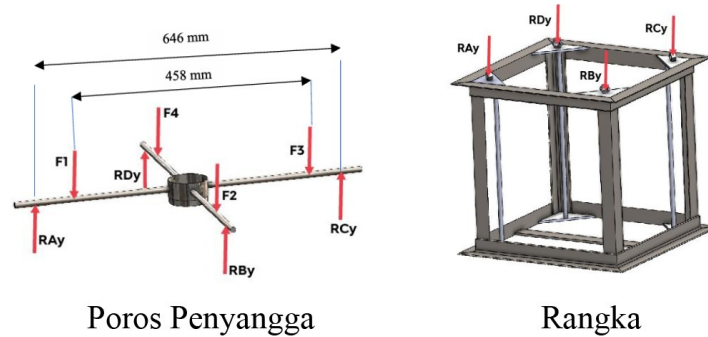
Energi yang disebabkan oleh impaktor akan diserap oleh spesimen, namun tidak 100% terserap oleh spesimen. Dimana sisa atau sebagian energi tersebut akan didistribusikan ke dudukan spesimen lalu ke plat dasar sehingga terdorong ke bawah namun tetap di tahan oleh 4 pegas di masing-masing sudutnya. Karena hal tersebut plat dasar akan memberikan sinyal kepada sensor dengan menembuknya, yang menunjukkan besaran simpangan yang terjadi.

Desain 3D dan 2D yang dibuat merupakan desain yang sesuai dengan gambar teknik as built drawing. Dimana gambar sesuai dengan kondisi aktual di lapangan dengan gambar teknik penelitian sebelumnya sebagai referensi, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Konsep Desain Alat Pengujian *Crashworthiness* Metode *Drop Test*

Adapun pendistribusian gaya yang diterima komponen uji ketika bola baja menumbuk permukaan plat yang di visualisasikan dengan DBB yang terlihat pada Gambar 4 dan 5.

**Gambar 4.** DBB Base Plat dan Pegas**Gambar 5.** DBB Poros Penyangga dan Rangka

Simulasi dilakukan pada tiga komponen utama alat pengujian *crashworthiness* yaitu base dudukan spesimen, rangka, dan poros penyangga pegas. Metode FEA digunakan untuk mengetahui tegangan maksimum, defleksi, dan faktor keamanan. Analisis menggunakan Solidworks *Simulation* dengan menggunakan material AISI 1045 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Material AISI 1045 [14]

<i>Property</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Elastic Modulus</i>	205,000	N/mm ²
<i>Poisson's Ratio</i>	0.29	N/A
<i>Shear Modulus</i>	80,000	N/mm ²
<i>Mass Density</i>	7,850	Kg/m ³
<i>Tensile Strength</i>	625	N/mm ²
<i>Yield Strength</i>	530	N/mm ²
<i>Thermal Expansion Coefficient</i>	0.0000115	/K
<i>Thermal Conductivity</i>	49.8	W/(m.k)
<i>Specific Heat</i>	486	J/(Kg.k)

Beban untuk simulasi diperoleh dari hasil pengujian sebelumnya pada alat uji *crashworthiness* oleh Putra (2025) . Beban tersebut merupakan gaya dampak yang terjadi saat bola baja menyentuh plat dasar, dengan variasi ketinggian jatuh sebesar 1, 2, 3, 4, 5, dan 6 meter. Nilai-nilai tersebut

dijadikan dasar dalam pengaturan beban untuk keperluan simulasi. Adapun nilai-nilai tersebut tercantum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran alat uji *crashworthiness* pada neraca pegas [2]

Skala Pengukuran (mm)						
Ketinggian (m)	P-1 (kg)	P-2 (kg)	P-3 (kg)	P-4 (kg)	Rata-rata (kg)	Energi Potensial Teoritik (Joule)
1	5	4	4	5	4,5	17,56
2	7	8	7	7	7,25	35,12
3	11	10	11	10	10,5	52,68
4	13	13	14	13	13,25	70,24
5	15	15	14	14	14,5	87,8
6	16	16	15	15	15,5	105,36

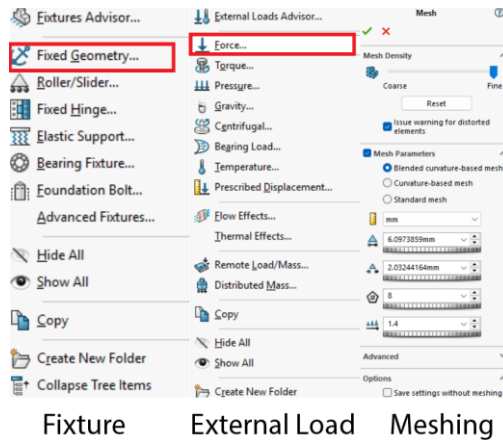
Besaran beban yang terjadi pada setiap komponen berbeda dikarenakan ada beban komponen yang menahan atau ikut menempel pada komponen tersebut. Berikut pengaturan beban yang digunakan untuk kebutuhan simulasi dengan ketinggian 6 meter yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Total Beban yang terjadi pada setiap komponen utama

Komponen	Ketinggian (m)	Beban Internal (Kg)	Beban Tumbukan (Kg)	Total Beban (N)
Base Dudukan Spesimen	6	0	15,5	152,06
Poros Penyangga Pegas	6	18,68	15,5	335,31
Rangka Utama	6	21,26	15,5	360,62

Base dudukan spesimen merupakan komponen yang bertumbukan langsung dengan bola baja dengan total beban sebesar 152,06 N. Poros penyangga pegas menahan massa dari komponen seperti base dudukan spesimen, alas dudukan spesimen, pegas, dudukan spesimen, dan pin penyangga pegas serta ditambah dengan beban tumbukan menghasilkan total beban sebesar 335,31 N. Rangka utama merupakan penopang dari semua komponen tersebut serta beban tumbukan yang menghasilkan total beban sebesar 360,62 N.

Adapun parameter – parameter yang digunakan untuk simulasi desain seperti Boundary Condition yang ditentukan sesuai dengan DBB, External load yang digunakan adalah Force dan mesh quality yang digunakan fine serta mesh parameter yang digunakan adalah blended curvature-based mesh yang dapat dilihat pada Gambar 6 [15].



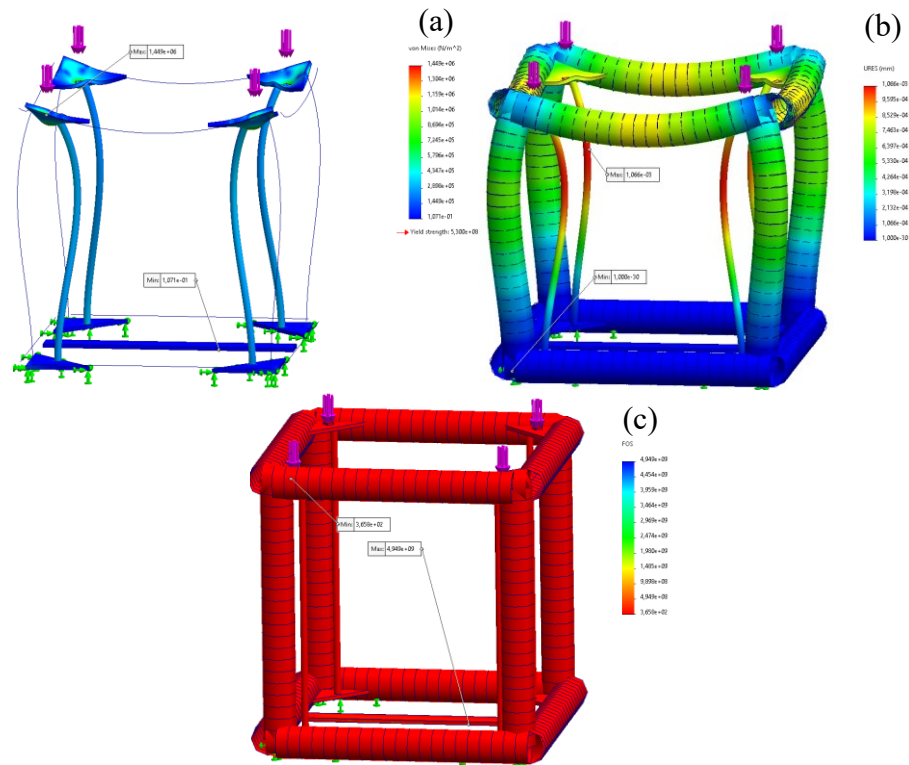
Gambar 6. Parameter Simulasi Desain [14]

3. Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan *as built drawing* pada alat pengujian *crashworthiness* yang sudah ada dimana Sebagian besar rangka tersebut menggunakan standar JIS dengan tipe l-e yang berukuran L Angle 50 x 50 x 4 mm [15]. Simulasi menggunakan solidworks meliputi pembebanan statik yang bertujuan untuk mencari tegangan, deformasi dan faktor keamanan pada desain alat pengujian *crashworthiness* tipe *drop test*.

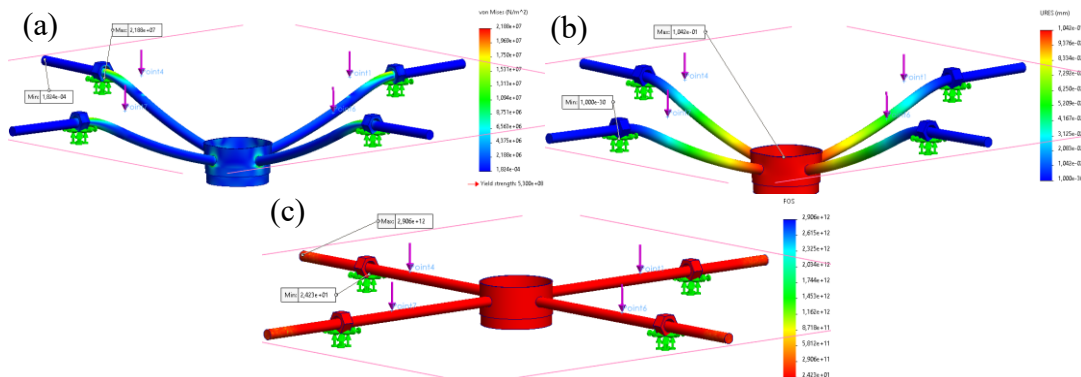
Pembebanan yang dilakukan pada titik dimana bola baja menumbuk dan pendistribusian beban yang terjadi pada setiap komponen yang menumpu alat tersebut. Material yang digunakan untuk simulasi sebagian besar adalah AISI 1045. Berikut adalah hasil simulasi pada solidworks yang menunjukkan besaran tegangan, defleksi dan faktor keamanan dengan ketinggian 6 meter.

Hasil simulasi pada rangka utama alat pengujian *crashworthiness* dengan ketinggian 6 meter diperoleh tegangan sebesar 1.449 mpa, Defleksi sebesar 0.001066 mm dan FOS sebesar 366 yang dapat dilihat pada Gambar 7.



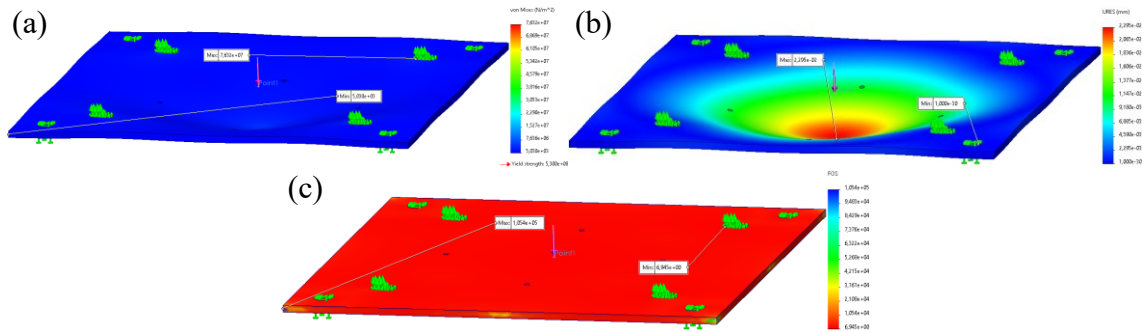
Gambar 7. Hasil Simulasi pada Rangka Utama : (a) Tegangan ; (b) Defleksi ; (c) Faktor Keamanan

Hasil simulasi pada poros penyangga pegas alat pengujian crashworthiness dengan ketinggian 6 meter diperoleh tegangan sebesar 21.88 mpa, Defleksi sebesar 0.1042 mm dan FOS sebesar 24 yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil Simulasi pada Poros Penyangga Pegas : (a) Tegangan ; (b) Defleksi ; (c) Faktor Keamanan

Hasil simulasi pada base dudukan spesimen alat pengujian crashworthiness dengan ketinggian 6 meter diperoleh tegangan sebesar 76.32 mpa, Defleksi sebesar 0.02295 mm dan FOS sebesar 7 yang dapat dilihat pada Gambar 9.

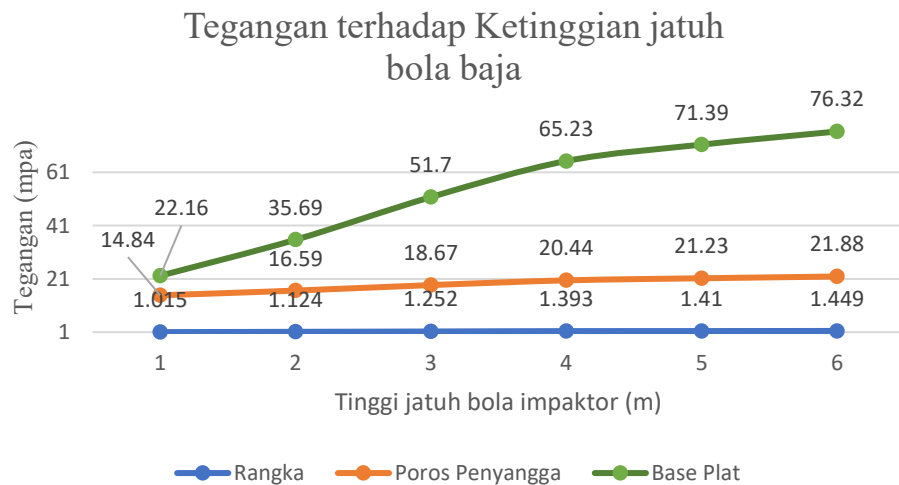


Gambar 9. Hasil Simulasi pada *Base* dudukan spesimen : (a) Tegangan ; (b) Defleksi ; (c) Faktor Keamanan

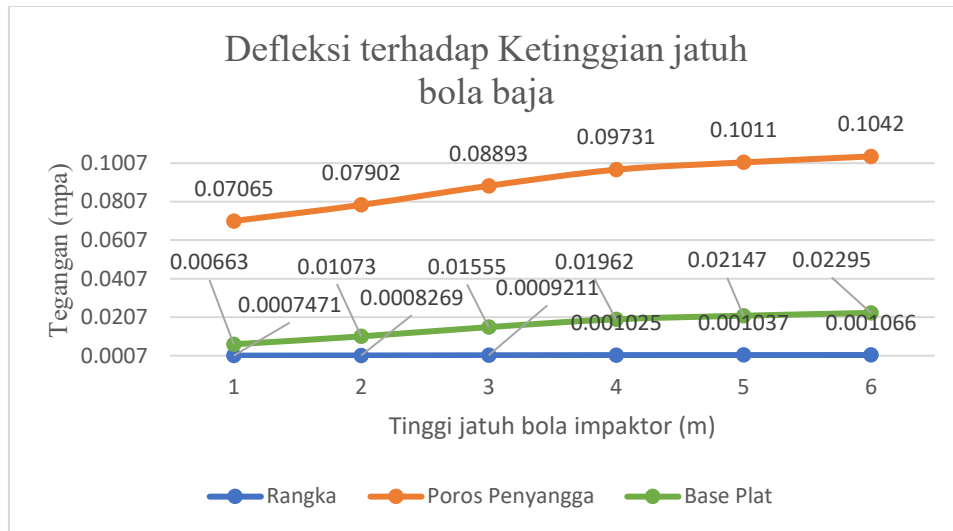
Berdasarkan simulasi solidworks pada komponen rangka, *base* dudukan spesimen dan poros penyangga pegas yang menghasilkan besaran tegangan, defleksi dan faktor keamanan. Dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi komponen utama pada ketinggian 6 m

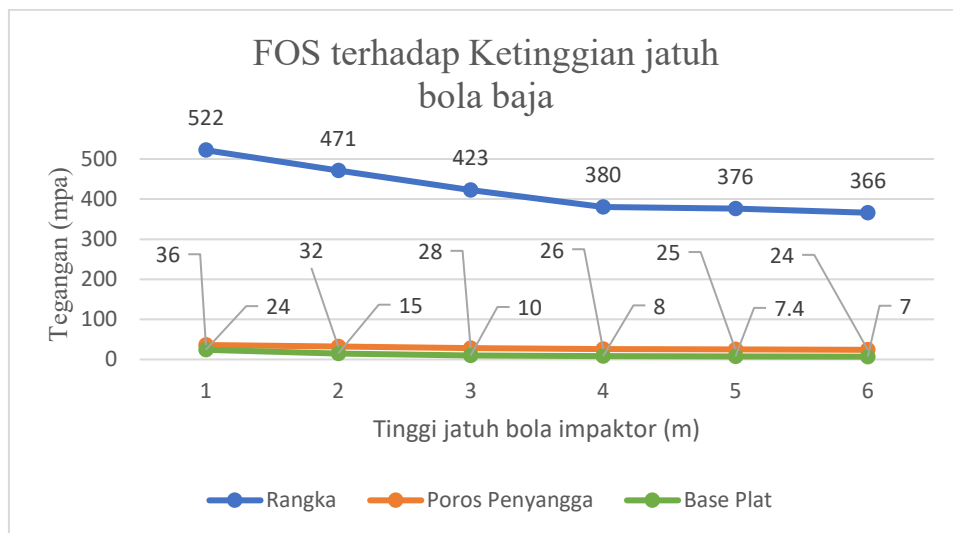
Komponen	Ketinggian (m)	Tegangan (mpa)	Defleksi (mm)	Min FOS
Base dudukan spesimen	6	76,32	0,02295	7
Poros penyangga pegas	6	21,88	0,1042	24
Rangka utama	6	1,449	0,001066	366



Gambar 10. Grafik Tegangan pada Rangka, Poros Penyangga dan Base Plat



Gambar 11. Grafik Defleksi pada Rangka, Poros Penyangga dan Base Plat



Gambar 12. Grafik Faktor Keamanan pada Rangka, Poros Penyangga dan Base Plat

Grafik ini berisikan hasil dari komponen-komponen alat pengujian crashworthiness yang telah di simulasikan. Dari hasil simulasi akan dibandingkan 3 komponen pengujian antara stress, displacement dan fos terhadap ketinggian jatuh bola baja. Garis penghubung pada grafik tidak mewakili nilai aktual antara titik-titik ketinggian karena simulasi hanya dilakukan pada interval 1 m. Hubungan antar titik digambarkan hanya sebagai indikasi kecenderungan umum, bukan representasi eksak untuk nilai di antaranya. Grafik perbandingan tegangan, defleksi dan FOS terhadap tinggi jatuh bola impaktor yang dapat dilihat pada Gambar 10, 11 dan 12.

Simulasi desain alat pengujian *crashworthiness* tipe *drop test* yang telah dilakukan, dengan desain yang dibuat menyesuaikan pada kondisi aktual di lapangan atau bisa disebut “*as built drawing*” menunjukan hasil yang baik. Dimana hasil yang ditunjukan pada simulasi sudah sesuai dengan kriteria yang diinginkan seperti tegangan yang terjadi dibawah tegangan ijin, defleksi kurang dari 1mm dan faktor keamanan tidak kurang dari 2.

Tiga komponen utama alat uji *crashworthiness* rangka utama, poros penyangga pegas, dan base dudukan spesimen menunjukkan performa struktural yang sangat baik, di mana rangka utama memiliki tegangan maksimum 1,45 MPa dengan faktor keamanan 366 dan defleksi 0,00106 mm; poros penyangga pegas mengalami tegangan maksimum 21,88 MPa dengan faktor keamanan 24 dan defleksi 0,1 mm; serta *base* dudukan spesimen mencatat tegangan maksimum 76,32 MPa dengan faktor keamanan 7 dan defleksi 0,023 mm, yang semuanya menghasilkan lendutan jauh di bawah batas toleransi skala ukur terkecil sebesar 1 mm.

Maka dari itu, seluruh komponen utama pada alat uji, yaitu rangka utama, poros penyangga pegas, dan base dudukan spesimen, menunjukkan kinerja yang sangat baik terhadap beban tumbukan. Sehingga tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap ketelitian pengukuran, mengingat skala ukur alat uji memiliki ketelitian 1 mm. Dengan demikian, struktur dapat dikatakan aman, kaku, dan tidak menimbulkan kesalahan pengukuran yang berarti.

Berdasarkan grafik tegangan, defleksi, dan faktor keamanan terhadap tinggi jatuh bola impaktor, terlihat bahwa peningkatan tinggi menghasilkan perubahan parameter struktural yang tidak bersifat linier. Tegangan dan defleksi menunjukkan kenaikan yang melandai, sementara faktor keamanan menurun melandai namun tetap berada di atas batas minimum. Sejak awal, tegangan dan defleksi memang sudah tersebar ke beberapa bagian struktur. Peningkatan tinggi jatuh impaktor menyebabkan perubahan pola distribusi tersebut [16]. Hal ini terjadi karena struktur secara alami melakukan pendistribusian beban kembali, di mana bagian-bagian yang sebelumnya tidak menerima gaya secara signifikan mulai ikut menahan beban tambahan. Proses ini membuat penyebaran tegangan menjadi lebih merata seiring meningkatnya energi tumbukan. Fenomena ini sesuai dengan prinsip kerja material elastis, di mana sistem struktur akan mengaktifkan lebih banyak area untuk berbagi beban guna mencegah terjadinya konsentrasi tegangan berlebih [17].

Dengan demikian, struktur tetap dapat merespon tumbukan secara efisien, tanpa mengalami kenaikan tegangan atau defleksi yang tajam. Hal ini memperkuat kesimpulan bahwa rangka utama, poros penyangga pegas dan *base* dudukan spesimen masih berada dalam batas aman untuk rentang energi tumbukan yang diuji.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian simulasi desain alat pengujian *crashworthiness* dengan metode drop test, dapat disimpulkan bahwa alat berhasil dirancang dan dimodelkan secara menyeluruh menggunakan perangkat lunak SolidWorks dengan pendekatan Finite Element Analysis (FEA) terdiri dari tiga komponen utama rangka utama, base dudukan spesimen, dan poros penyangga pegas yang seluruhnya menggunakan material baja AISI 1045.

Bola baja impaktor dengan massa 1,79 kg dan diameter 76,2 mm dijatuhkan dari ketinggian hingga 6 meter, merepresentasikan kondisi tumbukan setara kecepatan 40 km/jam. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh komponen utama mengalami tegangan maksimum yang masih berada di bawah tegangan ijin material (202,5 MPa), dengan defleksi sangat kecil ($< 0,1$ mm) dan faktor keamanan (FOS) konsisten di atas 7.

Tegangan maksimum dan defleksi maksimum ditemukan pada lokasi yang berbeda, di mana tegangan terkonsentrasi pada titik yang langsung menerima gaya, sementara defleksi terjadi pada bagian struktur yang paling lentur, menunjukkan karakteristik distribusi gaya dan respons struktur secara wajar. Secara keseluruhan, desain alat pengujian *crashworthiness* ini dinyatakan aman, kaku, dan layak digunakan karena mampu menyerap energi tumbukan secara efisien melalui mekanisme deformasi elastis yang dominan.

5. Daftar Pustaka

- [1] Abramowicz, W. (2019). Crashworthiness of structures under impact and impulsive loading. *International Journal of Impact Engineering*, 127, 103 - 115.
- [2] Putra, F. P. (2025). Rancang Bangun Alat Pengujian Crashworthiness dengan Metode Drop Test untuk Spesimen Berukuran 25 cm x 25 cm. *Jurnal Rekayasa Energi dan Mekanika*. ITENAS : Bandung, 51.
- [3] Chukwuemeke William Isaac, Chidozie Ezekwem, 2021, A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability, *Composite Structures*, Volume 257, 2021, 113081, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113081>.
- [4] S.M. Sapuan, N. Sudin, and M. A. Maleque, 2002, Critical Review of Polymer-based Composite Automotive Bumper Systems. *Polymer & Polymer Composite*. Volume 10, no. 8, pp 627–636.
- [5] Farooq, U. , (2022). Advances in Crashworthiness of Composite Structures. *Journal of Composite Materials*, 56(15), 56, 2193-2221.
- [6] Blanchard, S., & Martin P. (2018). Design and Simulation of Crashworthy Components in Composite Aircraft Structures. *Aerospace Science and Technology*, 76, 36 44.
- [7] Zhao, Y., & Li, W. (2020). Evaluation of Crashworthiness of Automotive Structures Using Finite Element Analysis. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 12(3), 145-152.
- [8] Mahyunis, N. S. (2022, 08 15). Design and manufacture of Free Fall Impact Test Equipment with Drop Weight Test model. *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, Vol. 1, No. 1, 2022, 9.
- [9] Kim, S., Lee, J., & Park, H. (2019). Experimental and Numerical Analysis of Drop Test for Structural Energy Absorption. *Engineering Failure Analysis*, 22(2), 234-245.
- [10] Logan, D. L. (2016). *A First Course in the Finite Element Method*, 6E. Cengage Learning, 2016.
- [11] Davi, D., & Pappas, N. (2021). Optimization of Drop Test Procedures for automotive crashworthiness using FEA. *Mechanics & Materials*, 155, 103744.
- [12] Mamalis, A. G. (2018). Crashworthiness of Composite Structures: A Review of Experimental and Numerical Investigations. *Composite Structures*, 202, 1-15.
- [13] Rasyad, M. L. (2023). PENGUJIAN CRASHWORTHINESS HONEYCOMB. *ITENAS : Bandung*.
- [14] SolidWorks. (2025, march 12). *SolidWorks*. Retrieved from [www.solidworks.com: http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/motion-analysis.htm](http://www.solidworks.com:www.solidworks.com/sw/products/simulation/motion-analysis.htm)

- [15] RS Khurmi, J. G. (2005). *A Textbook of Machine Design* (1st ed.). New Delhi, India: S. Chand.
- [16] Wang, T., & Chen, L. (2017). Structural Behavior and Crashworthiness Evaluation of Metal Plates under Impact Loading. *Materials & Design*, 118, 117-125.
- [17] Ir. Sularso, M. &. (1980). *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin* (1st ed.). Jakarta: PT. Pradnya Paramita.