

**ANALISIS PENGUJIAN *QUASI-STATIC AXIAL LOAD*
PADA STRUKTUR *LEADING EDGE* BERBAHAN *POLYCARBONATE 3D*
PRINTING UNTUK EVALUASI ABSORPSI ENERGI**

PROYEK AKHIR



OLEH :

NI PUTU KRISANTHI INDRASWARI

NIT : 30422016

**PROGRAM STUDI DIPLOMA 3 TEKNIK PESAWAT UDARA
POLITEKNIK PENERBANGAN SURABAYA**

2025

**ANALISIS PENGUJIAN *QUASI-STATIC AXIAL LOAD*
PADA STRUKTUR *LEADING EDGE* BERBAHAN *POLYCARBONATE 3D*
PRINTING UNTUK EVALUASI ABSORPSI ENERGI**

PROYEK AKHIR

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Mendapatkan Gelar Ahli Madya
(A.Md.) pada Program Studi Diploma 3 Teknik Pesawat Udara



Oleh:

NI PUTU KRISANTHI INDRASWARI

NIT: 30422016

**PROGRAM STUDI DIPLOMA 3 TEKNIK PESAWAT UDARA
POLITEKNIK PENERBANGAN SURABAYA**

2025

HALAMAN PERSETUJUAN

ANALISIS PENGUJIAN *QUASI-STATIC AXIAL LOAD* PADA STRUKTUR
LEADING EDGE BERBAHAN *POLYCARBONATE 3D PRINTING* UNTUK
EVALUASI ABSORPSI ENERGI

Oleh :
Ni Putu Krisanthi Indraswari
NIT. 30422016

Disetujui untuk diujikan pada :
Surabaya, 13 Agustus 2025

Pembimbing I : Dr. Willy Artha Wirawan., S.T., M.T.
NIP. 19930718202311025

Pembimbing II : Dr. Setyo Hariyadi S.P. S.T, M.T
NIP. 19790824 200912 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENGUJIAN *QUASI-STATIC AXIAL LOAD* PADA STRUKTUR
LEADING EDGE BERBAHAN *POLYCARBONATE 3D PRINTING* UNTUK
EVALUASI ABSORPSI ENERGI

Oleh :
Ni Putu Krisanthi Indraswari
NIT. 30422016

Telah dipertahankan dan dinyatakan lulus pada Ujian Tugas Akhir
Program Pendidikan Diploma 3 Teknik Pesawat Udara
Politeknik Penerbangan Surabaya
Pada tanggal : 13 Agustus 2025

Panitia Penguji :

1. Ketua : Ajeng Wulansari, ST., MT.
NIP. 198906062009122001
2. Sekretaris : Nyaris Pambudiyatno, S.SiT, M.MTr
NIP. 19820525 200502 1 001
3. Anggota : Dr. Willy Artha Wirawan., S.T., M.T.
NIP. 19930718202311025

Ketua Program Studi
Diploma 3 Teknik Pesawat Udara

Nyaris Pambudiyatno, S.SiT, M.MTr
NIP. 19820525 200502 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN DAN HAK CIPTA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ni Putu Krisanthi Indraswari

NIT : 30422016

Program Studi : D3 Teknik Pesawat Udara VIII

Judul Proyek Akhir : Analisis Pengujian *Quasi-Static Axial Load* Pada Struktur *Leading Edge* Berbahan *Polycarbonate 3D Printing* Untuk Evaluasi Absorpsi Energi

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Proyek Akhir/Tugas Akhir ini merupakan karya asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik, baik di Politeknik Penerbangan Surabaya maupun di Perguruan Tinggi lain, serta dipublikasikan, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
2. Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif (Non-Exclusive Royalty-Free Right) kepada Politeknik Penerbangan Surabaya berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan Proyek Akhir saya dengan tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di Perguruan Tinggi dan Akademi Penerbangan.

Surabaya, 13 Agustus 2025
Yang membuat pernyataan

Ni Putu Krisanthi Indraswari
NIT. 30422016

ABSTRAK

ANALISIS PENGUJIAN *QUASI-STATIC AXIAL LOAD* PADA STRUKTUR *LEADING EDGE* BERBAHAN *POLYCARBONATE 3D PRINTING* UNTUK EVALUASI ABSORPSI ENERGI

Oleh:

Ni Putu Krisanthi Indraswari

NIT. 30422016

Perancangan struktur yang memiliki kelaiktabrakan merupakan faktor penting dalam meningkatkan keselamatan penerbangan, khususnya pada bagian *leading edge* pesawat yang rawan terhadap benturan, seperti *bird strike*. Penelitian ini difokuskan pada kajian karakteristik penyerapan energi serta pola deformasi dari struktur *leading edge* pesawat dengan konfigurasi *auxetic* berbahan *polycarbonate* yang diproduksi melalui teknologi *3D printing*. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan metode *quasi-static axial load* guna merepresentasikan beban aksial saat terjadinya tabrakan. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa struktur *auxetic* mampu menyerap energi secara efektif dan menampilkan pola deformasi khas, seperti *concertina*, *diamond*, serta *buckling*. Selain itu, struktur ini terbukti mampu mendistribusikan beban secara lebih merata, menurunkan konsentrasi tegangan, dan meningkatkan efisiensi penyerapan energi material. Oleh karena itu, penggunaan desain *auxetic* berbasis *polycarbonate* dapat dipertimbangkan sebagai solusi inovatif untuk meningkatkan *crashworthiness* pada struktur *airframe* pesawat.

Kata kunci: *crashworthiness, auxetic structure, polycarbonate, 3D printing, energy absorption, axial compression, quasi-static test.*

ABSTRACT

ANALYSIS OF QUASI-STATIC AXIAL LOAD TESTING ON A 3D-PRINTED POLYCARBONATE LEADING EDGE STRUCTURE FOR ENERGY ABSORPTION EVALUATION

By:

Ni Putu Krisanthi Indraswari
NIT. 30422016

The design of crashworthy structures is an important factor in improving aviation safety, particularly in the leading edge of aircraft, which is prone to collisions such as bird strikes. This study focuses on examining the energy absorption characteristics and deformation patterns of aircraft leading edge structures with auxetic configurations made of polycarbonate produced using 3D printing technology. Experimental testing was conducted using a quasi-static axial load method to simulate the axial load during a collision. The test results showed that the auxetic structure effectively absorbs energy and exhibits characteristic deformation patterns, such as concertina, diamond, and buckling. Additionally, this structure was found to distribute loads more evenly, reduce stress concentration, and enhance material energy absorption efficiency. Therefore, the use of auxetic designs based on polycarbonate can be considered as an innovative solution to enhance crashworthiness in aircraft airframe structures.

Keywords: *crashworthiness, auxetic structure, polycarbonate, 3D printing, energy absorption, axial compression, quasi-static test.*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala Rahmat dan Karunia-Nya yang telah memberikan kesehatan, pengetahuan, keterampilan, pengalaman yang senantiasa diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan cukup baik yang berjudul *ANALISIS PENGUJIAN QUASI-STATIC AXIAL LOAD PADA STRUKTUR LEADING EDGE BERBAHAN POLYCARBONATE 3D PRINTING UNTUK EVALUASI ABSORPSI ENERGI*.

Proses penyusunan Tugas Akhir ini penulis banyak menerima bantuan, bimbingan dan pengarahan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Ahmad Bahrawi, S.E., M.T. selaku Direktur Politeknik Penerbangan Surabaya
2. Bapak Nyaris Pambudiyatno, S.SiT, M.MTr selaku Ketua Program Studi Diploma 3 Teknik Pesawat Udara di Politeknik Penerbangan Surabaya.
3. Bapak Dr. Willy Artha Wirawan selaku Dosen Pembimbing materi.
4. Bapak Dr. Setyo Hariyadi S.P S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Penulisan.
5. Seluruh dosen pengajar program studi Diploma 3 Teknik Pesawat Udara serta seluruh civitas akademika Politeknik Penerbangan Surabaya yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat.
6. Ibu Ni Putu Widiasih selaku orang tua saya yang tak henti- hentinya memberikan doa serta bantuan secara materi maupun dukungan moral untuk kelancaran Tugas Akhir ini.
7. Bapak I Gede Nyoman Pra Jaya Negara selaku orang tua saya yang tak henti- hentinya memberikan doa serta bantuan secara materi maupun dukungan moral untuk kelancaran Tugas Akhir ini.
8. Seluruh rekan-rekan Taruna yang selalu menjaga dan memberi semangat.

Tentunya Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat khususnya bagi taruna Politeknik Penerbangan Surabaya. Atas segala kesalahan dan kata-kata yang kurang berkenan, kami memohon maaf. Saran dan kritik membangun kami harapkan demi karya yang lebih baik di masa mendatang.

Surabaya, 13 Agustus 2025
Penyusun

Ni Putu Krisanthi Indraswari
NIT. 30422016

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------------|
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| PERNYATAAN KEASLIAN DAN HAK CIPTA | iv |
| ABSTRAK | v |
| ABSTRACT | vi |
| KATA PENGANTAR | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR TABEL | xii |
| DAFTAR SINGKATAN | xiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5 Hipotesis | 3 |
| 1.6 Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.7 Sistematika Penulisan | 3 |
| BAB 2 LANDASAN TEORI | 5 |
| 2.1 Leading Edge | 5 |
| 2.2 Teori Bird Strike | 6 |
| 2.3 Kriteria Kelaiktabrakan | 7 |
| 2.4 Crash Box | 9 |
| 2.4.1 Desain Crash Box | 10 |
| 2.5 Auxetic Structure | 13 |
| 2.6 Quasi-Static Axial Load | 14 |
| 2.7 Polycarbonate Sebagai Material Crash Box | 15 |
| 2.8 Regangan dan Tegangan | 16 |
| 2.8.1 Energi Tegangan dan Regangan | 17 |
| 2.8.2 Tegangan dan Regangan Normal | 19 |
| 2.8.3 Tegangan dan Regangan Geser | 21 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.9 | Hubungan Tegangan Regangan Plastis..... | 23 |
| 2.10 | Deformasi | 24 |
| 2.10.1 | Pola Elastis | 26 |
| 2.10.2 | Pola <i>Buckling / Progresif</i> | 26 |
| 2.10.3 | Pola Densifikasi | 26 |
| 2.11 | Absorpsi Energi | 26 |
| 2.12 | Software Origin Lab | 29 |
| 2.13 | Load - Displacement..... | 29 |
| 2.14 | Kajian penelitian Terdahulu yang Relevan..... | 29 |
| BAB 3 METODE PENELITIAN | | 32 |
| 3.1 | Desaian Penelitian | 32 |
| 3.2 | Variabel Penelitian..... | 33 |
| 3.3 | Material dan Desain..... | 33 |
| 3.4 | Proses Pembuatan Desain <i>Crashworthiness</i> | 35 |
| 3.5 | Pengujian <i>Quasi-static Axial Load</i> | 35 |
| 3.6 | Metode Pengolahan Data..... | 38 |
| 3.7 | Tempat dan Waktu Penelitian | 40 |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN | | 41 |
| 4.1 | Hasil Eksperimen Reaksi Gaya | 41 |
| 4.2 | Hasil Penyerapan Energi..... | 44 |
| 4.2.1 | <i>Software origin Lab</i> | 44 |
| 4.2.2 | Hasil Perbandingan Nilai Serapan Energi | 47 |
| 4.3 | <i>Initial Peak Force (IPF)</i> | 48 |
| 4.4 | <i>Mean Force</i> | 49 |
| 4.5 | <i>CFE (Crush Force Efficiency)</i> | 50 |
| 4.6 | <i>SEA (Specific Energy Absorption)</i> | 50 |
| 4.7 | <i>Hasil Eksperimen Pola Deformasi</i> | 51 |
| BAB 5 KESIMPULAN | | 54 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 54 |
| 5.2 | Saran | 54 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 56 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2. 1 Leading Edge | 5 |
| Gambar 2. 2 Ilustrasi Bird Strike | 7 |
| Gambar 2. 3 Kecelakaan Pesawat | 8 |
| Gambar 2. 4 Kurva Gaya Tabrak | 9 |
| Gambar 2. 5 Kurva gaya tabrak rata-rata terhadap panjang deformasi..... | 9 |
| Gambar 2. 6 Struktur crushable subfloor dan crash box | 10 |
| Gambar 2. 7 Crash Box berpenampang Lingkaran..... | 11 |
| Gambar 2. 8 Crash Box Berpenampang Persegi..... | 11 |
| Gambar 2. 9 Crash Box dengan struktur origami | 12 |
| Gambar 2. 10 Crash Box Hibrida Aluminium-Komposit | 12 |
| Gambar 2. 11 Auxetic Desain | 14 |
| Gambar 2. 12 Pengujian Quasi Static | 15 |
| Gambar 2. 13 Diagram Beban Perpindahan..... | 17 |
| Gambar 2. 14 Energi regangan elastis dan energi regangan plastis | 18 |
| Gambar 2. 15 Diagram beban-perpindahan elastis | 18 |
| Gambar 2. 16 Pembebanan Batang Secara aksial | 19 |
| Gambar 2. 17 Pertambahan Panjang Batang..... | 21 |
| Gambar 2. 18 Batang mengalami Tegangan geser | 22 |
| Gambar 2. 19 Perubahan sudut Elemen Persegi Panjang | 22 |
| Gambar 2. 20 Perubahan Sudut Elemen Persegi Panjang..... | 23 |
| Gambar 2. 21 Perubahan Sudut Elemen Persegi Panjang..... | 23 |
| Gambar 2. 22 Kurva tegangan-regangan pemodelan material..... | 24 |
| Gambar 2. 23 Pola Deformasi..... | 25 |
| Gambar 2. 24 Aplikasi tabung penyerapan energi di badan pesawat..... | 27 |
| Gambar 2. 25 Kurva beban-perpindahan dari tabung penyerapan energi..... | 28 |
| Gambar 2. 26 Software Origin Lab..... | 29 |
| Gambar 3. 1 Bagan Alur Penelitian (Olahan penulis, 2025) | 32 |
| Gambar 3. 2 2D dan 3D Desain Struktur Auxetic..... | 34 |
| Gambar 3. 3Proses <i>Printing</i> dengan <i>3D Printing</i> | 35 |
| Gambar 3. 4 Skema Pengujian Sumber: Vilas Umbere, 2024 | 36 |
| Gambar 3. 5 Software Microsoft Excel Sumber: Microsoft, 2016 | 38 |
| Gambar 3. 6 Software Origin Lab..... | 38 |
| Gambar 3. 7 Tanggal dan Waktu Penelitian | 40 |
| Gambar 4. 1 Reaksi Gaya Pada Crash Box Triangle | 41 |
| Gambar 4. 2 Reaksi Gaya Pada Crash Box Half Circle..... | 42 |
| Gambar 4. 3 Reaksi Gaya Pada Crash Box Auxetic Rectangle | 42 |
| Gambar 4. 4 Hasil Perbandingan 3 Spesimen Pada Pengujian 1 | 43 |
| Gambar 4. 5 Hasil Perbandingan 3 Spesimen Pada Pengujian 2 | 43 |
| Gambar 4. 6 Reaksi Gaya Crash Box Pada Auxetic Triangle Structure | 45 |
| Gambar 4. 7 Reaksi Gaya Crash Box Pada Auxetic Half Circle Structure..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4. 8 Reaksi Gaya Crash Box Pada Auxetic Rectangle Structure..... | 46 |
| Gambar 4. 9 Grafik Nilai Penyerapan Energi | 47 |
| Gambar 4. 10 Grafik Initial Peak Force | 49 |
| Gambar 4. 11 Grafik Mean Force | 49 |
| Gambar 4. 12 Grafik CFE (Crush Force Efficiency) | 50 |
| Gambar 4. 13 Grafik SEA (Specific Energy Absorption) | 51 |
| Gambar 4. 14 Kondisi utuh dan hasil uji Auxetic Triangle Strcture | 52 |
| Gambar 4. 15 Kondisi utuh dan hasil uji Auxetic Half Circle Structure..... | 52 |
| Gambar 4. 16 Kondisi utuh dan hasil uji Auxetic Rectangle Structure | 53 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2. 1 Polycarbonate Properties | 16 |
| Tabel 3. 1 Properti Material Polycarbonate..... | 34 |
| Tabel 3. 2 Setting Mesin MTS E64 300kn..... | 36 |
| Tabel 3. 3 Spesifikasi Mesin MTS E64 300kn..... | 37 |
| Tabel 4. 1 Nilai Penyerapan Energi Crash Box Auxetic Structure..... | 46 |

DAFTAR SINGKATAN

| | |
|------------|--|
| <i>NPR</i> | <i>Negatif Poisson Rasio</i> |
| <i>PC</i> | <i>Polycarbonate</i> |
| <i>EA</i> | <i>Energy Absobtion</i> |
| <i>MF</i> | <i>Mean Force</i> |
| <i>CFE</i> | <i>Crush Force Efficiency</i> |
| <i>IPF</i> | <i>Initial Peak Force</i> |
| <i>SEA</i> | <i>Specific Energy Absobtion</i> |
| <i>FDM</i> | <i>Fused Deposition Modelling</i> |
| <i>FAA</i> | <i>Federal Aviation Administration</i> |

DAFTAR PUSTAKA

- Agus Choiron, M., B. Darmadi, D., & Rahmaddian Anwari, B. (2015). Analisis Penyerapan Energi Dan Pola Deformasi Crash Box Dengan Variasi Sudut Tirus Dinding Crash Box Pada Uji Simulasi Tabrakan Arah Frontal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(1), 75–83. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2015.006.01.11>
- Akbar, M., Rizky, I., Putrawani, E., Rosa, D., Cupu, P., Mesin, J. T., Teknik, F., Riau, U., & Subrantas, J. H. R. (2020). Analisis Kapasitas Penyerapan Energi Crash Box dengan Variasi Geometri Penampang dan Jumlah Silinder Menggunakan Metode Elemen Hingga. *SNTIKI*, 2579–5406.
- Andrawina, R. (2011). I. tegangan normal dan tegangan geser 1.1. *Tegangan Normal Dan Tegangan Geser*, 1–16.
- ARDIANTO, A. I. N. R. W. (2016). Analisis Uji Jatuh Badan Pesawat R80 Dengan Metode Elemen Hingga Publikasi Ilmiah. 18.
- Asti, C., Azzam, Y. A., Jusuf, A., & Gunawan, L. (n.d.). Kaji numerik kelaikan tabrak struktur crashbox hibrid aluminum / GFRP dikenai beban impak aksial.
- Bastola, N., Ma, J., & Jahan, M. P. (2024). Design and numerical investigation of the 3D reinforced re-entrant auxetic and hexagonal lattice structures for energy absorption properties. *Manufacturing Letters*, 41, 1100–1108. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.135>
- Boyacı, E., & Altın, M. (2023). Experimental and Numerical Approach on Bird Strike: A Review. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 7(2), 95–103. <https://doi.org/10.30939/ijastech..1293572>
- Chikkanna, N., Krishnapillai, S., & Ramachandran, V. (2023). In-plane and out-of-plane quasi-static compression performance enhancement of 3D printed re-entrant diamond auxetic metamaterial with geometrical tuning and fiber reinforcement. *Defence Technology*, 25, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.11.009>
- Ciampaglia, A., Patruno, L., & Ciardiello, R. (2024). Design of a Lightweight Origami Composite Crash Box: Experimental and Numerical Study on the Absorbed Energy in Frontal Impacts. *Journal of Composites Science*, 8(6).

<https://doi.org/10.3390/jcs8060224>

- Eko Poerwanto, U. M. (2016). *Analisis Kecelakaan Penerbangan Di Indonesia Untuk Peningkatan Keselamatan Penerbangan*. VIII(1), 9.
- FAA. (2023). Chapter 12 Hydraulic & Pneumatic Power Systems. *The Aviation Maintenance Technician Handbook—Airframe (FAA-H-8083-31B)*, 12.1-12.51.
- Fahmi, W., & Wailanduw, A. G. (2019). Visualisasi Pengaruh Variasi Sudut Kemiringan Leading Edge Terhadap Karakteristik Aerodinamika Kendaraan Bus. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 40(03), 81–89. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-pendidikan-teknik-mesin/article/view/29311%0Ahttps://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-pendidikan-teknik-mesin/article/view/29311/26844>
- Fareed, M. M., Lafta, O. A., & Said, M. R. (2017). The axial crushing of circular tube under quasi-static loading. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(16), 4818–4823.
- Fransisco, R., Afandi, S., & Rabeta, B. (2016). Analisis Numerik Efek Tumbukan dan Pola Deformasi Crash Box Berbentuk Origami. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, 5(1), 57–62. <https://doi.org/10.35894/jtk.v5i1.424>
- Halman, H., Choiron, M., & Darmadi, D. (2018). Pengaruh Variasi Sambungan pada Crash Box Multi Segmen terhadap Kemampuan Penyerapan Energi dengan Uji Quasi Static. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 9(1), 43–49. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2018.009.01.7>
- Hidayat, A. K., & Wailanduw, A. G. (2018). Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Kemiringan Leading Edge Terhadap Karakteristik Aerodinamika Kendaraan Bus. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 07(03), 117–126.
- Hu, Q., Zhang, X., Zhang, J., Lu, G., & Tse, K. M. (2024). A review on energy absorption performance of auxetic composites with fillings. *Thin-Walled Structures*, 205(PA), 112348. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112348>
- Jusuf, A., Afdhal, A., & Mora, M. (2017). Kajian Desain Kelaiktabrakan Pesawat Terbang. *Warta Ardhia*, 42(3), 117–122. <https://doi.org/10.25104/wa.v42i3.241.117-122>

- Khaghani, O., Mostofinejad, D., & Abtahi, S. M. (2024). Auxetic structures in civil engineering applications: Experimental (by 3D printing) and numerical investigation of mechanical behavior. *Results in Materials*, 21(January), 100528. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100528>
- Kurniawan, W. (2012). *Analisis Penyerapan Energi Dan Deformasi Crash Box Persegi Panjang Dengan Variasi Bentuk Penampang Pada Uji Pendulum Impak Bumper* (hal. 87).
- Liu, Y., & Ding, L. (2016). A study of using different crash box types in automobile frontal collision. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 17(38), 21.1-21.5. <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.38.21>
- Liu, Y., & Hu, H. (2010). A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific Research and Essays*, 5(10), 1052–1063.
- Mir, M., Ali, M. N., Sami, J., & Ansari, U. (2014). Review of mechanics and applications of auxetic structures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2014/753496>
- Mulyati. (2015). Tegangan dan Regangan. *Bahan Ajar – Mekanika Bahan Politeknik Negeri Banyuwangi*, 1–14.
- Nuriman, A. (2015). *Makalah Polycarbonate* (hal. 1–10).
- Overbeck, M., Heimbs, S., Kube, J., & Hühne, C. (2024). Energy Absorption Properties of 3D-Printed Polymeric Gyroid Structures for an Aircraft Wing Leading Edge. *Aerospace*, 11(10), 1–21. <https://doi.org/10.3390/aerospace11100801>
- Prasetyoa, Nugrohob, A. W., & cahyo Budiyanoroc. (1981). Karakterisasi Sambungan Friction Stir Welding Polycarbonate (PC) Variasi Rasio Diameter Shoulder Dan Pin Tools Depth Plunge. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 52(1), 109. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(81\)90183-3](https://doi.org/10.1016/0030-4220(81)90183-3)
- Prihadianto, B. D., Darmo, S., Hasan, D. A., & Ananda, D. N. (2023). Analisis Kekuatan Tarik dan Regangan Filamen Carbon Fiber Hasil 3D Print dengan Variasi Fill Density. *Infotekmesin*, 14(2), 390–396. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v14i2.1936>
- Sitompul, S. A., & Herwanda, P. A. (2017). Analisis Tabrak Burung pada Vertical

- Stabilizer dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, 2(2), 38–44.
- Supian, A. B. M., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., & Ya, H. H. (2018). Hybrid reinforced thermoset polymer composite in energy absorption tube application: A review. *Defence Technology*, 14(4), 291–305. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.04.004>
- Susanto, P. C., & Keke, Y. (2020). Implementasi Regulasi International Civil Aviation Organization (ICAO) pada Penerbangan Indonesia. *Aviasi : Jurnal Ilmiah Kedirgantaraan*, 16(1), 53–65. <https://doi.org/10.52186/aviasi.v16i1.23>
- Tambunan, P., Warsiyanto, B. A., Yuniarti, E., & Fitriansyah, R. (2024). Analisis Respon Dinamik Windshield Pesawat Komuter 19 Penumpang Terhadap Fenomena Bird Strike Menggunakan Metode Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL). *Jurnal Mahasiswa Dirgantara*, 2(2), 115–126. <https://doi.org/10.35894/jmd.v2i2.26>
- Wakhidah, D. H., Dr. Eng., Moch. Agus Choiron, S. . M. T., & Moch. Syamsul Ma'arif, S. T. M. T. (2021). *Rekayasa Desain Multi-Cell Hybrid Crashbox Terhadap Penyerapan Energi Spesifik Dengan Simulasi Komputer*. <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/186510/>
- Wirawan, W. A., Junipitoyo, B., Putro, S. H. S., Sabitah, A., Suudy, A. H., Ridwan, R., & Choiron, M. A. (2024). Collapse Behavior and Energy Absorption Characteristics of Design Multi-Cell Thin Wall Structure 3D-Printed Under Quasi Statistic Loads. *Automotive Experiences*, 7(1), 149–160. <https://doi.org/10.31603/ae.10892>
- Wnuczek, K., & Podkoscielna, B. (n.d.). *PROPERTIES AND ENVIRONMENTAL IMPACT*.
- Yang, W., Li, Z.-M., Shi, W., Xie, B.-H., & Yang, M.-B. (2004). On auxetic materials: Review. *J. Mater. Sci.*, 39(February), 3269–3280.
- Yuniarti, E., Sitompul, S. A., & Warsiyanto, B. A. (2016). Analisis Numerik Pengaruh Geometri Burung Terhadap Tekanan Impak Pada Kasus Bird Strike Dengan Smoothed Particle Hydrodynamics (Sph) Model. *Jurnal Teknologi*

Kedirgantaraan, 5(1), 70–78. <https://doi.org/10.35894/jtk.v5i1.426>

Zhafrando, M. R. (2023). Analisis Numerik Bird Strike Pada Radome Dengan Struktur Sandwich. *Analisis Numerik Bird Strike Pada Radome Dengan Struktur Sandwich*, 11.