

**PENYERAPAN ENERGI DAN POLA DEFORMASI DESAIN
STRUKTUR *AIRFRAME LEADING EDGE AUXETIC* BERBAHAN
POLYCARBONATE 3D-PRINT PADA PEMBEBANAN *AXIAL
COMPRESSION***

PROYEK AKHIR



**PROGRAM STUDI DIPLOMA 3 TEKNIK PESAWAT UDARA
POLITEKNIK PENERBANGAN SURABAYA
2025**

**PENYERAPAN ENERGI DAN POLA DEFORMASI DESAIN
STRUKTUR *AIRFRAME LEADING EDGE AUXETIC* BERBAHAN
POLYCARBONATE 3D-PRINT PADA PEMBEBANAN *AXIAL
COMPRESSION***

PROYEK AKHIR

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



Oleh :

NAUFAL ALIANDA PRATAMA
NIT 30422015

**PROGRAM STUDI DIPLOMA 3 TEKNIK PESAWAT UDARA
POLITEKNIK PENERBANGAN SURABAYA
2025**

HALAMAN PERSETUJUAN

PENYERAPAN ENERGI DAN POLA DEFORMASI DESAIN STRUKTUR
AIRFRAME LEADING EDGE AUXETIC BERBAHAN *POLYCARBONATE 3D-
PRINT* PADA PEMBEBANAN *AXIAL COMPRESSION*

Oleh :

Naufal Alianda Pratama

NIT 30422015

Disetujui untuk diujikan pada :

Surabaya, 26 Maret 2025

Pembimbing I : Dr. Ir. WILLY ARTHA W., S.T., M.T.
NIP. 19930718 202321 1 025

Pembimbing II : Dr. SUYATMO, S.T., S.Pd., M.T
NIP. 19630510 198902 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

PENYERAPAN ENERGI DAN POLA DEFORMASI DESAIN STRUKTUR
AIRFRAME LEADING EDGE AUXETIC BERBAHAN *POLYCARBONATE 3D-
PRINT* PADA PEMBEBANAN *AXIAL COMPRESSION*

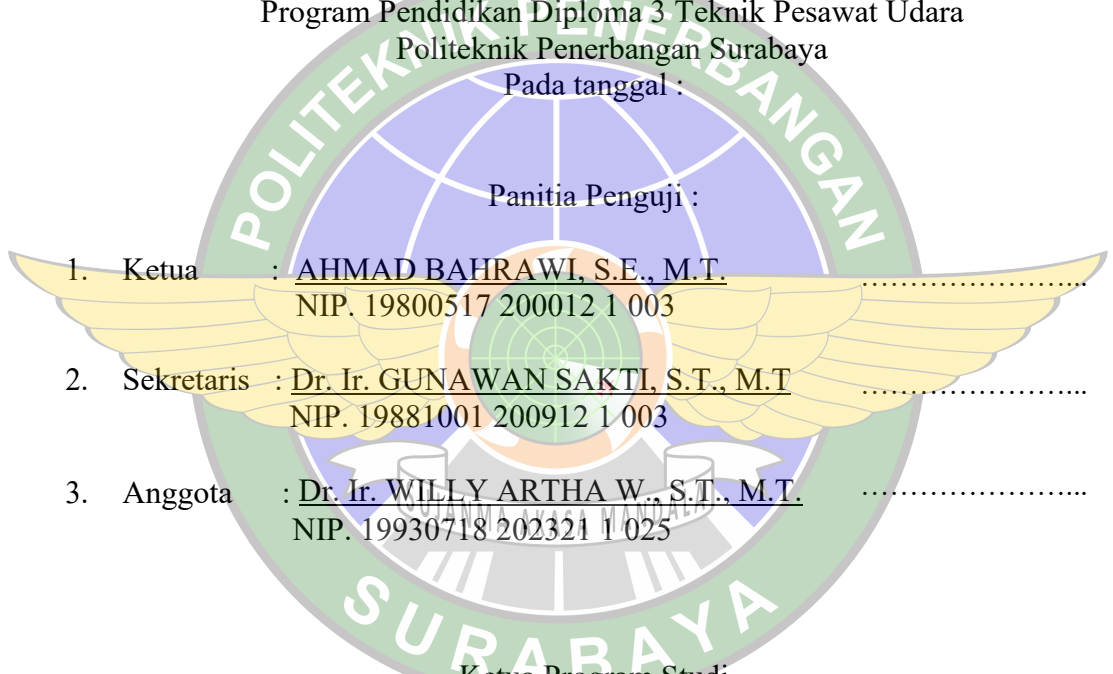
Oleh :
Naufal Alianda Pratama
NIT. 30422015

Telah dipertahankan dan dinyatakan lulus pada Ujian Tugas Akhir
Program Pendidikan Diploma 3 Teknik Pesawat Udara

Politeknik Penerbangan Surabaya

Pada tanggal :

Panitia Penguji :

- 
1. Ketua : AHMAD BAHRAWI, S.E., M.T.
NIP. 19800517 200012 1 003
 2. Sekretaris : Dr. Ir. GUNAWAN SAKTI, S.T., M.T.
NIP. 19881001 200912 1 003
 3. Anggota : Dr. Ir. WILLY ARTHA W., S.T., M.T.
NIP. 19930718 202321 1 025

Ketua Program Studi
Diploma 3 Teknik Pesawat Udara

NYARIS PAMBUDIYANTO, S.SiT, M. MTr

NIP. 19820525 200502 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyusun dan menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Penyerapan Energi dan Pola Deformasi Desain Struktur *Airframe Leading Edge Auxetic* Berbahan *Polycarbonate 3d-Print* Pada Pembebanan *Axial Compression*” ini dapat terselesaikan dengan baik. Penyusunan Tugas Akhir ini dimaksudkan sebagai salah satu syarat menyelesaikan pendidikan di Politeknik Penerbangan Surabaya serta untuk memperoleh gelar Ahli Madya (A.Md).

Selama penyusunan Tugas Akhir, tentu tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, kami haturkan banyak terima kasih kepada :

1. Allah SWT, Yang Maha Pencipta yang telah memberikan limpahan anugerah dan lindungan pada hamba-Nya.
2. Orang tua serta saudara yang senantiasa memberikan nasihat, doa, dan dukungan berupa moril maupun materiil sehingga penyusunan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
3. Seluruh Pegawai dan Teknisi Tenaga Honorer Unit Teknik Pesawat Udara yang memberikan ilmu dan data penelitian terkait Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Willy Artha Wirawan, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 1 dan Bapak Dr. Suyatmo, S.T., S.Pd., M.T. selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan waktu dan ilmu selama penyusunan laporan TA.
5. Bapak Nyaris Pambudiyatno, S.SiT., M.MTr. selaku Ketua Program Studi Teknik Pesawat Udara Politeknik Penerbangan Surabaya.
6. Bapak Ahmad Bahrawi, S.E., M.T selaku Direktur Politeknik Penerbangan Surabaya.
7. Seluruh dosen dan instruktur pengajar di Politeknik Penerbangan Surabaya yang telah membimbing kami selama ini.
8. Seluruh senior serta rekan – rekan taruna dan taruni Program Studi Teknik Pesawat Udara VIII Polteknik Penerbangan Surabaya yang telah membantu, memberi saran, kritikan serta doa
9. Semua pihak yang tidak dapat dituliskan satu persatu yang telah memabntu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Terlepas dari itu semua, Tugas Akhir ini tentu masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini di masa yang akan datang.

Surabaya, 11 Agustus 2025

Penyusun

Naufal Alianda Pratama

NIT. 30422015

ABSTRAK

Desain kelaiktabrakan menjadi aspek penting dalam meningkatkan keselamatan penerbangan, terutama pada bagian struktur *leading edge* pesawat yang rentan terhadap dampak tabrakan seperti *bird strike*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik penyerapan energi dan pola deformasi dari struktur *leading edge* pesawat berbentuk *auxetic* berbahan *polycarbonate* yang dibuat menggunakan teknologi *3D printing*. Pengujian dilakukan secara eksperimental menggunakan metode *quasi-static front load* untuk mensimulasikan beban aksial yang terjadi pada kondisi benturan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur *auxetic* memiliki kemampuan penyerapan energi yang baik dan menghasilkan pola deformasi spesifik seperti *concertina*, *diamond*, dan *buckling*. Pemanfaatan struktur *auxetic* terbukti mampu mendistribusikan beban dengan lebih merata, mengurangi konsentrasi tegangan, serta meningkatkan efisiensi energi yang diserap oleh material. Dengan demikian, desain *auxetic* berbahan *polycarbonate* dapat menjadi alternatif inovatif dalam meningkatkan *crashworthiness* pada struktur *airframe* pesawat.

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

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR ISTILAH	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Hipotesis.....	4
1.6 Manfaat Penelitian.....	5
1.7 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Teori Penunjang.....	8
2.1.1 <i>Crashworthiness</i> pada Pesawat	8
2.1.2 <i>Leading Edge</i>	8
2.1.3 Teori <i>Bird Strike</i>	9
2.1.4 Kriteria dan Parameter Kelaiktabrakan	10
2.1.5 <i>Crash Box</i>	13
2.1.7 <i>Auxetic Sturcture</i>	15
2.1.8 <i>Polycarbonate</i> Sebagai Material <i>Crash Box</i>	17
2.1.9 Sumbu <i>Axial</i> , <i>Lateral</i> , dan <i>Front Load</i>	18
2.1.10 <i>Quasi-Static Front Load</i>	20
2.1.11 Tegangan dan Regangan	20
2.1.12 Beban Impak	29
2.1.13 Deformasi.....	30
2.1.14 Absorpsi Energi.....	33
2.1.15 Analisa Hasil Uji Absorpsi Energi	34
2.2 Kajian Penelitian Terdahulu	37
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	40

3.1	Desain Penelitian	40
3.2	Variabel Penelitian	41
3.3	Metode Analisis Data	41
3.4	Material <i>Crash Box</i>	42
3.5	Desain Auxetic Structure.....	42
3.6	Metode Pembuatan <i>Crash Box</i>	44
3.7	Metode Pengolahan Data.....	45
3.8	Tanggal dan Waktu Penelitian.....	48
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		48
4.1	Hasil Eksperimen Reaksi Gaya	49
4.2	Hasil Penyerapan Energi	52
4.2.1	Nilai Serapan Energi	52
4.2.2	Hasil Perbandingan Nilai Serapan Energi.....	54
4.4	<i>Mean Force</i>	56
4.5	<i>CFE (Crush Force Efficiency)</i>	56
4.6	<i>SEA (Specific Energy Absorption)</i>	57
4.7	Hasil Eksperimen Pola Deformasi.....	58
BAB V KESIMPULAN		Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
5.1	Hasil Eksperimen Pola Deformasi.....	61
5.2	Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA.....		62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>leading edge in aircraft</i>	8
Gambar 2. 2 Ilustrasi <i>Bird Strike</i>	9
Gambar 2. 3 Kecelakaan Pesawat	10
Gambar 2. 4 Kurva Gaya tabrak	10
Gambar 2. 5 Kurva Gaya tabrak rata rata, terhadap panjang deformasi	11
Gambar 2. 6 Struktur <i>crushable subfloor</i> dan <i>crash box</i>	12
Gambar 2. 7 <i>Design Auxetic Structure</i>	15
Gambar 2. 8 Bahan <i>Polycarbonate</i>	16
Gambar 2. 9 Sumbu pada Pesawat	17
Gambar 2. 10 Skema Ekperimental <i>quasi-static test</i>	18
Gambar 2. 11 Diagram beban perpindahan.....	19
Gambar 2. 12 Energi regangan <i>Inelastic</i> dan <i>Elastic</i>	20
Gambar 2. 13 Diagram beban-perpindahan elastis	20
Gambar 2. 14 Pembebanan Batang pada Sisi Frontal.....	21
Gambar 2. 15 Pertambahan Panjang Batang.....	23
Gambar 2. 16 Tegangan Geser Pada Bidang	24
Gambar 2. 17 Elemen Persegi Panjang Mengalami Tegangan Geser.....	25
Gambar 2. 18 Perubahan Sudut Elemen Persegi Panjang.....	25
Gambar 2. 19 Perubahan Bantuk Elemen Persegi Panjang.....	26
Gambar 2. 20 Kurva Tegangan-Regangan.....	26
Gambar 2. 21 Perubahan Sudut Elemen Persegi Panjang.....	27
Gambar 2. 22 Model elemen <i>crash box</i> segi-empat.....	28
Gambar 2. 23 Pola deformasi <i>Crash Box</i>	30
Gambar 2. 24 Pola deformasi <i>Concertina</i>	31
Gambar 2. 25 Pola deformasi <i>Mix Mode</i>	31
Gambar 2. 26 Pola deformasi <i>Diamond</i>	32
Gambar 2. 27 Pola deformasi <i>Buckling</i>	32
Gambar 2. 28 Absorpsi Energi	33
Gambar 2. 29 Absorpsi Energi dan Pola Deformasi	33
Gambar 2. 30 Analisa Hasil Absorpsi Energi	35
Gambar 2. 31 <i>Software Origin Lab</i>	36
Gambar 2. 32 Tahapan Deformasi pada Kurva <i>Force Displacement</i>	36
Gambar 3. 1 Bagan Alir Penelitian	38
Gambar 3. 2 Spesifikasi Bahan <i>Polycarbonate</i>	40
Gambar 3. 3 Desain <i>Crash Box Auxetic Structure</i>	41
Gambar 3. 4 Sketsa <i>Crash Box</i>	42
Gambar 3. 5 Hasil Cetak <i>3D Print</i>	43
Gambar 3. 6 Skema Pengujian	44
Gambar 3. 7 <i>Software Microsoft Excel</i>	46
Gambar 3. 8 <i>Software Origin Lab</i>	47
Gambar 3. 9 Tanggal dan Waktu Penelitian	48

DAFTAR TABEL

Table 2.1 Kajian Penelitian Terdahulu Yang Relevan.....	21
Table 2.1 <i>Setting</i> Mesin <i>UTM</i>	44
Table 2.1 Spesifikasi Mesin <i>UTM</i>	45



DAFTAR ISTILAH

<i>(EA)</i>	<i>Energy Absorption</i>
<i>(IPF)</i>	<i>Initial Peak Force</i>
<i>(MF)</i>	<i>Mean Force</i>
<i>(CFE)</i>	<i>Crush Force Efficiency</i>
<i>(SEA)</i>	<i>Crush Force Efficiency</i>



DAFTAR PUSTAKA

- Alfadhila, H. (2022a). Pengaruh variasi ketebalan terhadap karakterisasi crashworthiness pada tabung berdinding tipis asam polilaktat (pla) dan nylon. *Jurnal UIN Syarif Hidayatullah Jakarta*.
- Ang, X. Y., Hassan, C. S., Soh, S. Y., Olugu, E. U., Abdullah, N. F., Yu, L. J., & Abdul Aziz, N. (2024). Evaluation of Automotive Bio-Composites Crash Box Performance. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 20(4), 10943–10952.
- Apriliani, E., & Si, M. (2017). *Lateral-Directional Stability Control Motion on Lsu-05 Aircraft By $\dot{I} \text{ Mi} \pm \infty$ Control Method* Ainun Kusnul Khotimah Nrp 1212 100 066.
- ARDIANTO, A. I. N. R. W. (2016). *ANALISIS UJI JATUH BADAN PESAWAT R80 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA PUBLIKASI ILMIAH*. 18.
- Ardianto, A. N. R. W. (2016). *ANALISIS UJI JATUH BADAN PESAWAT R80 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA*.
- Ardianysah, D., Sitompul, S. A., & Hendradjaja, S. S. (n.d.). *Corresponding Author:*
- Asti, C., Azzam, Y. A., Jusuf, A., & Gunawan, L. (n.d.). *Kaji numerik kelaikan tabrak struktur crashbox hibrid aluminium / GFRP dikenai beban impak aksial*.
- Azzahra Difa Rasyidah[1]., S. A. S., & . A. C. (n.d.). Analisis Kelaiktabrakan Dari Struktur Kolom Yang Diisi Dengan. *Analisis Kelaiktabrakan Dari Struktur Kolom Yang Diisi Dengan*, 10.
- 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>
- Bintarto, R., Atmaja, A., & Kusyairi, I. (2017). Analisis Penyerapan Energi Crash Box Pola Origami pada Pengujian Frontal Impact Posisi Angular Frontal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 8(1), 47–52.

- <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2017.008.01.7>
- Bukit, O., & Hartopo, H. (2016). *AIRFRAME AFTER BIRD STRIKE PADA AIRBUS A320-200 PK-AXM*. 6(2), 6–9.
- 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>
- Choiron, M.A., Darmadi, D.B., & Anwari, B.R. (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 Universitas Brawijaya*, 6(1).
- Dionisius, F., Istiyanto, J., & Rohmat, Y. N. (2017). *Pengembangan Pengujian Crashworthiness dengan Simulasi Numerik Menggunakan Model Impact Transferability*. 3, 12–17.
- Fareed, M. M., Lafta, O. A., & Said, M. R. (2017). The axial crushing of circular tube under quasi-static loading. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(16), 4818–4823.
- Fransisco, R., Afandi, S., & Rabeta, B. (2020). Analisis Numerik Efek Tumbukan dan Pola Deformasi Crash Box Berbentuk Origami. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, 5(1), 57–64.
- 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., & Mora, M. (2016). *Jurnal Perhubungan Udara Kajian Desain Kelaiktabrakan Pesawat Terbang A Review of Aircraft Crashworthiness Design*. 109–116.
- Liu, Y., & Hu, H. (2010). A review on auxetic structures and polymeric materials.

Scientific Research and Essays, 5(10), 1052–1063.

Mulyati, S. (2011). *Mekanika Bahan*. Institut Teknologi Padang.

Plassard, F., Hereil, P.-L., Joseph, P., & Mespoulet, J. (2015). Experimental and numerical study of a bird strike against a windshield. *EPJ Web of Conferences*, 94, 01051.

Santoso, D. W., & Wibowo, A. (2016). *PESAWAT B747-400*.

Saputra, H., Jamasri, J., & Heru, S. B. R. (2018). Pengembangan Komponen Penyerap Energi dari Bahan Komposit Serat Alam. *Disertasi Doktor Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada*.

Saputro, A.H.N. (2020). Analisis Penyerapan Energi dan Pola Deformasi Crash Box dengan Variasi Sudut Tirus Dinding dan Trigger Circles pada Uji Simulasi Pembebanan Quasi-Static. *Universitas Brawijaya*.

Setiawan, A. (2019). Analisis Plastik Jembatan Box Girder dengan Pendekatan Metode Garis Luluh. *Jurnal Teknik Rekayasa*, 23(2), 123-130.

Sitompul, S. A., & Herwanda, P. A. (2017). Analisis Tabrak Burung pada Vertical Stabilizer dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, 2(2), 38–44.

Suryadi, D. (2015). Analisa Pengaruh Deformasi Plastik terhadap Sifat Mekanik Logam. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(1), 45-52.

Velmurugan, R., & Muralikannan, R. (2009). Energy absorption characteristics of annealed steel tubes of various cross sections in static and dynamic loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 6(4), 385–412.

Wagih, A., Mahmoud, H. A., & Lubineau, G. (2024). 3D printed auxetic metal stiffener for lightweight metal–composite T-joints with high strength and toughness. *Materials and Design*, 241(January). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112963>

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>

Warsiyanto, B. A. (2020). Analisis Respon Dinamik Windshield Pesawat Komuter 19 Penumpang Terhadap Fenomena Bird Strike Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Mahasiswa Teknik, 1*(1).

Wirawan, W. A., Junipitoyo, B., Hariyadi, S., Putro, S., Yan 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. *Unimma, 7*(1), 149–160.

Wirawan, W., Aghastya, A., Astuti, S. W., Rachman, N. F., Suprpto, S., & Purwantiningsih, Y. T. (2021a). Pemodelan simulasi tabung penyerap energi crash box sebagai teknologi keselamatan pasif berbasis software FEM (Finite Elemen Methode). *Prosiding Seminar Nasional Sains Teknologi Dan Inovasi Indonesia (SENASTINDO)*, 3, 33–40.

Wirawan, W., Aghastya, A., Astuti, S. W., Rachman, N. F., Suprpto, S., & Purwantiningsih, Y. T. (2021b). Pemodelan simulasi tabung penyerap energi crash box sebagai teknologi keselamatan pasif berbasis software fem (finite elemen methode). *Prosiding Seminar Nasional Sains Teknologi Dan Inovasi Indonesia (SENASTINDO)*, 3(November), 33–40.