

Rancang Bangun Alat Uji *Crashworthiness* dengan Metode *Drop Test* untuk Spesimen Berukuran 25 cm x 25 cm

Muhammad Ridwan, Marsono, Fajar Pratama Putra dan Nur Muhammad Ramdhan

Program Studi Teknik Mesin , Institut Teknologi Nasional Bandung

Jl. PHH. Mustafa No.23 Bandung 40124

e-mail : marsono@itenas.ac.id

Received 21 Februari 2025 | Revised 14 Mei 2025 | Accepted 1 Juni 2025

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun alat pengujian crashworthiness menggunakan metode drop test. Crashworthiness adalah kemampuan suatu struktur untuk menyerap energi tumbukan guna mengurangi dampak kecelakaan terhadap penumpang atau barang dalam suatu kecelakaan kendaraan. Pengujian crashworthiness dengan metoda drop test dilakukan dengan menjatuhkan beban dari ketinggian tertentu untuk mengukur daya serap energi spesimen. Pada penelitian ini dirancang dan dibuat alat uji crashworthiness dengan spesifikasi spesimen yang berbentuk pelat atau panel berbentuk bujursangkar berukuran maksimal 25 cm × 25 cm dengan ketebalan sampai 3 cm. Alat uji crashworthiness ini diuji kinerjanya dengan melakukan pengujian langsung dengan menjatuhkan bola baja impactor kepada alat uji dengan variasi ketinggian jatuh bola baja impactor sampai masimal 6 meter dengan interval ketinggian 1 m. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa alat uji crashworthiness yang dibuat dari bahan AISI 1045 ini kuat menahan beban yang terjadi, dimana tegangan yang terjadi pada pelat dasar dudukan spesimen, yaitu 10,58 Mpa, dan tegangan pada batang penyangga neraca pegas, yaitu 38,49 masih berada di bawah tegangan ijin bahan (202,5 Mpa). Factor of Safety untuk pelat dasar dudukan spesimen sebesar 19,14 dan untuk batang penyangga neraca pegas sebesar 5,26. Kekakuan struktur alat uji crashworthiness masih belum cukup memadai, dimana defleksi total dari struktur alat uji crashworthiness adalah sebesar 1,7274 mm.

Kata kunci: *crashworthiness, alat uji crashworthiness, drop test.*

ABSTRACT

This study aims to design and build a crashworthiness test bench using the drop test method. Crashworthiness is the ability of a material structure to absorb impact energy to reduce the effect of an accident on passengers or goods in a vehicle accident. Crashworthiness testing with the drop test method is carried out by dropping the impactor from a certain height to measure the energy absorption capacity of the specimen. In this study, a crashworthiness test bench was designed and manufactured with specimen specifications in the form of square plates or panels with a maximum dimension of 25 cm × 25 cm with a thickness of up to 3 cm. The performance of this crashworthiness test bench is tested by directly dropping the impactor steel ball onto the specimen holder with variations in the height of the impactor steel ball up to a maximum of 6 meters with a height interval of 1 m. From the research that has been done, it was found that the crashworthiness test bench made of AISI 1045 is strong enough to withstand the load that occurs, where the stress that occurs on the specimen support base plate of 10.58 MPa, and the stress on the spring balance support rod of 38.49 is still below the allowable stress of the material of 202.5 MPa. The Factor of Safety for the specimen support base plate is 19.14 and for the spring balance support rod is 5.26. The structural stiffness of the crashworthiness test bench is still not adequate, where the total deflection of the crashworthiness test bench structure is 1.7274 mm.

Keywords: *Crashworthiness, crashworthiness test bench, drop test.*

1. Pendahuluan

Crashworthiness adalah satu parameter yang menggambarkan kemampuan suatu struktur untuk menyerap dan mengelola energi yang dihasilkan saat terjadi benturan atau kecelakaan. *Crashworthiness* adalah parameter kunci yang harus dipertimbangkan saat menilai faktor keamanan suatu struktur [1]. Parameter ini menjadi sangat penting dalam perancangan struktur kendaraan yang dirancang dengan dasar konsep keamanan (*safety*). Konsep dasar keamanan inilah yang akan menjamin keselamatan penumpang dan barang yang ada di dalam kendaraan, termasuk dalam industri otomotif, penerbangan, dan kereta api. Secara keseluruhan, struktur badan kendaraan harus mampu menyerap sebagian energi kinetik. Kendaraan bisa saja remuk saat terjadi benturan namun badan kendaraan tersebut harus mampu menjaga keutuhan kabin penumpang dan sekaligus mengendalikan dampak tabrakan [2].

Dalam proses desain kendaraan, *crashworthiness* mencakup berbagai elemen, mulai dari pemilihan material yang tepat hingga bentuk dan struktur kendaraan itu sendiri. Para desainer harus mempertimbangkan cara struktur dapat menahan gaya yang sangat besar saat kecelakaan terjadi, serta bagaimana energi dapat diserap dan didistribusikan dengan efektif. Ini sering melibatkan penggunaan elemen struktural yang dirancang untuk deformasi terkontrol, sehingga dapat menyerap energi dan mengurangi dampak pada penumpang [3]. [4], [5]. Upaya untuk meningkatkan *crashworthiness* terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi dan pemahaman yang lebih baik tentang dinamika benturan serta perilaku material [4],[5]. Secara keseluruhan, *crashworthiness* bukan hanya tambahan dalam desain, tetapi merupakan elemen fundamental yang berkontribusi pada keselamatan dan perlindungan penumpang dalam berbagai moda transportasi.

Dalam dunia penerbangan, sifat *crashworthiness* sangat diperhatikan dalam perancangan sampai kepada komponen-komponennya. Pesawat harus dirancang agar tetap memiliki integritas struktural dalam situasi darurat, seperti saat mengalami pendaratan keras atau kecelakaan. Ini mencakup penggunaan material yang kuat namun ringan, serta desain interior yang mengurangi risiko cedera bagi penumpang. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa pesawat telah memenuhi standar keselamatan yang ditetapkan oleh badan regulasi pemerintah dan organisasi keselamatan. Standar keselamatan ini yang mewajibkan pesawat untuk menjalani serangkaian tes guna memastikan perlindungan yang memadai bagi penumpang [6].

Sifat *crashworthiness* dapat diketahui dengan melibatkan pengujian dan analisis yang menyeluruh, termasuk simulasi tabrakan dan uji coba di lapangan [7], [8]. Penggunaan metoda simulasi numerik untuk mengetahui sifat *crashworthiness* memiliki kelebihan dalam hal penghematan waktu dan biaya. Namun demikian, walaupun memerlukan biaya yang tidak sedikit, pengujian experimental masih tetap diperlukan untuk bisa melihat dampak nyata akibat dari tumbukan yang terjadi [9], [10], [11]. Hasil dari pengujian experimental dapat dijadikan dasar untuk melakukan evaluasi menyeluruh terhadap keselamatan kendaraan serta tingkat perlindungan yang diberikan kepada penumpang. Melalui pengujian experimental dapat juga dilakukan analisis secara mendetail bagaimana kendaraan berperilaku dalam situasi kecelakaan nyata, sehingga memungkinkan pengukuran yang akurat mengenai efektivitas desain. Dengan demikian pengujian experimental berperan penting dalam mengidentifikasi potensi risiko dan area yang perlu diperbaiki untuk meningkatkan keselamatan secara keseluruhan.

Secara prinsip, sifat *crashworthiness* dapat diartikan sebagai kemampuan material dalam menyerap energi saat terkena benturan atau gaya tumbuk. Dan tentunya karakteristik ini dapat diketahui dengan cara memberikan beban impact atau beban kejut terhadap material tersebut dan kemudian dilihat respon dari material tersebut terhadap beban impact yang diberikan.

Salah satu metoda pengujian *crashworthiness* yang umum digunakan adalah Metode *drop test* karena instalasinya yang sederhana. Metode ini dilakukan dengan cara menjatuhkan beban dari ketinggian tertentu ke permukaan sebuah obyek struktur untuk kemudian diamati respons dan daya tahan struktur tersebut terhadap tumbukan yang terjadi. Metode *drop test* seringkali digunakan karena dengan metoda ini sangat dimungkinkan untuk melakukan penilaian langsung terhadap kemampuan struktur dalam menghadapi dampak yang tiba-tiba, sehingga dapat memberikan informasi penting mengenai kekuatan dan integritasnya saat terpapar beban ekstrem. Pengujian ini sangat membantu dalam memahami bagaimana struktur akan berperilaku dalam situasi nyata, seperti kecelakaan atau kondisi darurat [12]. Walaupun instalasi *drop test* ini cukup sederhana, namun setiap komponen dari alat uji *drop test* ini menjadi bagian yang penting dari eksperimen tersebut, yaitu diperlukan lingkungan yang terkendali. Instalasi uji *drop test* sangat penting untuk dikondisikan dengan baik dengan tujuan untuk mendapatkan akurasi pengukuran, ketepatan pengulangan, dan tentunya keamanannya [13].

Sifat *crashworthiness* sangat penting untuk diketahui agar dapat dijadikan sebagai dasar untuk membangun struktur kendaraan. Dan untuk mengetahui sifat *crashworthiness* ini diperlukan alat uji yang handal dan akurat. Pada penelitian ini dirancang dan dibuat alat uji *crashworthiness* dengan metode *drop test* dengan spesifikasi specimen yang berbentuk pelat atau panel berbentuk bujursangkar berukuran maksimal 25 cm × 25 cm dengan ketebalan sampai 3 cm. Alat uji ini dirancang untuk dapat digunakan dalam evaluasi kinerja struktur dalam menyerap energi tumbukan dengan berbagai ketinggian jatuh bola baja impaktor. Untuk memastikan alat uji *crashworthiness* ini berjalan optimal, dilakukan pengujian kinerja alat dengan variasi ketinggian jatuh bola baja impaktor sampai maksimal 6 meter dengan interval ketinggian 1 m.

2. Metodologi

Alat uji *drop test* ini dirancang dan dibuat agar dapat digunakan untuk mengetahui sifat *crashworthiness* dari specimen yang berbentuk pelat atau panel berukuran 25 cm x 25 cm dengan ketebalan bervariasi dari 5 mm sampai dengan 3 mm. Alat uji ini harus dirancang dengan benar untuk mendapatkan struktur yang kuat dan kaku sehingga tidak mengalami defleksi pada saat pengukuran (pada saat tumbukan) serta menjamin akurasi pengukuran.

Alat uji *crashworthiness* ini berkerja dengan cara yang mirip dengan alat uji impak, dimana specimen yang diuji akan diberi beban impak, kemudian diukur energi yang diserap oleh specimen tersebut saat terkena tumbukan. Perbedaan alat ukur *crashworthiness* dengan metoda *drop test* ini dengan alat uji impak adalah asal energi tumbukannya. Pada alat uji impak, energi tumbukan berasal dari ayunan bandul, sedangkan pada alat uji *drop test*, energi tumbukan berasal dari impaktor yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu.

Alat uji *crashworthiness* dirancang dengan beberapa asumsi dan ketetapan dasar, yaitu impaktor yang digunakan adalah bola baja dengan diameter 76,2 mm dan massa sebesar 1,79 kg. tinggi jatuh bola impaktor adalah 6 mm. Ketinggian 6 m ini didapatkan dari pedekatan kecepatan kendaraan rendah sekitar 40 km/jam. Dengan persamaan kekekalan energi pada kasus benda jatuh yang melibatkan energi potensial dan energi kinetik, ditemukan bahwa kecepatan 40 km/jam dapat dicapai dengan menjatuhkan benda dari ketinggian sekitar 6 mm.

$$EP_1 + EK_1 = EP_2 + EK_2$$

$$EP_1 + 0 = 0 + EK_2$$

$$EP_1 = EK_2$$

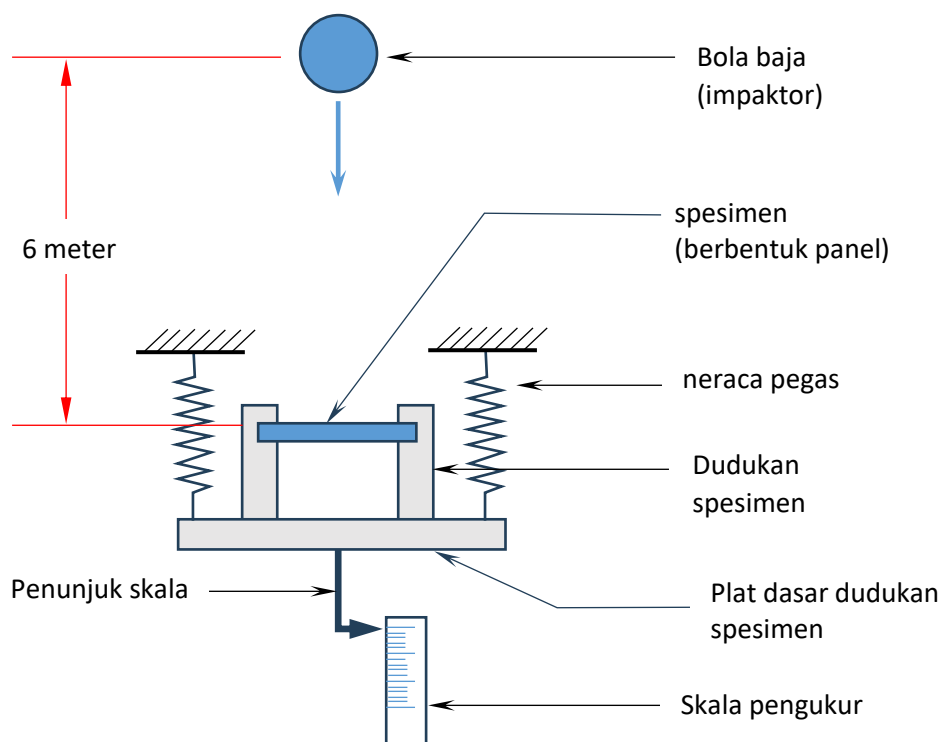
$$mgh = \frac{1}{2} mv^2$$

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

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

$$h = [\frac{1}{2} (11,111)^2] / 9,81 = 6,29 \text{ m}$$

Secara skematik, alat uji drop test yang dibuat dalam penelitian ini terlihat dalam gambar 1. Alat uji ini dioperasikan dengan cara menjatuhkan bola baja impaktor dari ketinggian 6 meter dan diarahkan tepat di tengah-tengah spesimen yang berbentuk pelat atau panel. Energi tumbukan yang diberikan oleh impaktor, sebahagiannya akan diserap oleh specimen dan sebahagian lagi akan diteruskan ke struktur alat ukur.



Gambar 1. Skematik prinsip kerja alat uji crashworthiness dengan metoda drop test

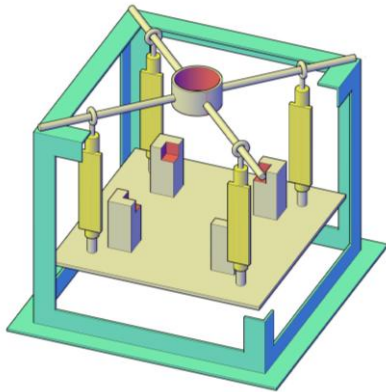
Energi tumbukan yang diteruskan ke alat ukur akan menyebabkan plat dasar dudukan specimen terdorong ke arah bawah namun tetap ditahan oleh neraca pegas. Simpangan atau pergeseran pelat dasar dudukan spesimen yang terjadi juga akan menggeser penunjuk skala dan menunjukkan pergeseran (perubahan) angka pada skala pengukur. Bersamaan dengan itu, pergeseran pelat dasar dudukan specimen juga akan menarik 4 buah neraca pegas penahan pelat dasar dudukan specimen. Dengan demikian neraca pegas akan menunjukkan besar gaya tarik yang bekerja pada masing-masing pegas tersebut.

Besarnya pergeseran penunjuk skala dan besarnya gaya tarik yang dialami oleh neraca pegas bukanlah energi yang diserap oleh specimen, namun itu adalah energi yang diteruskan dan terukur pada alat ukur. Energi yang diserap oleh specimen adalah selisih dari energi potensial yang dibawa oleh bola baja impaktor dikurangi dengan energi yang terukur pada alat uji *crashworthiness*.

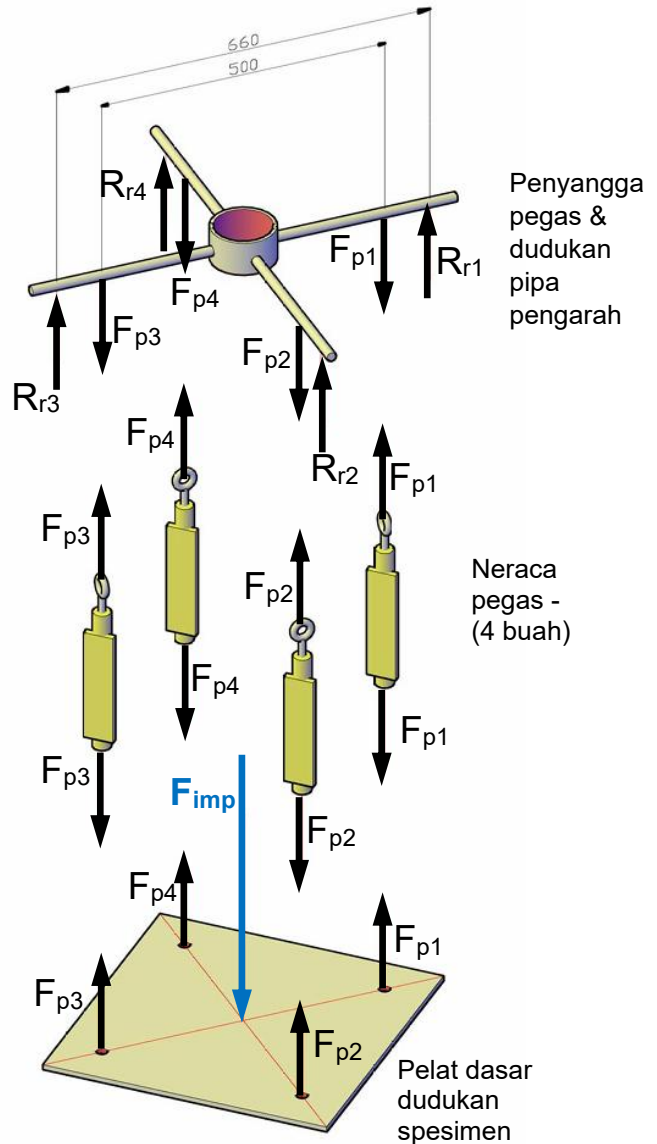
Alat uji *crashworthiness* dalam pengujian ini memang dirancang untuk dapat digunakan dengan dua pendekatan, yaitu pendekatan teoritik dengan persamaan energi potensial benda jatuh serta pendekatan experimental dengan cara mengukur gaya tumbukan secara langsung dengan menggunakan neraca pegas.

Perancangan alat uji crashworthiness metoda drop test diawali dengan penentuan besar gaya tumbuk yang dihasilkan dari bola baja impaktor. Gaya tumbuk yang dijadikan untuk dasar perancangan diperoleh dengan cara menguji atau mengukur langsung gaya tumbukan dari bola baja impaktor yang dijatuhkan langsung kepada timbangan dari ketinggian 6 meter. Dari 5 kali pengujian, diperoleh rata-rata besar gaya tumbukan dari bola baja impaktor adalah sebesar 65 kg (637,65 N).

Tahap selanjutnya adalah pembuatan konsep desain alat uji, dimana pada rancangan ini sudah ditentukan komponen-komponen alat uji *crashworthiness* dan sudah dapat dilihat mekanisme kerja dari alat uji tersebut. Konsep desain alat uji *crashworthiness* terlihat pada gambar 2.



Gambar 2. Kosep desain alat uji crashworthiness dengan metoda drop test

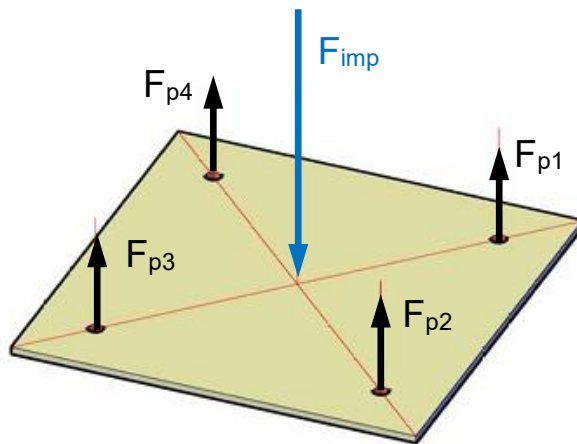


Gambar 3. Gambar urai dari alat uji *crashworthiness* dan DBB dari masing-masing komponen inti.

Berdasarkan konsep desain yang sudah dibuat, selanjutnya dibuat diagram benda bebas dari masing-masing komponen untuk dihitung kekuatan dan defleksi dari masing-masing komponen tersebut. Dalam tahap ini, alat uji dipecah menjadi beberapa komponen inti dan pada setiap komponen inti tersebut diterapkan gaya-gaya yang bekerja pada komponen tersebut. Dalam gambar 3 terlihat komponen-komponen inti dari alat uji *crashworthiness* yang ditampilkan dalam gambar urai (*exploded view*), berikut dengan diagram benda bebasnya.

Dalam penelitian ini kekuatan dan kekakuan hanya dihitung untuk 3 komponen inti, yaitu pelat dasar dudukan specimen, neraca pegas dan penyangga neraca pegas & dudukan pipa pengarah. Perhitungan kekuatan dan kekakuan dari ketiga komponen inti ini dilakukan berdasarkan diagram benda bebas yang ditampilkan dalam gambar 3.

Perhitungan kekuatan pelat dasar dudukan specimen diawali dengan perhitungan kesetimbangan gaya, yaitu $\Sigma F_y = 0$. Pada pelat dasar dudukan specimen bekerja gaya yang berasal dari tumbukan impaktor (F_{imp}) dan ditahan oleh gaya tarik yang berasal dari pegas sebanyak 4 buah pegas (F_{p1} , F_{p2} , F_{p3} , F_{p4}).



$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_{imp} - F_{p1} - F_{p2} - F_{p3} - F_{p4} = 0$$

$$F_{p1} = F_{p2} = F_{p3} = F_{p4}$$

$$4 \times F_{p1} = F_{imp}$$

$$F_{p1} = F_{imp} / 4$$

$$F_{p1} = 637,65 \text{ N} / 4$$

$$F_{p1} = 159,41 \text{ N}$$

$$F_{p1} = F_{p2} = F_{p3} = F_{p4} = 159,41 \text{ N}$$

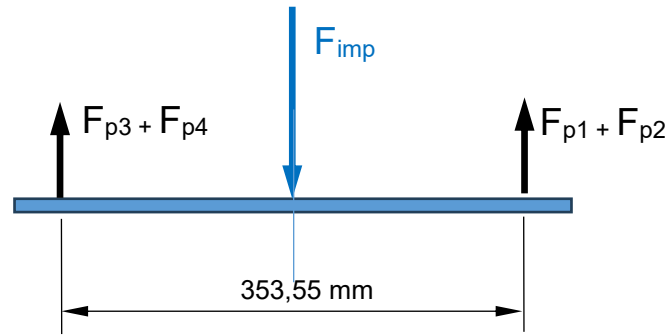
Gambar 4. Kesetimbangan statik pada pelat dasar dudukan specimen

Dengan asumsi bahwa beban gaya yang berasal dari tumbukan terbagi merata ke seluruh permukaan pelat dasar duduk specimen, maka besar gaya pegas yang menahan pelat di posisi p1, p2, p3 dan p4 adalah sama besar. Dari perhitungan di atas didapatkan besar gaya di keempat titik tersebut adalah 159,41 N

Perhitungan tegangan pada pelat dasar dudukan specimen dihitung dengan penyederhanaan struktur, yaitu mengikuti struktur *simple beam*. Penyederhanaan dilakukan dengan cara memandang pelat tersebut dari arah depan sehingga titik p1 berhimpit dengan titik p2 dan titik p3 berhimpit dengan titik p4. Dengan cara pandang seperti ini pelat dasar dudukan specimen dapat dianggap sebagai sebuah *simple beam*.

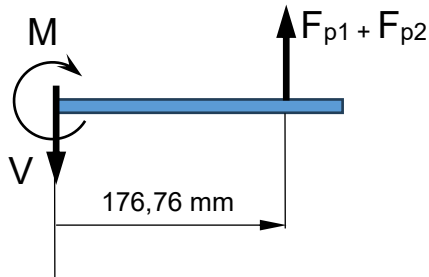
Jika jarak antara titik p1 dan titik p3 adalah 500 mm dan semua titik p1, p2, p3 dan p4 berada pada jarak yang sama terhadap pusat pelat, dengan sudut bagi sebesar 90° , maka jarak antara p2 dan p3 dapat dihitung sebesar $500 \text{ mm} \times \sin 45^\circ$, yaitu sebesar 353,55 mm.

Dengan besar gaya pada p1, p2, p3 dan p4 sebesar 159,41 N dan jarak p2 ke p3 sama dengan jarak p4 ke p1, maka besar momen maksimal yang terjadi pada pelat tersebut dapat dihitung dengan batuna gambar diagram benda bebas yang disederhanakan seperti yang terlihat pada gambar 5



Gambar 5. Diagram benda bebas pelat dasar dudukan specimen yang disederhanakan

Momen maksimal yang terjadi pada pelat dasar dudukan specimen dihitung dengan cara melakukan pemotongan batang di titik tengah batang, seperti pada gambar 6, dan menghitung momen lentur pada titik potong tersebut akibat gaya pada titik p1 dan p2.



$$\Sigma M = 0$$

$$M - [(F_{p1} + F_{p2}) \times \frac{1}{2} l] = 0$$

$$M - [(159,41 + 159,41) \times 176,76 \times 10^{-3}] = 0$$

$$M = 318,82 \times 0,177 = 56,43 \text{ N m}$$

Gambar 6. Potongan batang simple beam untuk mencari momen lentur maksimum

Perhitungan tegangan maksimum yang terjadi pada pelat dasar duduk specimen dilakukan dengan persamaan (1) tegangan untuk *simple beam* [14], yaitu :

$$\sigma_{maks} = \frac{M \times c}{I_{zz}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_{maks} = \frac{56,43 \times 0,004}{\frac{1}{12} \times 0,5 \times 0,008^3}$$

$$\sigma_{maks} = \frac{0,22572}{2,133 \times 10^{-8}} = 10.582.278,481 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{maks} = 10.582.278,481 \text{ Pa} = 10,58 \text{ Mpa}$$

Bahan yang dipilih untuk membuat pelat dasar dudukan specimen adalah baja AISI 1045 dengan kekuatan tarik ultimate (σ_u / *ultimate tensile strength*) berkisar antara 570 Mpa sampai dengan 700 Mpa, kekuatan luluh (σ_y / *yield strength*) sebesar 450 MPa dan modulus elastisitas (E) 200Gpa. Tegangan ijin untuk beban bending berada di antara batas $0.45 \sigma_y < \sigma_{allow} < 0.60 \sigma_y$ [15]. Sehingga tegangan ijin untuk material AISI 1045 dengan beban bending adalah $(0,45)(450)$ Mpa atau 202,5 Mpa.

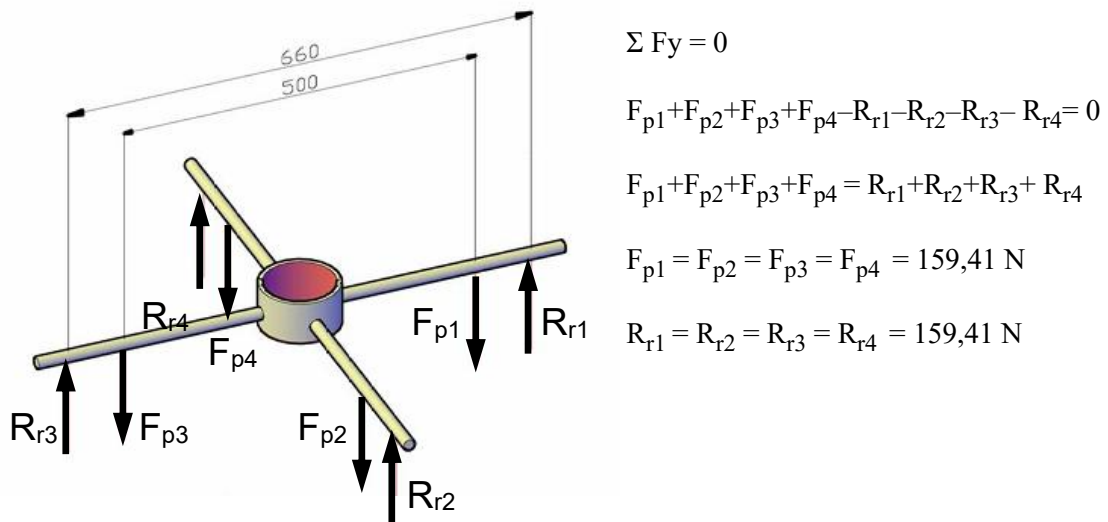
Jika dibandingkan antara tegangan maksimum yang terjadi (σ_{maks}) sebesar 10,58 Mpa dengan tegangan ijin bahan (σ_{allow}) sebesar 202,5 Mpa, maka pelat dasar dudukan specimen dapat dianggap aman, dengan factor of safety sebesar 202,5 Mpa / 10,58 Mpa atau sebesar 19,14.

Besar defleksi maksimum yang terjadi pada pelat dasar dudukan specimen adalah defleksi yang terjadi pada *simple beam* [14] dan dapat dihitung dengan persamaan (2) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\delta_{maks} &= \frac{P \times l^3}{48 E I} \dots\dots\dots (2) \\ \delta_{maks} &= \frac{637,65 \times 0,35355^2}{48 (200 \times 10^9) (1/12 \times 0,5 \times 0,008^3)} \\ \delta_{maks} &= \frac{637,65 \times 0,35355^2}{48 (200 \times 10^9) (2,133 \times 10^{-8})} \\ \delta_{maks} &= \frac{79,705}{20.476,8 \times 10^1} = \frac{79,705}{204.768} = 0,000389 m = 0,389 mm\end{aligned}$$

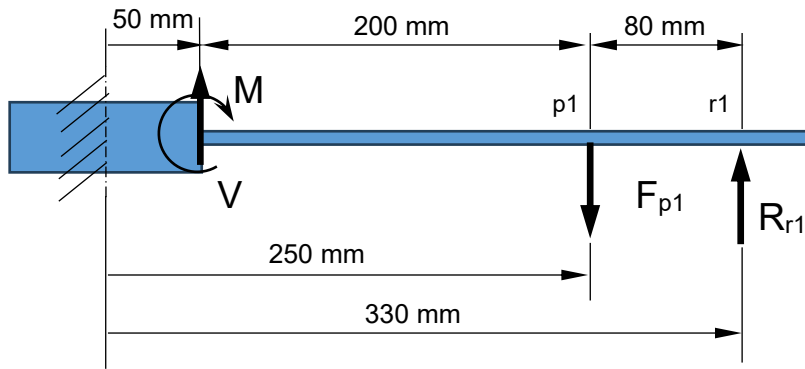
Defleksi sebesar 0,389 mm menunjukkan bahwa plat dasar dudukan specimen alat uji *crashworthiness* memiliki kekakuan cukup baik.

Bagian alat uji *crashworthiness* yang juga penting untuk dihitung kekuatannya adalah penyangga neraca pegas & dudukan pipa pengarah. Komponen ini dihitung berdasarkan diagram benda bebas yang terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Diagram benda bebas batang penyangga neraca pegas & dudukan pipa pengarah

Tegangan yang terjadi pada setiap pangkal batang penyangga neraca pegas dapat dihitung dengan asumsi struktur *simple support – twin loads* yang dimodifikasi yang diilustrasikan dalam gambar 8.



Gambar 8. Potongan diagram benda bebas batang penyangga neraca pegas & dudukan pipa pengarah

$$\Sigma M = 0$$

$$M - (R_{r1} \times (0,330 - 0,05)) + (F_{p1} \times (0,250 - 0,05)) = 0$$

$$M - (159,41 \text{ N} \times 0,28 \text{ m} + (159,41 \text{ N} \times 0,2 \text{ m})) = 0$$

$$M = (44,635 - 31,882) \text{ N m} = 12,753 \text{ N m}$$

Perhitungan tegangan maksimum yang terjadi setiap pangkal batang penyangga neraca pegas dilakukan dengan persamaan (1) tegangan untuk *simple support – twin loads* [16], yaitu :

$$\sigma_{maks} = \frac{M \times c}{I_{zz}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_{maks} = \frac{12,753 \times 0,0075}{\frac{1}{64} \times \pi \times 0,015^4}$$

$$\sigma_{maks} = \frac{0,0956}{2,4838 \times 10^{-9}} = 38.489.411,386 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{maks} = 38.489.411,386 \text{ Pa} = 38,49 \text{ Mpa}$$

Bahan yang dipilih untuk membuat batang penyangga neraca pegas sama dengan bahan yang digunakan untuk membuat pelat dasar dudukan specimen, yaitu baja AISI 1045 dengan tegangan ijin yaitu sebesar 202,5 Mpa. Jika dibandingkan antara tegangan maksimum yang terjadi (σ_{maks}) sebesar 38,49 Mpa dengan tegangan ijin bahan (σ_{allow}) sebesar 202,5 Mpa, maka batang dudukan neraca pegas dapat dianggap aman, dengan factor of safety sebesar 202,5 Mpa / 38,49 Mpa atau sebesar 5,26.

Besar defleksi yang terjadi pada batang penyangga neraca pegas adalah defleksi yang terjadi pada *simple support – twin loads* [16] dan dapat dihitung dengan persamaan (3) sebagai berikut :

$$\delta_{maks} = \frac{F.a}{6.E.I} (3.x^2 + a^2 - 3.l.x) \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta_{maks} = \frac{(159,41) \cdot (0,08)}{6 \cdot (200 \times 10^9) \cdot (\frac{1}{64} \pi \cdot 0,015^4)} (3 \cdot 0,380^2 + 0,08^2 - (3) \cdot (0,660) \cdot (0,380))$$

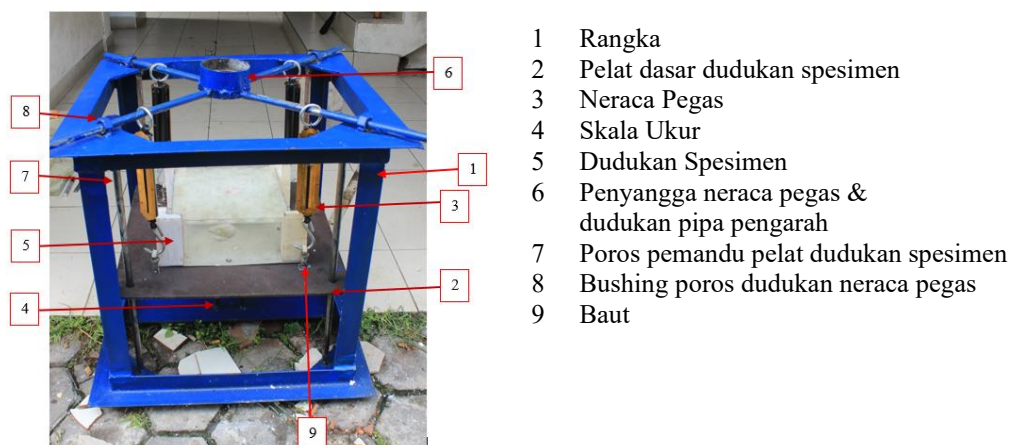
$$\delta_{maks} = \frac{12,7528}{6 \cdot (200 \times 10^9) \cdot (2,4838 \times 10^{-9})} (0,4332 + 0,0064 - 0,7524)$$

$$\delta_{maks} = \frac{12,7528}{2.980,56} (0,4332 + 0,0064 - 0,7524)$$

$$\delta_{maks} = -0,0013384 \text{ m} = -1,3384 \text{ mm}$$

Defleksi sebesar 1,3384 menunjukkan bahwa batang penyangga neraca pegas alat uji *crashworthiness* tidak memiliki kekakuan cukup baik.

Tahap perancangan yang di dalamnya sudah tercakup gambar teknik alat uji dan perhitungan kekuatan setiap komponen, dilanjutkan dengan tahap pembuatan. Pembuatan alat uji *crashworthiness* terbagi menjadi tahapan pembuatan komponen satuan serta tahap perakitan. Proses pembuatan komponen satuan melibatkan proses pemesian (bubut, freis dan gerinda) serta proses pengelasan dengan las SMAW. Tahap pembuatan komponen dilanjutkan dengan tahap perakitan. Alat uji *crashworthiness* yang telah selesai dirakit terlihat pada gambar 9.



Gambar 9. Alat uji *Crashworthiness* dengan metode *drop test* yang telah selesai dirakit

Untuk mengetahui kinerjanya, alat uji *crashworthiness* ini selanjutnya diuji dengan cara menjatuhkan bola baja impactor langsung kepada pelat dasar dudukan spesimen. Pengujian dilakukan dengan variasi ketinggian, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m dan 6 m. Pada setiap variasi ketinggian dilakukan pengujian sebanyak 4 kali

3. Hasil dan Pembahasan

Perhitungan kekuatan yang telah dilakukan dalam tahap perancangan menunjukkan hasil yang baik, dimana tegangan yang terjadi masih berada di bawah tegangan ijin. Untuk pelat dasar dudukan spesimen yang dibuat dengan bahan AISI 1045, tegangan maksimum yang terjadi (σ_{maks}) sebesar 10,58 Mpa dan tegangan ijin bahan (σ_{allow}) sebesar 202,5 Mpa. Dengan demikian, pelat dasar dudukan specimen dapat dianggap kuat menahan beban yang terjadi, dengan *factor of safety* sebesar 19,14. Dari sisi kekakuan, pelat dasar dudukan specimen juga dapat dianggap baik karena defleksi maksimum yang terjadi hanya sebesar 0,389 mm. dengan demikian lendutan yang terjadi pada pelat dasar dudukan specimen hanya dapat menimbulkan kesalahan pengukuran pada skala ukur alat uji sebesar 0,4 mm, sedangkan skala terkecil pada skala ukur alat uji adalah 1 mm.

Untuk batang penyangga neraca pegas juga dapat dianggap kuat menahan beban. Tegangan maksimum yang terjadi sebesar 38,49 Mpa masih berada di bawah tegangan ijin bahan AISI 1045, yaitu sebesar 202,5 Mpa. Factor of safety untuk rancangan batang penyangga neraca pegas adalah sebesar 5,26. Angka ini cukup besar untuk keamanan alat ukur.

Satu kekurangan dari rancangan alat uji *crashworthiness* dalam penelitian ini adalah defleksi maksimum yang terjadi pada batang penyangga neraca pegas yang masih cukup besar, yaitu

1,3384 mm. Defleksi sebesar ini menunjukkan bahwa batang penyangga neraca pegas alat uji *crashworthiness* tidak memiliki kekakuan cukup baik. Defleksi yang lebih besar dari 1 mm dapat mengurangi ketelitian pengukuran karena skala terkecil pada skala ukur alat uji *crashworthiness* adalah sebesar 1 mm. Untuk mengatasi kekurangan ini, kekakuan dari batang penyangga neraca pegas harus ditingkatkan. Salah satu cara untuk meningkatkan kekakuannya adalah dengan memperbesar diameter batang penyangga neraca pegas atau menambahkan rib penguat pada batang tersebut. Sedemikian hingga momen inersia penampang dari batang penyangga ini akan meningkat dan menurunkan angka defleksinya.

Jika defleksi pelat dasar dudukan specimen ditambahkan dengan defleksi batang penyangga neraca pegas akan didapatkan defleksi total sebesar 1,7274 mm. Defleksi sebesar ini dapat mempengaruhi akurasi pengukuran alat uji *crashworthiness* sampai sebesar 2 kg, jika dikonversikan kepada besar beban atau gaya tumbuk (F_{imp}) dari bola baja impaktor .

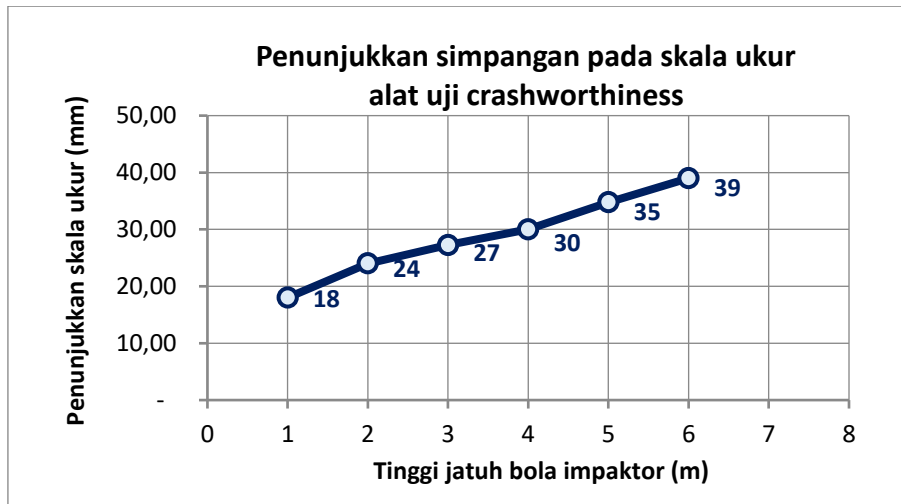
Pengujian alat uji *crashworthiness* didapatkan hasil seperti yang terlihat pada tabel 1 dan tabel 2. Data dalam tabel hasil pengujian juga dapat digambarkan dengan grafik dalam gambar 10 dan gambar 11.

Tabel 1 Hasil pengukuran alat uji *crashworthiness* dalam skala pengukuran mm

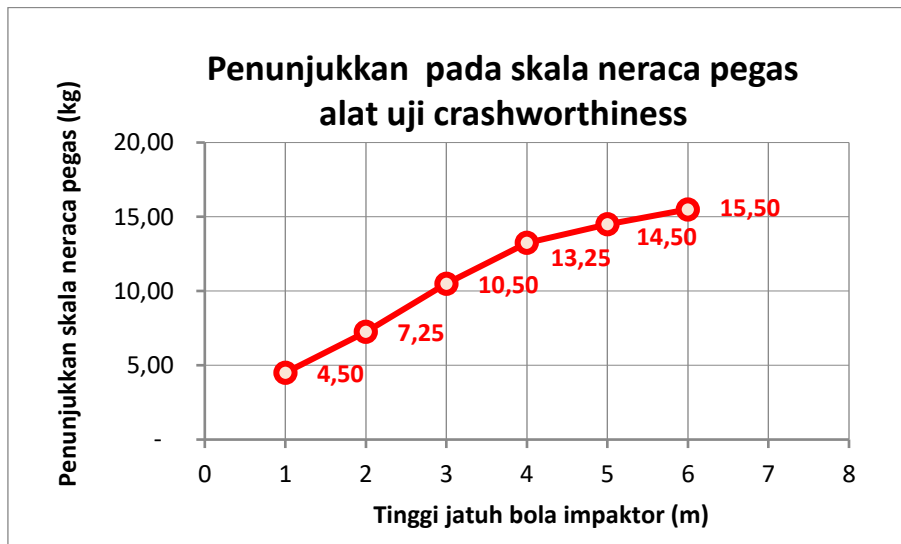
Skala Pengukuran (mm)						
Ketinggian (m)	P-1 (mm)	P-2 (mm)	P-3 (mm)	P-4 (mm)	Rata-rata (mm)	Energi Potensial Teoritik (Joule)
1	19	18	17	18	18,00	17,56
2	24	26	22	24	24,00	35,12
3	28	26	28	27	27,25	52,68
4	29	30	31	30	30,00	70,24
5	34	33	37	35	34,75	87,80
6	40	39	38	39	39,00	105,36

Tabel 2 Hasil pengukuran alat uji *crashworthiness* dalam skala pengukuran neraca pegas

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



Gambar 10. Grafik hasil pengujian alat uji *Crashworthiness* dengan penunjukkan simpangan pada skala alat ukur



Gambar 11. Grafik hasil pengujian alat uji *Crashworthiness* dengan penunjukkan simpangan pada skala neraca pegas

Ditinjau dari bentuk grafik pada gambar 10, pergerakan simpangan skala ukur alat uji sebagai akibat dari kenaikan beban (gaya) tumbuk dari impaktor, masih dapat dianggap linier. Hal ini sesuai dengan kenaikan besar gaya potensial benda jatuh yaitu sebesar $E_p = m.g.h$. Dengan kenaikan tinggi jatuh yang linier (1,2, 3, 4, 5, dan 6), secara teoritik perubahan simpangan pada penunjukkan skala ukur alat uji *crashworthiness* seharusnya juga linier.

Grafik pada gambar 11 yang menunjukkan pergerakan pengkuruan pada skala neraca pegas tidak menggambarkan bentuk grafik yang linier. Sampai pada pengujian alat dengan tinggi jatuh bola impaktor 4 meter, penunjukkan skala neraca pegas masih terlihat linier, namun setelah melampaui 4 meter, perubahan grafiknya menjadi agak melandai dan tidak mengikuti kemiringan grafik sebelumnya. Hal ini kemungkinan disebabkan karena kekakuan pegas di dalam neraca pegas yang agak berubah.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkam dari penelitian ini antara lain adalah bahwa alat uji *crashworthiness* yang dibuat dengan bahan AISI 1045 ini cukup kuat menahan beban yang terjadi. Hal ini terlihat dari tegangan yang terjadi pada pelat dasar, yaitu 10,58 Mpa, dan tegangan pada batang penyangga neraca pegas, yaitu 38,49 masih berada di bawah tegangan ijin bahan (202,5 Mpa). *Factor of Safety* untuk pelat dasar dudukan spesimen adalah sebesar 19,14 dan untuk batang penyangga neraca pegas adalah sebesar 5,26. Kekakuan struktur alat uji *crashworthiness* masih belum cukup memadai, dimana defleksi total dari pelat dasar dudukan spesimen dan batang penyangga neraca pegas adalah sebesar 1,7274 mm. Defleksi sebesar ini dapat mengurangi akurasi pengukuran gaya tumbuk impaktor pada alat uji *crashworthiness* sampai 2 kg. Di sisi lain, alat uji *crashworthiness* ini juga masih memiliki kekurangan karena grafik yang dihasilkan dari uji kinerja tidak menunjukkan grafik yang linier.

5. Daftar Pustaka

- [1] Sabah Salim Hamza, Al Emran Ismail, M. Y. Yuhazri, Ahmad Hamdan Ariffin and Mohamed Thariq Hameed Sultan, 2021, Hybridization Effect on Crashworthiness Parameters of Natural Composite, *Frontiers in Materials*, Volume 8, article 619245.
- [2] Prakash P., Bharath G., and Pavan P., 2014, Role of Crashworthiness in Setting the Safety Standards of a Vehicle, *Journal of Basic and Applied Engineering Research* Print ISSN: 2350-0077; Online ISSN: 2350-0255; Volume 1, Number 5; October, 2014 pp. 46-49 © Krishni Sanskriti Publications <http://www.krishisanskriti.org/jbaer.html>
- [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] Marsono, Mochamad Rafli Januarizki, Muhammad Luthfi Rasyad, Erika Rachmadini, dan Ghazi Ahmad Ghifari, 2023. Pengujian Crashworthiness Honeycomb Sandwich Dengan Variasi Jumlah Lapisan Inti Menggunakan Software Ansys. *JURNAL REKAYASA ENERGI DAN MEKANIKA*, III(2), pp. 125-134.
- [6] Maria Pia Falaschetti, Francesco Semprucci. Johan Birnie Hernandez and Enrico Troiani. 2025, Experimental and Numerical Assessment of Crashworthiness Properties of Composite Materials: A Review. *Aerospace* 2025, 12, 122. <https://doi.org/10.3390/aerospace12020122>
- [7] Yucheng Liua, Stefan J. Chu, and Raul Viera, 2011, Analysis of Structural Impact and Crashworthiness using Experimental, Analytical and Computational Techniques: An Overview and Recent Developments, *International Journal Vehicle Structures & Systems*, Volume 3 no. 3, pp. 144-153 ISSN: 0975-3060 (Print), 0975-3540 (Online), www.ijvss.maftree.org, doi: 10.4273/ijvss.3.3.01
- [8] Yohanes Pringeten Dilianto Sembiring Depari, Achmad Syaifudin, Yunendar Aryo Handoko, Adhi Dharma Permana, Hendrato, Beny Halfina, Jean Mario Valentino, 2023, Crashworthiness Analysis of the Impact Modules of Indonesian High-Speed Train Considering EN 15227, *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri (Journal of Industrial Research and Innovation)*, Volume 17, No. 02, pp 33-40, <https://ejurnal.brin.go.id/MIPI>, E- ISSN 2541-1233, DOI: <https://doi.org/10.55981/mipi.2023.1665>
- [9] Burak Duran, Dominic Emory, Yashar Eftekhar Azam and Daniel G. Linzell, (2025). A novel CNN architecture for robust structural damage identification via strain measurements and its validation via full-scale experiments, *Measurement*, Volume 239,

- [10] Liu Xiaochuan, Guo Jun, Bai Chunyu, Sun Xiasheng, Mou Rangke, 2015, Drop test and crash simulation of a civil airplane fuselage section, Chinese Journal of Aeronautics (2015) Volume 28, No. 2, pp. 447–456.
- [11] Felix Dionisius, Jos Istiyanto, Suliono dan Yusup Nur Rohmat, 2017, Pengembangan Pengujian Crasworthiness dengan Simulasi NUmerek Menggunakan Model Impact Transferability, Jurnal Teknologi Terapan, Volime3. Nomor 1, ISSN 2477-3506, pp. 12-17.
- [12] Ilham Bagus Wirantoa, Sherly Octavia Saraswatia, Aditya Rio Prabowob, Iqbal Reza Al Fikria, Chairunnisac, Teguh Muttaqied, Muhammad Ilham Adhynugrahae, Megawantoe, Arif Hidayatf, Abid Paripurnad, Aryandi Martae, Fajar Ari Wandonoe, Abian Nurrohmade, 2023, Experimental studies on crashworthiness analysis of a sandwich composite panel under axial impact: A comprehensive review, Second International Symposium on Risk Analysis and Safety of Complex Structures and Components (IRAS 2023), Procedia Structural Integrity, 48, 2023, pp. 65–72.
- [13] Maulana, I., Afandi, S., Rabeta, B. R. & Nurrohmad, A., 2022. Desain Iterasi Dudukan Pelat Pengukur Gaya Pada RIG Alat Uji Jatuh Bebas Menggunakan Optimasi Topology. Jurnal Teknologi Kedirgantaraan, VII(2), pp. 79-92.
- [14] Robert L Mott and Joseph A. Untener, 2017, Applied Strength of Materials, 6th Edition, Boca Raton, Taylor & Francis, CRC Press.
- [15] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, 1996, STANDARD HANDBOOK OF MACHINE DESIGN, 2nd Edition, McGraw-Hill Companies Inc. New York. ,
- [16] Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett, 2015 SHIGLEY’S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN, 10th Edition, McGraw-Hill Companies Inc. New York.