

TUGAS AKHIR - TM234802

**STUDI EXPERIMENTAL CRAHSWORTHINESS PADA
CRASHBOX BERBASIS STRUKTUR SANDWICH
ALUMINIUM DAN AUXETIC ANTI-TETRACHIRAL
MELALUI UJI QUASI-STATIC**

MUHAMMAD IRFAN FEBRIANSYAH

NRP 5007211115

Dosen Pembimbing

Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng

NIP 198006272012121003

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



TUGAS AKHIR - TM234802

**STUDI EXPERIMENTAL CRAHSWORTHINESS PADA
CRASHBOX BERBASIS STRUKTUR SANDWICH
ALUMINIUM DAN AUXETIC ANTI-TETRACHIRAL
MELALUI UJI QUASI-STATIC**

MUHAMMAD IRFAN FEBRIANSYAH

NRP 5007211115

Dosen Pembimbing

Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng

NIP 198006272012121003

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TM234802

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CRASHWORTHINESS OF A CRASHBOX BASED ON ALUMINIUM AND ANTI-TETRACHIRAL AUXETIC SANDWICH STRUCTURES UNDER QUASI-STATIC

MUHAMMAD IRFAN FEBRIANSYAH

NRP 5007211115

Advisor

Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng

NIP 198006272012121003

Study Program Undergraduate

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Technology and Industrial System

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMENTAL CRASHWORTHINESS PADA CRASHBOX BERBASIS STRUKTUR SANDWICH ALUMINIUM DAN AUXETIC ANTI- TETRACHIRAL MELALUI UJI QUASI-STATIC

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **Muhammad Irfan Febriansyah**

NRP. 5007211115

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng
198006272012121003 Pembimbing
2. Prof. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA
196508101991021001 Penguji I
3. Ir. Julendra B. Ariateja, MT
196807061999031004 Penguji II
4. Indra Sidharta, ST, MSc, IPM, AEng
198006192006041004 Penguji III



SURABAYA

Januari, 2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CRASHWORTHINESS OF A CRASHBOX BASED ON ALUMINIUM AND ANTI-TETRACHIRAL AUXETIC SANDWICH STRUCTURES UNDER QUASI-STATIC

FINAL PROJECT

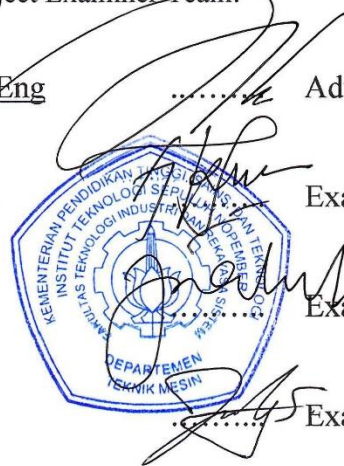
Submitted to fulfill one of the requirements
For obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **Muhammad Irfan Febriansyah**

NRP. 5007211115

Approved by Final Project Examiner Team.

1. Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng
198006272012121003
2. Prof. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA
196508101991021001
3. Ir. Julendra B. Ariateja, MT
196807061999031004
4. Indra Sidharta, ST, MSc, IPM, AEng
198006192006041004



..... Advisor

..... Examiner I

..... Examiner II

..... Examiner III

SURABAYA

January, 2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama Mahasiswa/NRP : Muhammad Irfan Febriansyah/5007211115

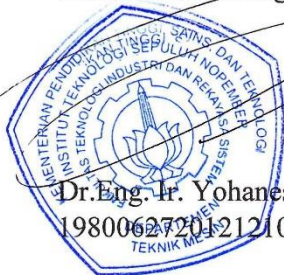
Program Studi : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing/NIP: Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng/198006272012121003

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “STUDI EKSPERIMENTAL CRASHWORTHINESS PADA CRASHBOX BERBASIS STRUKTUR SANDWICH ALUMINIUM DAN AUXETIC ANTI-TETRACHIRAL MELALUI UJI QUASI-STATIC” adalah hasil karya saya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui,
Dosen Pembimbing



Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng
198006272012121003

Surabaya, 29 Januari 2026

Mahasiswa



Muhammad Irfan Febriansyah
5007211115

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersign below:

Name of Student/NRP : Muhammad Irfan Febriansyah /5007211115

Departement : Mechanical Engineering

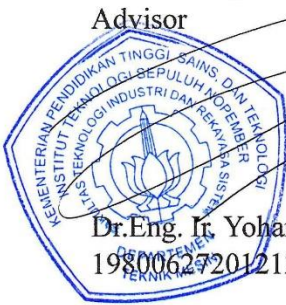
Advisor/NIP : Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng/198006272012121003

Hereby declare that the Final Project with the title of "EXPERIMENTAL STUDY ON THE CRASHWORTHINESS OF A CRASHBOX BASED ON ALUMINIUM AND ANTI-TETRACHIRAL AUXETIC SANDWICH STRUCTURES UNDER QUASI-STATIC" is the result of my own work is original, and written by folloowin rules of scientific writing.

If in future there is an a discrepancy with the statement, then I am willing to accept sanctions in accordance to the provisions applied at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 January 2026

Acknowledge,
Advisor



Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng
198006272012121003

Student

A handwritten signature in blue ink, belonging to Muhammad Irfan Febriansyah, is written over the "Student" label.

Muhammad Irfan Febriansyah
5007211115

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMENTAL CRASHWORTHINESS PADA CRASHBOX BERBASIS STRUKTUR SANDWICH ALUMINIUM DAN AUXETIC ANTI-TETRACHIRAL MELALUI UJI QUASI-STATIC

Nama Mahasiswa / NRP : Muhammad Irfan Febriansyah / 500721115
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng

Abstrak

Crashbox merupakan komponen keselamatan pasif kendaraan yang berfungsi menyerap energi benturan untuk meminimalkan cedera penumpang. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja *crashworthiness* melalui pengembangan struktur *hybrid* berbasis *sandwich* yang menggabungkan tabung aluminium dan struktur *auxetic* polimer (PLA+) dengan topologi *anti-tetrachiral*. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan uji tekan *quasi-static* dengan kecepatan 5mm/menit untuk mengevaluasi pengaruh penggabungan material dan variasi susunan lapisan terhadap parameter *Initial Peak Force* (IPF), *Mean Crushing Force* (MCF), *Crushing Force Efficiency* (CFE), dan *Specific Energy Absorption* (SEA). Spesimen uji terdiri dari konfigurasi *baseline* (komponen tunggal) aluminium *tube* dan *auxetic tube* beserta konfigurasi *hybrid sandwich* tiga lapis, yaitu *Dual Auxetic* (Auxetic-Aluminium-Auxetic) dan *Dual Aluminium* (Aluminium-Auxetic-Aluminium). Berdasarkan analisis komparatif, konfigurasi *Dual Aluminium* ditetapkan sebagai desain terbaik yang menghasilkan nilai SEA tertinggi sebesar 4,76 J/g dengan efisiensi gaya (CFE) sebesar 43,82%. Keunggulan konfigurasi ini disebabkan oleh terbentuknya formasi *sandwich* ideal (*Face-Core-Face*), di mana lapisan aluminium sebagai kulit (*face*) memberikan kekakuan tinggi dan menahan struktur inti (*core*) *auxetic* agar bekerja maksimal dalam menyerap energi melalui densifikasi material tanpa mengalami kegagalan dini. Penelitian ini membuktikan bahwa aplikasi struktur *sandwich hybrid* dengan susunan yang tepat dapat meningkatkan efisiensi penyerapan energi pada *crashbox* kendaraan.

Kata kunci: *Auxetic anti-tetrachiral, Crashbox, Crashworthiness, Struktur Sandwich, Uji Quasi-static.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRAC

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CRASHWORTHINESS OF A CRASHBOX BASED ON ALUMINIUM AND ANTI-TETRACHIRAL AUXETIC SANDWICH STRUCTURES UNDER QUASI-STATIC

Student Name / NRP : Muhammad Irfan Febriansyah / 500721115
Department : Mechanical Engineering FTIRS - ITS
Advisor : Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng

Abstract

The crashbox is a passive vehicle safety component designed to absorb impact energy to minimize passenger injury. This study aims to enhance crashworthiness performance through the development of a hybrid sandwich structure combining aluminium tubes and polymer (PLA+) auxetic structures with an anti-tetrachiral topology. The research methodology involved experimental quasi-static compression testing at a speed of 5 mm/min to evaluate the effects of material combination and layering sequences on Initial Peak Force (IPF), Mean Crushing Force (MCF), Crushing Force Efficiency (CFE), and Specific Energy Absorption (SEA). Test specimens consisted of baseline configurations (single component) of aluminium and auxetic tubes, as well as three-layer hybrid sandwich configurations, namely Dual Auxetic (Auxetic-Aluminium-Auxetic) and Dual Aluminium (Aluminium-Auxetic-Aluminium). Based on comparative analysis, the Dual Aluminium configuration was identified as the optimal design, yielding the highest SEA of 4.76 J/g with a Crushing Force Efficiency (CFE) of 43.82%. The superiority of this configuration is attributed to the formation of an ideal sandwich structure (Face-Core-Face), where the aluminium layers act as faces providing high stiffness and confining the auxetic core, forcing it to maximize energy absorption through material densification without premature failure. This study demonstrates that the application of hybrid sandwich structures with the appropriate stacking sequence can effectively improve the energy absorption efficiency of vehicle crashboxes.

Keywords: Anti-tetrachiral Auxetic, Crashbox, Crashworthiness, Quasi-static Test, Sandwich Structure.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil'alamin. Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Azza Wa Jalla atas limpahan rahmat, hidayah, rizki dan izin-Nya sehingga penyusunan laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, yaitu Heri Hermansyah dan Estu Diajeng Susetyowati serta Kakak Muhammad Rafi Raidiansyah yang telah memberikan banyak dukungan dan doa sehingga penulis mampu menyelesaikan penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Dr.Eng. Ir. Yohanes, ST, MSc, IPM, AEng selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan, nasihat, dan dorongan kepada penulis selama menyusun skripsi. Terima kasih atas bimbingan, tuntunan, dan saran selama proses penyelesaian skripsi ini.
3. Prof. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA, Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, MT, dan Bapak Indra Sidharta, ST, MSc, IPM, AEng selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Teman-teman satu bimbingan tugas akhir yaitu M. Fauzan Rivaldi Daniswara, Aly Zain Al Abidien, dan Ahmad Hashfi Izdirahudin yang telah saling membantu bersama penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Teman-teman laboratorium Mekanika Benda Padat yang telah memberikan dukungan kepada penulis.
6. Semua pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu penulis selama penyusunan skripsi.

Penulis sadar bahwa penulisan Laporan Tugas Akhir ini masih belum sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi positif dan menambah ilmu yang bermanfaat bagi pembaca, khususnya keluarga besar Departemen Teknik Mesin dan Civitas Akademik ITS. Selain itu, semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang akan mengembangkannya

Surabaya, 2 Februari 2026

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	..ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRAC	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.2 Dasar Teori.....	5
2.2.1 Poisson's Ratio.....	5
2.2.2 Struktur <i>Auxetic</i>	5
2.2.3 <i>Poly Lactic Acid</i> (PLA)	9
2.2.4 <i>Crashworthiness Indicators</i>	11
2.2.4.1 <i>Initial Peak Force</i> (IPF)	11
2.2.4.2 <i>Total Energy Absorption</i> (EA)	12
2.2.4.3 <i>Mean crushing force</i> (MCF)	12
2.2.4.4 <i>Specific Energy Absorption</i> (SEA).....	12
2.2.4.5 <i>Crushing Force Efficiency</i> (CFE)	13
2.2.5 <i>Crashworthiness Design Criteria</i>	13
2.2.6 <i>Sandwich Structure</i>	14
2.2.7 Cohen's D (<i>Effect Size</i>).....	14
2.2.8 Two Samples Independent T-Test	15
BAB 3 METODOLOGI	19
3.1 Diagram Alir Penelitian	19

3.2 Desain dan Material Spesimen	20
3.2.1 Desain <i>Auxetic</i> Anti-tetrachiral <i>Tube</i>	20
3.2.2 Material <i>Auxetic Tube</i>	21
3.2.3 Desain Aluminum <i>Tube</i>	22
3.2.4 Material Aluminum <i>Sheet</i>	22
3.3 Tahapan Pembuatan Spesimen	23
3.3.1 Pembuatan Desain Geometri <i>Auxetic</i>	23
3.3.2 Pembuatan <i>Auxetic Tube</i> (3D Print)	25
3.3.3 Penggabungan Antara aluminium <i>Sheet</i> dengan <i>Auxetic Tube</i>	27
3.4 Prosedur Pengujian	28
3.5 Metode Pengolahan Data Hasil Pengujian	30
3.6 Rancangan Penelitian Experimental	31
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Evaluasi <i>Crashworthiness</i> Parameter	33
4.1.1 Karakteristik Kurva <i>load-displacement</i>	35
4.1.2 Initial Peak Force (IPF)	37
4.1.3 Mean Crushing Force (MCF)	38
4.1.4 Crushing Force Efficiency (CFE)	39
4.1.5 Specific Energy Absorption (SEA)	41
4.2 Pola Keruntuhan dan Mekanisme Deformasi	43
4.2.1 Mekanisme Deformasi Struktur Komponen Tunggal (<i>Baseline</i>)	43
4.2.2 Interaksi Antar-Lapisan dan Efek Sinergi pada Konfigurasi Hybrid	46
4.2.3 Evaluasi Poisson's Rasio	48
4.3 Analisis Pengaruh Jumlah Lapisan	50
4.4 Perbandingan Performa dan Potensi Aplikasi	53
4.4.1 Pemetaan Kinerja <i>Crashworthiness</i>	53
4.4.2 Potensi Aplikasi Tiap Konfigurasi	54
4.5 Analisis Penambahan Lem adhesif	55
4.5.1 Karakteristik Kurva Gaya	55
4.5.2 Evaluasi Poisson's Ratio	56
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Kesimpulan	59

5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	67
BIODATA PENULIS	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perkembangan Penelitian <i>Crashbox</i> Berdasarkan Geometri dan Material .	4
Gambar 2.2 Skema untuk deformasi 2D dengan efek rasio poisson positif	5
Gambar 2.3 (a) Skematis untuk 2D Deformasi dari Negative Poisson's Ratio (b) Tipe-tipe Pola Struktur <i>Auxetic</i> Dengan Negative Poisson's Ratio	6
Gambar 2.4 Desain <i>Auxetic</i> Chiral (a) Trichiral; (b) Anti-trichiral; (c) Tetrachiral; (d) Anti-tetrachiral.....	6
Gambar 2.5 Experimental Data Dari Berbagai Variasi Poisson's Ratio Terhadap Disipasi Energi (Bianchi et al., 2008).....	8
Gambar 2.6 Experimental data dalam loading– unloading tests pada berbagai temperatur Symbol : T°C (– T = 23; • – T = 30; * – T = 35; ★ – T = 40; ◇ – T = 45; Δ – T = 50).	11
Gambar 2.7 Area Energy Absorption Pada Kurva Displacement-force (Yao et al., 2023)	12
Gambar 2.8 Skematik dari <i>Sandwich Structure</i> (Zenkert, 1995)	14
 Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	19
Gambar 3.2 Desain Topologi Unit Cell <i>Auxetic</i> Anti-tetrachiral.....	20
Gambar 3.3 (a) Topologi unit cell Anti-Tetrachiral dan (b) Dimensi <i>Auxetic Tube</i>	21
Gambar 3.4 Dimensi spesimen aluminium <i>tube</i> (a) tampak depan (b) tampak atas.....	22
Gambar 3.5 Sketsa 2D Lingkaran	23
Gambar 3.6 Hasil Extrude Sketsa 2D Lingkaran.....	23
Gambar 3.7 Plat Persegi Panjang (<i>Sheet</i>).....	23
Gambar 3.8 Pola Anti-tetrachiral pada permukaan <i>Sheet</i>	24
Gambar 3.9 <i>Sheet</i> yang Telah di Extrude Cut dengan Pola Anti-tetrachital.....	24
Gambar 3.10 <i>Auxetic tube</i> Anti-tetrachiral	24
Gambar 3.11 Penyatuan Bagian <i>Tube</i>	25
Gambar 3.12 Tampilan Slicing pada Creality Print.....	26
Gambar 3.13 Proses Pencetakan <i>Auxetic Tube</i>	26
Gambar 3.14 Hasil 3D Printing <i>Auxetic Tube</i>	27
Gambar 3.15 Dimensi Aluminum <i>sheet</i>	27
Gambar 3.16 Kontrol Pengeleman.....	27
Gambar 3.17 Proses Penjepitan dan Pengeleman	28
Gambar 3.18 Konfigurasi Spesimen (a) <i>Auxetic Tube</i> Anti-tetrachiral (baseline); (b) Aluminum <i>Tube</i> (baseline); (c) Dual <i>Auxetic</i> (tiga lapis (AU-AL-AU), dengan dua lapis <i>auxetic</i> dan satu lapis alumunium di bagian tengah); (d) Dual Aluminum(tiga lapis (AL-AU-AL)	28
Gambar 3.19 Penimbangan Salah Satu Massa Spesimen	28
Gambar 3.20 Set-up Pengujian Tekan Quasi-static	30
Gambar 3.21 Hasil grafik <i>load-displacement</i> pengujian tekan.....	30

Gambar 3.22 Luas daerah untuk serapan energi	30
Gambar 3.23 Tampilan pengolahan data pada OriginPro.....	31
Gambar 4.1 Perbandingan Nilai Keseluruhan Parameter Crashworthiness.....	34
Gambar 4.2 Grafik Kurva <i>Load-displacement</i> Konfigurasi Baseline (a) aluminium <i>tube</i> (b) <i>Auxetic tube</i>	35
Gambar 4.3 Grafik Kurva <i>Load-displacement</i> Konfigurasi Hybrid Dual <i>Auxetic</i>	36
Gambar 4.4 Grafik Kurva <i>Load-displacement</i> Konfigurasi Hybrid Dual aluminium ..	36
Gambar 4.5 Perbandingan Nilai Parameter IPF Setiap Konfigurasi.....	37
Gambar 4.6 Uji Statistik Pada Parameter IPF	38
Gambar 4.7 Perbandingan Nilai MCF Setiap Konfigurasi	38
Gambar 4.8 Uji Statistik Pada Parameter MCF	39
Gambar 4.9 Perbandingan Nilai CFE Setiap Konfigurasi	40
Gambar 4.10 Uji Statistik Pada Parameter CFE	40
Gambar 4.11 Perbandingan Nilai SEA Setiap Konfigurasi	41
Gambar 4.12 Batas Penentuan Deformasi Efektif	42
Gambar 4.13 Uji Statistik Pada Parameter SEA	42
Gambar 4.14 Pola Keruntuhan Spesimen 3 (aluminium <i>tube</i>)	43
Gambar 4.15 Pola Keruntuhan Spesimen 5 (<i>Auxetic tube</i>).....	44
Gambar 4.16 Pola <i>buckling</i> Mode Asimetris Wajik (diamond) (Guillow et al, 2001) .	44
Gambar 4.17 <i>Twisting Deformation</i> Pada <i>Auxetic</i> Anti-tetrachiral	45
Gambar 4.18 Negatif Poisson's Ratio Pada <i>Auxetic Tube</i>	45
Gambar 4.19 Keruntuhan Spesimen 12 (Dual <i>Auxetic</i>).....	46
Gambar 4.20 Pola Keruntuhan Spesimen 12 (Dual aluminium)	47
Gambar 4.21 Delaminasi Lokal Pada Dual <i>Auxetic</i>	47
Gambar 4.22 Struktur Sandwich Dual aluminium.....	48
Gambar 4.23 Negatif Poisson's Ratio <i>Auxetic Tube</i>	49
Gambar 4. 24 Possion's Ratio Dual auxetic.....	49
Gambar 4.25 Perbandingan Susunan Lapisan: Konfigurasi Tiga Lapis dengan Dua Lapis	50
Gambar 4.26 Perbandingan Parameter Crashworthiness Antara Susunan Dua Lapis dan Tiga Lapis	51
Gambar 4.27 Grafik SEA-CFE	53
Gambar 4.28 Pemetaan Potensi Aplikasi.....	54
Gambar 4.29 Komparasi Dual <i>Auxetic</i> Lem Dan Tanpa Lem	55
Gambar 4.30 Komparasi Dual Aluminium Lem dan Tanpa Lem	55
Gambar 4.31 Poisson's Ratio Dual <i>Auxetic</i> Tanpa Lem.....	56

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perkembangan Penelitian <i>Crashbox</i> Berdasarkan Geometri dan Material.....	3
Tabel 2.2 Nilai NPR Topologi <i>Auxetic</i>	7
Tabel 2.3 Komparasi <i>Crashworthiness Indicator</i> Topologi <i>Auxetic</i>	8
Tabel 2.4 Perbandingan Properti Mekanik Antara ABS, PLA, dan PETG ((SUNLUFilament Technical Data <i>Sheet</i> , http://www.3dsunlu.com/))	10
Tabel 2.5 Interpretasi effect size berdasarkan nilai cohen's d (d value).....	15
Tabel 2.6 <i>Two tail table</i>	16
Tabel 3.1 Dimensi unit cell Spesimen Anti-tetrachiral.....	21
Tabel 3.2 Properties Material PLA+ SUNLU	22
Tabel 3.3 Properties Material Aluminum 3003 (MatWeb. (n.d.). Aluminum(Al))	22
Tabel 3.4 3D Print Setting	25
Tabel 3.5 Spesifikasi Mesin 3D Printing Creality Ender-3 V3 KE	26
Tabel 3.6 Massa spesimen pada setiap konfigurasi spesimen uji	29
Tabel 3.7 Spesifikasi Mesin UTM SALT ST-1001 C	29
Tabel 3.8 Rancangan Penelitian Eksperimental	31
Tabel 4.1 Hasil Uji Parameter <i>Crashworthiness</i> Seluruh Spesimen	33
Tabel 4.2 <i>Crashworthiness</i> Parameter Konfigurasi Dual Lem dan Tanpa Lem	56

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Crashbox merupakan komponen vital pada sistem keselamatan pasif kendaraan yang berfungsi menyerap energi kinetik melalui deformasi struktur dinding tipis (*thin-wall*) saat terjadi tabrakan (Hussain et al., 2017). Namun, tantangan utama pada desain *crashbox* konvensional adalah kecenderungan menghasilkan gaya puncak (*Initial Peak Force*) yang terlalu tinggi sebelum memasuki fase deformasi plastis. Kondisi ini berisiko mencederai penumpang akibat deselerasi mendadak, sehingga diperlukan optimasi desain struktur yang mampu memaksimalkan penyerapan energi namun tetap menjaga gaya reaksi dalam batas aman (Tarlochan et al., 2014).

Salah satu pendekatan material untuk menjawab tantangan tersebut adalah penggunaan struktur *auxetic*. Berbeda dengan material konvensional, *auxetic* memiliki karakteristik *Negative Poisson's Ratio* (NPR) di mana struktur akan memadat ke arah tengah (densifikasi) saat menerima beban tekan (Lakes et al., 1987). Perilaku unik ini sangat menguntungkan karena dapat meningkatkan densitas penyerapan energi dan ketahanan geser material (Alomarah et al., 2020). Guna memaksimalkan potensi mekanik tersebut dalam aplikasi *crashbox*, material *auxetic* idealnya tidak bekerja sendiri, melainkan diintegrasikan ke dalam sistem struktur *sandwich*.

Dalam prinsip struktur *sandwich*, material inti (*core*) bertugas menstabilkan lapisan kulit (*face sheet*) agar tidak mengalami kegagalan tekuk (*buckling*) dini, sementara kulit menahan beban utama (Zenkert, 1997). Penggunaan *core auxetic* menawarkan keunggulan dibandingkan inti *honeycomb* konvensional yang memiliki NPR positif. Sifat NPR pada *auxetic* memungkinkannya menarik kulit ke dalam saat terdeformasi, meminimalisir risiko lepasnya ikatan antar-lapisan, dan menciptakan integritas struktur yang lebih solid (Imbalzano et al., 2018).

Akan tetapi, fabrikasi *auxetic* berbahan logam murni memiliki kendala kompleksitas geometri dan biaya manufaktur yang tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan solusi melalui desain struktur *hybrid sandwich* yang memadukan fleksibilitas manufaktur *3D printing* polimer (PLA) sebagai *core auxetic* dengan tabung aluminium sebagai *face sheet*. Kombinasi ini diharapkan menciptakan interaksi sinergis di mana *auxetic core* (NPR) dan aluminium *face* (Positif Poisson's Ratio) saling menahan deformasi lateral, menghasilkan mekanisme *progressive crushing* yang lebih stabil dan efisien dibandingkan komponen tunggalnya (Zhang C et al., 2024).

Berdasarkan pemaparan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja *crashworthiness* dari struktur *hybrid aluminium-auxetic* melalui uji tekan *quasi-static*. Fokus utama penelitian adalah menganalisis pengaruh variasi konfigurasi susunan lapisan terhadap parameter kunci seperti *Initial Peak Force* (IPF), *Mean Crushing Force* (MCF), *Specific Energy Absorption* (SEA), dan *Crushing Force Efficiency* (CFE). Hasil analisis ini diharapkan dapat menentukan konfigurasi desain terbaik yang mampu memberikan perlindungan optimal bagi penumpang kendaraan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang melatarbelakangi penelitian ini antara lain:

1. Seberapa besar pengaruh penggabungan antara *auxetic* dan aluminium *tube* terhadap performa *crashworthiness*?
2. Apakah susunan komponen pada konfigurasi hybrid memiliki pengaruh terhadap parameter kinerja *crashworthiness*?
3. Susunan komponen manakah yang memberikan kinerja *crashworthiness* terbaik?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi pengaruh penggabungan struktur *auxetic* dan aluminium *tube* terhadap karakteristik *crashworthiness*.
2. Menganalisis pengaruh perbedaan susunan komponen pada konfigurasi hybrid terhadap parameter kinerja *crashworthiness*.
3. Menentukan susunan komponen yang memberikan performa *crashworthiness* terbaik.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian ini antara lain :

1. Pengujian dilakukan menggunakan metode tekan quasi-static dengan laju deformasi konstan 5mm/menit.
2. Material polimer yang digunakan untuk pembuatan struktur *auxetic* dibatasi pada jenis filamen PLA+ dari pabrikan SUNLU, dan material logam dibatasi pada Aluminium 3003.
3. Topologi *unit cell* difokuskan pada bentuk *auxetic* Anti-Tetrachiral.
4. Parameter proses 3D printing (seperti nozzle temp, bed temp, print speed) ditetapkan konstan untuk seluruh spesimen *auxetic*.
5. Aplikasi perekatan epoxy pada spesimen hybrid dilakukan dengan perlakuan seragam, di mana rasio campuran dan volume adhesif yang diaplikasikan ditetapkan sama rata.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat memberikan opsi desain *crashbox* untuk meningkatkan *crashworthiness* ketika terjadi tabrakan.
2. Berkontribusi pada peningkatan keselamatan berkendara dengan memberikan perlindungan yang lebih baik bagi penumpang dan komponen penting saat terjadi tabrakan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

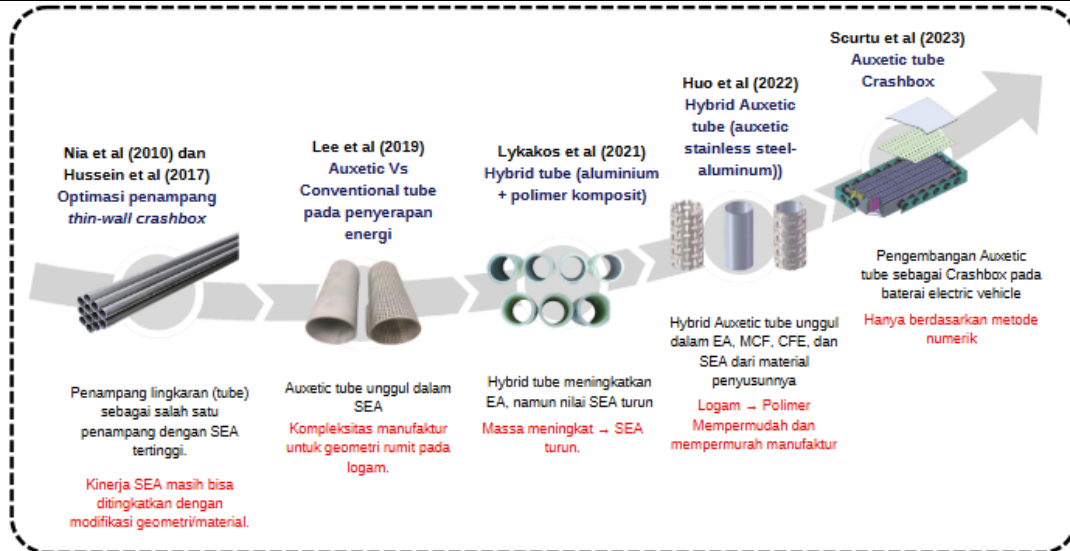
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Sebelum menentukan arah penelitian, penting untuk melihat bagaimana desain *crashbox* terus dikembangkan dari waktu ke waktu. Berbagai macam bentuk dan material telah diteliti sebagai dasar design untuk pembuatan *crashbox*. Berikut adalah perkembangan dari hasil penelitian terdahulu:

Tabel 2.1 Perkembangan Penelitian *Crashbox* Berdasarkan Geometri dan Material

Peneliti	Fokus Penelitian	Temuan Kunci	Keterbatasan	Arah Pengembangan
Nia et al (2010) Hussein et al (2017)	Optimasi penampang <i>thin-wall crashbox</i>	Penampang lingkaran (<i>tube</i>) memiliki SEA tertinggi.	Kinerja SEA masih bisa ditingkatkan dengan modifikasi geometri/material.	Pengembangan struktur <i>auxetic</i> untuk meningkatkan SEA
Lee et al (2019)	Perbandingan <i>Auxetic tube</i> dengan <i>Conventional tube</i> Pada penyerapan energi	<i>Auxetic tube</i> unggul dalam SEA akibat geometrinya yang <i>porous</i> sehingga massanya berkurang.	Kompleksitas manufaktur untuk geometri rumit pada logam.	Eksplorasi material <i>auxetic</i> polimer yang lebih ringan dan mudah dibuat.
Lykacos et al (2021)	Hybrid <i>tube</i> (aluminium + polimer komposit)	Hybrid <i>tube</i> meningkatkan EA, namun nilai SEA turun	Massa meningkat → SEA turun.	Kombinasi material dengan sifat Poisson's ratio berlawanan untuk optimasi SEA.
Huo et al (2022)	Hybrid <i>Auxetic tube</i> (<i>auxetic</i> stainless steel-aluminium)	Hybrid <i>tube</i> unggul dalam EA, MCF, CFE, dan SEA dari material penyusunnya	Biaya tinggi dan berat akibat material logam.	Penggantian logam <i>auxetic</i> dengan polimer <i>auxetic</i> (PLA+) untuk mengurangi biaya dan mengurangi kompleksitas manufaktur.
Scurtu et al (2023)	<i>Auxetic tube</i> Electric	Dimensi geometris dan	Hanya pada numerical	Pengembangan <i>Auxetic tube</i>

	vehicle battery Crashbox	volume keseluruhan baterai meningkat	method, dan tidak terlalu membahas Crashworthiness	hybrid untuk crashbox kendaraan
--	--------------------------	--------------------------------------	--	---------------------------------



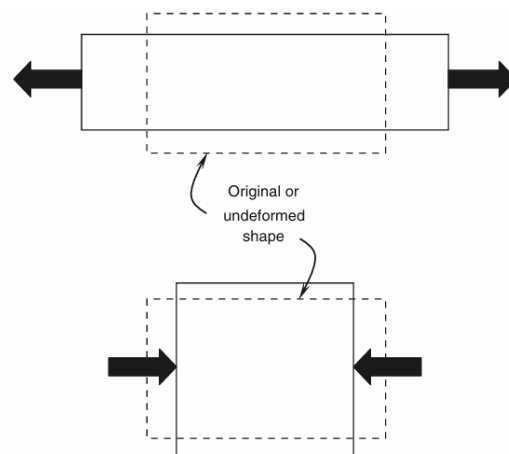
Gambar 2.1 Perkembangan Penelitian *Crashbox* Berdasarkan Geometri dan Material

Bertolak dari celah dan hambatan yang ditemukan pada riset-riset sebelumnya, penelitian ini berupaya memberikan kontribusi melalui pengembangan desain *crashbox hybrid* yang memadukan polimer PLA *auxetic* dengan aluminium. Konfigurasi ini diharapkan mampu menjadi solusi alternatif yang lebih ekonomis, mudah dipabrikasi, namun tetap mempertahankan performa *crashworthiness* yang optimal.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Poisson's Ratio

Sudah diketahui secara umum dan bahkan jelas bahwa ketika material ditarik pada satu arah, mereka akan berkontraksi atau menyusut ke arah melintang(*transverse*) dari arah pembebanan, seperti yang terlihat pada gambar 2.2(atas). Hal itu juga berlaku secara berkebalikan. Jika material ditekan, maka material akan mengembang ke arah melintang, seperti yang digambarkan pada gambar 2.2(bawah).



Gambar 2.2 Skema untuk deformasi 2D dengan efek rasio poisson positif (Lim, 2015)

Poisson's ratio (ν), didefinisikan sebagai:

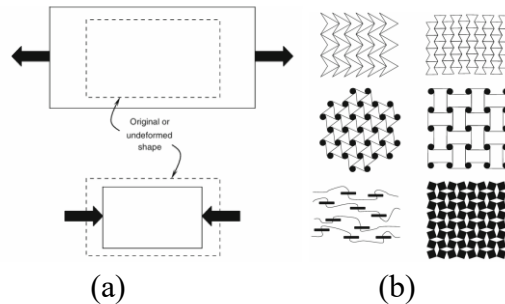
$$\nu = -\frac{\epsilon_{Trans}}{\epsilon_{Load}} \quad (2.1)$$

Dimana ϵ_{Load} adalah strain(regangan) pada arah pembebanan sementara ϵ_{Trans} adalah strain pada arah melintang atau tegak lurus dari arah pembebanan. Karena sangat umum, dan bahkan intuitif, untuk keduanya memiliki nilai yang berkebalikan, maka ratio $\epsilon_{Load}/\epsilon_{Trans}$ akan bernilai negatif. Maka dari itu, tanda negatif pada persamaan 2.1 diperkenalkan untuk mendapatkan nilai positif pada poisson's ratios.

2.2.2 Struktur Auxetic

Auxetic merupakan istilah bagi material atau struktur yang memiliki negative Poisson's ratio, artinya ketika material tersebut diregang (ditarik), justru akan mengembang ke arah lateral (menyamping) (Lim, 2015). Pada material konvensional yang memiliki positive Poisson's ratio, efek yang terjadi adalah kebalikan: ketika material diregang, dimensi lateralnya menyusut. Fenomena negative Poisson's ratio pada *auxetic*

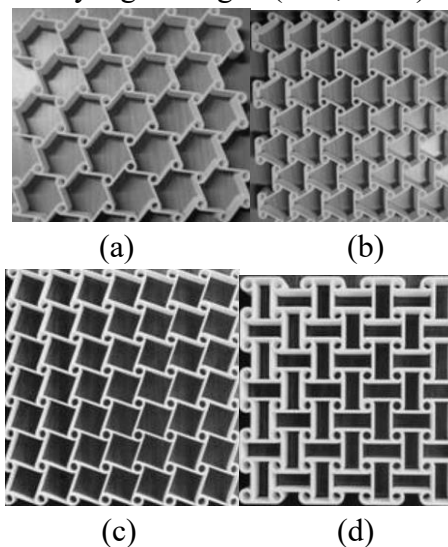
pertama kali diamati oleh Lakes, 1987, melalui penelitian pada struktur busa poliuretan yang dimodifikasi.



Gambar 2.3 (a) Skematis untuk 2D Deformasi dari Negative Poisson's Ratio (b) Tipe-tipe Pola Struktur *Auxetic* Dengan Negative Poisson's Ratio (Lim, 2015)

Perilaku Negative Poisson's Ratio yang dimiliki *auxetic* meningkatkan sifat mekanik, terutama penyerapan energi pada struktur. Alasannya adalah, ketika struktur *auxetic* ditekan secara aksial, ia berkontraksi secara lateral dan menjadi lebih padat, sehingga menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dan penyerapan energi spesifik yang lebih besar (Alomarah et al., 2020).

Banyak tipe topologi *auxetic* yang telah dikembangkan untuk berbagai macam komposisi, salah satunya adalah tipe chiral. Struktur chiral pada material *auxetic* dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama berdasarkan arah rotasi nodal: chiral (rotasi nodal searah) dan anti-chiral (rotasi nodal berlawanan arah). Struktur anti-tetrachiral, sebagai contoh, memanfaatkan empat ligamen yang tersusun secara simetris untuk menghasilkan deformasi rotasional yang homogen (Lim, 2015)



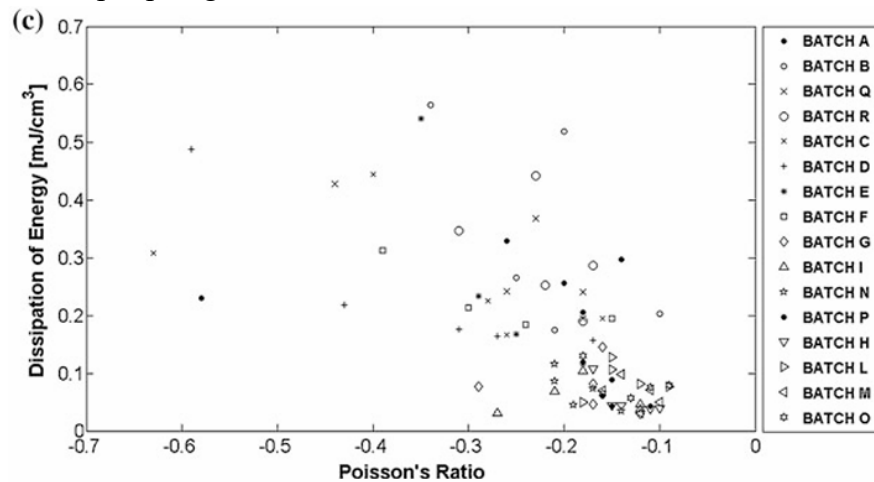
Gambar 2.4 Desain *Auxetic* Chiral (a) Trichiral; (b) Anti-trichiral; (c) Tetrachiral; (d) Anti-tetrachiral (Lim, 2015)

Pemilihan sel satuan (*unit cell*) sangat menentukan kinerja struktur *auxetic*. Di antara berbagai topologi yang ada, struktur anti-tetrachiral terbukti memiliki karakteristik unggul untuk aplikasi penyerapan energi. Studi komparatif oleh Alomarah et al. (2020) yang menguji tiga jenis geometri *auxetic* (*re-entrant*, *arrowhead*, dan *anti-tetrachiral*) menyimpulkan bahwa struktur anti-tetrachiral menunjukkan performa terbaik di bawah pembebanan tekan *quasi-static* maupun impak. Temuan ini didukung oleh Kadir et al. dan Gunaydin et al., yang melaporkan bahwa desain *anti-tetrachiral* memiliki kapasitas penyerapan energi dan nilai *Specific Energy Absorption* (SEA) yang lebih tinggi dibandingkan struktur *re-entrant honeycomb* konvensional. Selain efisiensi energi, keunggulan lain dari topologi ini adalah kemampuannya untuk dirancang dengan sifat isotropik, yang memberikan respons mekanis yang seragam dan stabil dari berbagai arah pembebanan, berbeda dengan struktur *re-entrant* yang cenderung anisotropik. Kombinasi efisiensi energi tinggi dan stabilitas deformasi inilah yang menjadikan *anti-tetrachiral* kandidat ideal untuk komponen *crashworthiness*.

Tabel 2.2 Nilai NPR Topologi *Auxetic*

Topologi <i>Auxetic</i>	NPR (v)	Sifat Mekanik	Karakteristik NPR
Anti-Tetrachiral	-1.0 (Konsisten)	Isotropis	Nilai stabil mendekati -1.0 pada bidang datar (in-plane) dari berbagai arah pembebanan. Sangat stabil hingga regangan besar, Alderson et al. (2010)
Re-entrant Honeycomb	-0.5 s.d. -4.0 (Bervariasi)	Anisotropis	Nilai sangat bergantung pada sudut pembebanan dan geometri sel. Bisa sangat negatif tetapi tidak stabil saat regangan tinggi, Yang et al. (2015)
Tetrachiral (Standar)	-0.8 s.d. -0.9	Anisotropis/Kiral	Umumnya kurang dari -1.0 (secara magnitudo). Respons deformasi cenderung kurang seragam dibandingkan varian "Anti", Lorato et al. (2010)
Double Arrowhead	-2.0 s.d. +0.5 (Non-linear)	Isotropis/ortotropis	Sangat Tidak Stabil. NPR berubah drastis seiring bertambahnya deformasi (bahkan bisa berubah menjadi positif/non- <i>auxetic</i> saat tertekan), Qiao et al. (2015)

Tabel 2,2 menunjukkan bahwa untuk tiap topologi dari *auxetic* memiliki nilai poisson ratio yang berbeda. Nilai tersebut dipengaruhi dari tipe deformasi khas yang dominan dari tiap topologi.



Gambar 2.5 Experimental Data Dari Berbagai Variasi Poisson's Ratio Terhadap Disipasi Energi (Bianchi et al., 2008)

Hubungan antara besaran NPR dan kemampuan struktur dalam menyerap energi dipaparkan oleh data eksperimental dari Bianchi et al. (2008). Seperti terlihat pada Gambar 2.5, terdapat tren korelasi positif di mana spesimen dengan nilai NPR yang lebih negatif (mendekati -0.6) menunjukkan densitas disipasi energi (*energy dissipation density*) yang jauh lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan NPR yang mendekati nol. Hal ini mengindikasikan bahwa penguatan efek *auxetic* berkontribusi langsung pada peningkatan kapasitas penyerapan energi struktur."

Tabel 2.3 Komparasi *Crashworthiness Indicator* Topologi Auxetic

Topologi Yang Diuji	Metode	Hasil	Sumber
Re-entrant Anti-tetrachiral	Uniaxial Quasi-static	CFE, SEA, EA dan MCF Anti-tetrachiral lebih unggul	Günaydın et al., 2008
Anti-tetrachiral, Tetrachiral, Re-Entrant, Hexagon	Numerical Lateral Crushing	SEA Anti-chiral lebih unggul, diikuti dengan Chiral Topologi Auxetic lebih unggul serapan energinya dibandingkan dengan non-auxetic (Hexagon)	Alireza et al., 2025

Pada tabel 2.3, melalui pengujian axial dan lateral, topologi anti-tetrachiral menghasilkan mekanisme deformasi yang dapat menghasilkan SEA yang tinggi. Namun, jika melihat pada pengujian milik Alireza et al, Anti-tetrachiral dapat mengalami patah

secara prematur pada dimensi tertentu. Sehingga kemampuan penyerapan energi yang tinggi dari anti-tetrachiral harus didasarkan dari optimasi dimensi yang tepat sesuai dengan kegunaannya.

Stabilitas tinggi yang ditunjukkan oleh Anti-tetrachiral dapat dikaitkan dengan topologi selnya yang memiliki simetri rotasi. Berbeda dengan struktur Re-entrant yang cenderung bersifat anisotropik karena respons mekanisnya sangat bergantung pada orientasi sudut rusuk (*rib angle*) terhadap arah pembebanan. Pada struktur Re-entrant, gaya yang diaplikasikan dari sumbu yang berbeda (longitudinal vs transversal) akan memicu mode deformasi dominan yang berbeda pula (misalnya *flexure* vs *stretching*), sehingga kekakuan struktur menjadi tidak seragam dan rentan terhadap lokalisasi tegangan pada sudut lipatan (Gibson & Ashby, 1997). Sebaliknya, geometri Anti-tetrachiral menawarkan sifat isotropik pada bidang (*in-plane isotropy*) yang lebih seragam (Alderson et al., 2010). Dalam penelitian ini, sifat tersebut termanifestasi melalui mekanisme Compression-Torsion Coupling (CTC) seperti yang dijelaskan oleh Zhang et al., di mana beban tekan didistribusikan secara merata melalui rotasi node, menghasilkan deformasi yang stabil dan terkontrol

2.2.3 Poly Lactic Acid (PLA)

PLA (Polylactic Acid atau Polylactide) adalah bioplastik yang terbuat dari asam laktat, hasil fermentasi sumber daya terbarukan seperti jagung, singkong, tebu atau limbah pertanian. PLA termasuk dalam keluarga poliester alifatik dan dikenal sebagai material ramah lingkungan karena bisa terurai secara alami (biodegradable). (Pang, X et al., 2010). Struktur kimianya yang mengandung ikatan ester memungkinkan degradasi terkontrol, menjadikannya alternatif berkelanjutan untuk menggantikan plastik berbasis minyak bumi. Selain ramah lingkungan, PLA juga bersifat biokompatibel, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi medis seperti implan dan pengiriman obat. Di alam terbuka, degradasi PLA sangat lambat karena membutuhkan kondisi khusus. PLA bisa terurai dalam 90 hari di lingkungan kompos terkontrol (suhu tinggi >55°C, kelembaban, dan mikroba khusus). PLA kurang cepat terurai, tetapi tetap lebih unggul daripada plastik sintetis seperti PET. Untuk aplikasi *crashbox*, biodegradabilitas ini menjadi nilai tambah karena mengurangi dampak limbah.

PLA dianggap sebagai filamen paling ramah pengguna dalam pencetakan 3D, terutama bagi pemula, karena kemudahannya dalam pengaturan parameter cetak dibanding ABS dan PETG. PLA memiliki suhu pencetakan lebih rendah (180–220°C) dibanding ABS (220–250°C) atau PETG (220–250°C), sehingga mengurangi risiko *thermal degradation* dan konsumsi energi (Dizon et al., 2018).

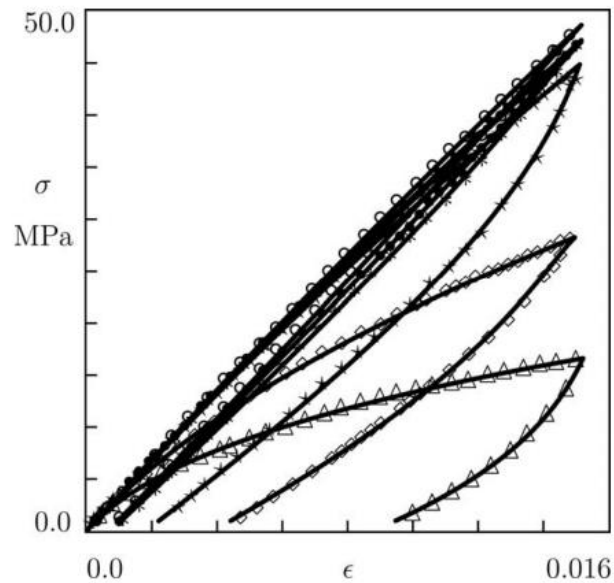
Secara sifat mekanik, jika melihat tabel 2.3, PLA memiliki kekuatan tarik sedikit lebih besar dari ketiga filament. PLA juga merupakan filament paling getas sehingga dapat mempengaruhi besaran serapan energi ketika menerima gaya dari luar. Sifat ini akan menyebabkan PLA menjadi material yang memiliki daerah plastis yang cukup pendek, sehingga memiliki serapan energi yang lebih rendah daripada filament yang lain.

Namun, jika kita mempertimbangkan dari sisi kemudahan dalam pencetakan, serta biodegradable dari PLA, maka penggunaan PLA sebagai material dasar dapat dipertimbangkan.

Tabel 2.4 Perbandingan Properti Mekanik Antara ABS, PLA, dan PETG ((SUNLU Filament Technical Data Sheet, <http://www.3dsunlu.com/>))

Filament	PLA	ABS	PETG
Tensile Strength (MPa)	50-70	35-45	45-55
Elongation at Break (%)	5-10	10-30	15-25
Density	1.24–1.25 g/cm ³	1.04–1.07 g/cm ³	1.27–1.30 g/cm ³
Stiffness (Young's Modulus, GPa)	3-3,5	2-2,5	1,8-2,2

PLA sebagai material viskoelastis mampu menyerap energi melalui fenomena histeresis, yaitu ketidaksesuaian antara kurva pembebanan (loading) dan pelepasan beban (unloading) selama deformasi siklik. Saat PLA mengalami pembebanan berulang, energi mekanik diubah menjadi panas akibat gesekan internal antar rantai polimer dan relaksasi molekuler yang tertunda. Area loop histeresis pada kurva tegangan-regangan mencerminkan jumlah energi yang terdisipasi, yang bergantung pada suhu, laju regangan, dan struktur material. Pada suhu mendekati titik transisi kaca ($T_g \approx 60\text{--}65^\circ\text{C}$), mobilitas rantai polimer PLA meningkat, sehingga histeresis dan serapan energi menjadi lebih signifikan (Dusunceli, N et al., 2017).



Gambar 2.6 Experimental data dalam loading– unloading tests pada berbagai temperatur Symbol : $\circ$ – $T = 23$; $\bullet$ – $T = 30$; $*$ – $T = 35$; $\star$ – $T = 40$; $\diamond$ – $T = 45$; Δ – $T = 50$.
(Dusunceli, N et al., 2017).

2.2.4 Crashworthiness Indicators

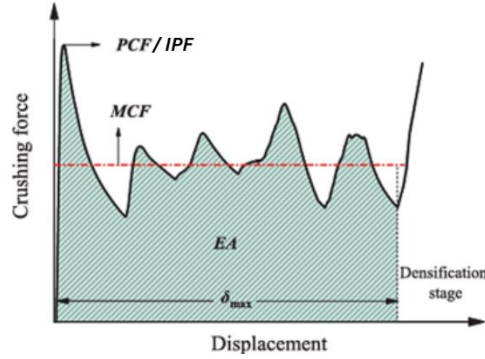
Indikator *crashworthiness* biasanya digunakan untuk mengevaluasi perilaku penyerapan energi dari suatu struktur. Pengujian tekan dilakukan pada struktur untuk mendapatkan kurva *displacement-force*, seperti pada gambar 2.9, yang nantinya digunakan sebagai alat bantu perbandingan parameter (*crashworthiness parameter*) antar spesimen uji (Lykacos et al., 2021). Parameter *Crashworthiness* yang digunakan akan dirinci sebagai berikut:

2.2.4.1 Initial Peak Force (IPF)

Initial Peak Force (IPF) didefinisikan sebagai puncak gaya yang diterima oleh struktur pada kurva *displacement-force*. Pada titik ini, struktur mulai kehilangan stabilitas (*wall buckling*), yang menjadi awal dari proses penyerapan energi melalui deformasi plastis atau kerusakan material. Tingginya nilai IPF dapat mengindikasikan kekakuan struktur, tetapi juga berpotensi menyebabkan kegagalan yang lebih cepat jika melebihi kapasitas material (Lykacos et al., 2021). jika *IPF* terlalu tinggi, struktur tidak dapat memasuki fase deformasi plastis (daerah plastis), yang merupakan tahap utama penyerapan energi terbesar. Oleh karena itu, dalam desain *crashbox*, gaya puncak tidak boleh terlalu tinggi dan harus dioptimalkan sesuai kebutuhan aplikasinya.

2.2.4.2 Total Energy Absorption (EA)

Total *energy absorption* didapatkan dengan mengintegralkan kurva *displacement-force*, yang merupakan indikator utama untuk mengukur *crashworthiness* dari *energy absorbers*.



Gambar 2.7 Area Energy Absorption Pada Kurva Displacement-force (Yao et al., 2023)

Berdasarkan pada gambar 2.7, *EA* dapat didefinisikan secara matematis sebagai berikut:

$$EA = \int_0^{\delta_{max}} P(t) d\delta \quad (2.2)$$

Dimana $P(t)$ adalah *instantaneous crushing force*, dan δ_{max} adalah jarak maksimum deformasi yang dapat dicapai oleh *absorber* sebelum mengalami densifikasi (Yao et al., 2023)

2.2.4.3 Mean crushing force (MCF)

MCF didefinisikan sebagai rasio dari *total energy absorption (EA)* dengan *maximum crushing distance* (δ_{max}) (Yao et al., 2023).

$$MCF = \frac{EA}{\delta_{max}} \quad (2.3)$$

2.2.4.4 Specific Energy Absorption (SEA)

SEA juga merupakan salah satu indikator paling umum digunakan untuk mengukur performa *energy absorption* dari material dan struktur yang berbeda. SEA digunakan untuk mendefinisikan rasio *total energy absorption (EA)* dengan massa (m) struktur. SEA dapat dirumuskan secara matematis sebagai berikut:

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (2.4)$$

Perlu diketahui bahwa massa (m) pada persamaan 2.3 memiliki perbedaan pengertian pada beberapa literatur. Kebanyakan menggunakan total massa absorber (m_{total}), namun ada yang menggunakan untuk massa *absorber* yang

terdeformasi (m_{deform}). Perbedaan ini dapat menyebabkan perbedaan dalam hasil perhitungan, sehingga harus dipastikan terlebih dahulu untuk menggunakan pendefinisian yang mana (Yao et al., 2023).

2.2.4.5 *Crushing Force Efficiency (CFE)*

CFE merupakan indikator untuk mencerminkan fluktuasi dari *crushing force*, yang dimana mendefinisikan sebagai ratio dari *IPF* dan *MCF*.

$$CFE = \frac{MCF}{IPF} \quad (2.5)$$

2.2.5 *Crashworthiness Design Criteria*

Pemilihan kriteria desain crashworthiness yang tepat sangat penting untuk mendapatkan desain crashbox yang diperlukan. Indikator utama yang dapat mewakili perilaku ketahanan terhadap tabrakan dari komponen dinding tipis dan paling banyak disajikan dalam literatur adalah SEA, EA, MCF, IPF, dan CFE.

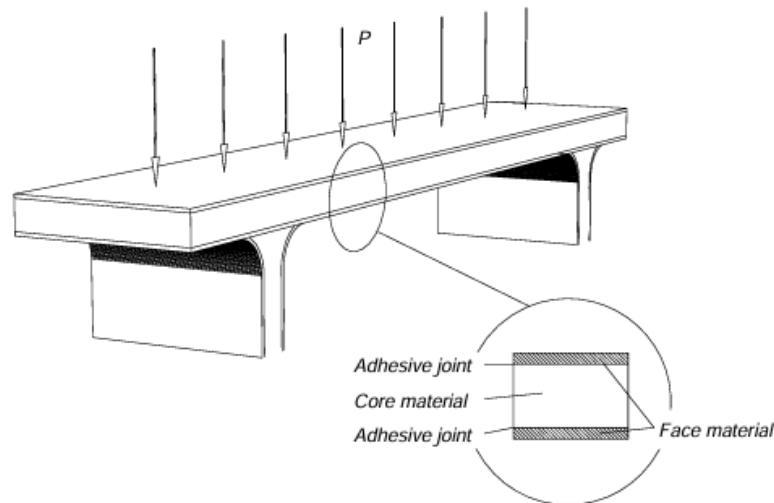
Kriteria desain yang berbeda digunakan ketika mencari bentuk optimal. Beberapa dari kriteria tersebut sangat membingungkan dan digunakan secara paradoks oleh para peneliti. Misalnya, studi yang dilakukan oleh Marzbanrad et al dan Shakeri et al mempertimbangkan bahwa desain optimal seharusnya memiliki *effective crush distance* atau *maximum crushing distance* yang panjang untuk memungkinkan pemanfaatan deformasi plastis secara penuh. Sementara untuk penelitian Shi et al menyarankan bahwa desain optimal harus memiliki *effective crush distance* untuk menghindari komponen-komponen berat pada kompartmen mesin terdorong menuju area penumpang. MCF juga digunakan dengan cara yang kontradiktif dalam studi optimasi pada beberapa peneliti. Zarei et al menyarankan tingkatan yang rendah untuk MCF guna mengurangi resiko cedera, sedangkan untuk Zhang et al mempertahankan nilai MCF tinggi untuk meningkatkan kapasitas penyerapan energi. Menurut Baroutaji et al., di balik penggunaan paradoksial dari beberapa metrik *crashworthiness* mungkin terkait dengan regulasi keselamatan dari struktur otomotif yang umumnya dibagi menjadi dua kelompok utama, satu berfokus pada kriteria statis, seperti deformasi, dan yang menekankan kriteria dinamis seperti *impact* atau *acceleration*.

Baroutaji et al., menjelaskan bahwa kriteria desain yang kebanyakan disetujui secara umum adalah menggunakan SEA dan IPF parameter. Komponen penyerap energi harus mampu menyebarkan jumlah energi maksimum yang mungkin dilakukan per unit massa, untuk memungkinkan desain yang ringan dengan konsumsi bahan bakar yang efisien, jadi SEA dipilih sebagai fungsi tujuan pada beberapa penelitian tentang *crashworthiness*. Pada sisi yang lain, komponen penyerap energi selama skenario tabrakan tidak boleh menyebabkan *decceleration* yang dirasakan oleh penumpang di ruang kendali untuk menghindari cedera parah yang dialami oleh mereka. Hal tersebut dapat dicapai dengan menjaga nilai IPF serendah mungkin dengan menjaga nilai SEA

tetap tinggi, sehingga untuk nilai MCF harus sebisa mungkin untuk mendekati nilai IPF, sehingga dapat diterjemahkan mendapatkan nilai CFE setinggi mungkin.

2.2.6 Sandwich Structure

Menurut definisi ASTM, struktur *sandwich* merupakan bentuk khusus dari komposit laminasi yang terdiri dari kombinasi material berbeda yang saling direkatkan satu sama lain. Penggabungan ini bertujuan untuk memanfaatkan properti unggul dari masing-masing komponen penyusun guna memberikan keuntungan struktural pada keseluruhan rakitan (*assembly*).



Gambar 2.8 Skematik dari *Sandwich Structure* (Zenkert, 1995)

Dalam susunan pada gambar 2.8, setiap komponen memegang peran spesifik yang saling melengkapi. Lapisan kulit (*faces*) biasanya dibuat tipis namun memiliki kekuatan material yang tinggi untuk melawan momen lentur yang terjadi. Di sisi lain, inti (*core*) yang relatif tebal dan ringan berfungsi menahan gaya geser serta menstabilkan lapisan kulit agar tidak mengalami kegagalan dini seperti tekuk (*buckling*). Agar kolaborasi antar-material ini berjalan efektif, peran perekat (*adhesive*) menjadi sangat krusial sebagai pengikat yang harus mampu menahan tegangan tarik maupun geser di antara kedua lapisan tersebut. Keunggulan utama dari desain ini bukan hanya pada geometrinya, melainkan pada efisiensi materialnya. Struktur *sandwich* mampu meningkatkan kekakuan lentur (*flexural rigidity*) secara drastis tanpa harus menambah berat struktur secara signifikan. Selain menawarkan rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi, konsep ini juga sangat menguntungkan untuk aplikasi yang membutuhkan integrasi fungsi lain, seperti isolasi termal, akustik, dan tentunya kemampuan penyerapan energi yang tinggi (Zenkert, 1995).

2.2.7 Cohen's D (*Effect Size*)

Cohen's d adalah cara untuk mengukur seberapa besar dampaknya (*effect size*) ketika membandingkan antara rata-rata dua kelompok. Perhitungan ini mempertimbangkan perbedaan rata-rata tersebut dibandingkan dengan seberapa menyebarnya data di kedua kelompok. Cohen's d biasanya dipakai setelah melakukan Uji

parametrik seperti T-test atau ANOVA untuk memastikan bahwa perbedaan yang ada itu benar-benar penting dan bukan hanya kebetulan statistik (Descôteaux, 2007).

Besarnya *effect size* menggunakan metode Cohen's D dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p} \quad (2.8)$$

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2.9)$$

Simbol $\bar{X}_1$ dan $\bar{X}_2$ mewakili rata-rata dari dua kelompok sampel, di mana variabilitasnya diukur menggunakan standar deviasi masing-masing (s_1 dan s_2) untuk mendapatkan standar deviasi gabungan (S_p) berdasarkan jumlah sampel (n). Tingkat signifikansi praktis dari hasil hitung ini, yang disebut sebagai nilai d , kemudian ditentukan kategorinya berdasarkan tabel pedoman interpretasi *effect size* seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.5 Interpretasi effect size berdasarkan nilai cohen's d (d value)

Effect Size (ES)	Interpretation
$0,00 \leq ES < 0,20$	Ignored
$0,20 \leq ES < 0,50$	Small
$0,50 \leq ES < 0,80$	Moderate
$0,80 \leq ES < 1,30$	Large
$1,30 \leq ES$	Verv Large

Berdasarkan Tabel 2.4, nilai d yang dihitung akan diklasifikasikan mulai dari efek yang diabaikan (*Ignored*) hingga efek sangat besar (*Very Large*) sehingga peneliti dapat memutuskan apakah perbedaan tersebut layak untuk ditindaklanjuti atau diterapkan secara luas.

2.2.8 Two Samples Independent T-Test

Uji T-Test dua sampel independen digunakan untuk membandingkan perbedaan signifikan antara dua kelompok data yang tidak berhubungan (*independent*) (Rushton & Lamb, 2020). Dalam penelitian ini, uji ini diterapkan untuk membandingkan kinerja crashworthiness antara dua konfigurasi hybrid *tube*: Dual *auxetic* (2 lapis *auxetic*, 1 lapis aluminium) dan Dual aluminium (2 lapis aluminium, 1 lapis *auxetic*) berdasarkan parameter SEA, EA, IPF, MCF, dan CFE.

Penentuan dari ada atau tidaknya perbedaan yang signifikan antar sampel, dapat diketahui dari persamaan statistik sebagai berikut:

Formula T-test :

$$t_{stat} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n_1 + n_2}}} \quad (2.10)$$

Dengan keterangan:

s_1^2, s_2^2 : varians kelompok 1 dan 2

n_1, n_2 : Jumlah sampel kelompok 1 dan 2

$\bar{X}_1 - \bar{X}_2$: Rata-rata kelompok 1 dan 2

Untuk nilai varians antar kelompok dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$s_1^2 = \frac{\sum (X_1 - \bar{X}_1)^2}{n_1 - 1} \quad (2.11)$$

$$s_2^2 = \frac{\sum (X_2 - \bar{X}_2)^2}{n_2 - 1} \quad (2.12)$$

Dengan hipotesis H0 (Null Hypothesis), tidak ada perbedaan signifikan antara nilai [parameter] pada konfigurasi dual *auxetic* dengan dual aluminium ($\mu_1 = \mu_2$) dan H1 (Alternate Hypothesis), terdapat perbedaan signifikan antara nilai [parameter] pada kedua konfigurasi ($\mu_1 \neq \mu_2$).

Tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$) digunakan dalam penelitian ini sebagai batas signifikansi statistik. Nilai ini menunjukkan bahwa hasil perbandingan kedua konfigurasi crashbox dianggap signifikan secara statistik jika p-value < 0,05, yang berarti terdapat kurang dari 5% kemungkinan bahwa perbedaan yang diamati terjadi secara kebetulan (Field, 2018).

Tabel 2.6 Two tail table

t Table												
cum. prob	one-tail	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
		0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails		1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df												
1		0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2		0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3		0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4		0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5		0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6		0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7		0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8		0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9		0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10		0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11		0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12		0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13		0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14		0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15		0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16		0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.119	2.589	2.934	3.696	4.045

Nilai df merupakan *degree of freedom* dan dapat dihiung menggunakan persamaan berikut:

$$df = n_1 + n_2 - 2 \quad (2.13)$$

Jika nilai t value < t tabel, maka H0 tidak dapat ditolak, sehingga perbedaan antara kedua parameter tidak signifikan secara statistik.

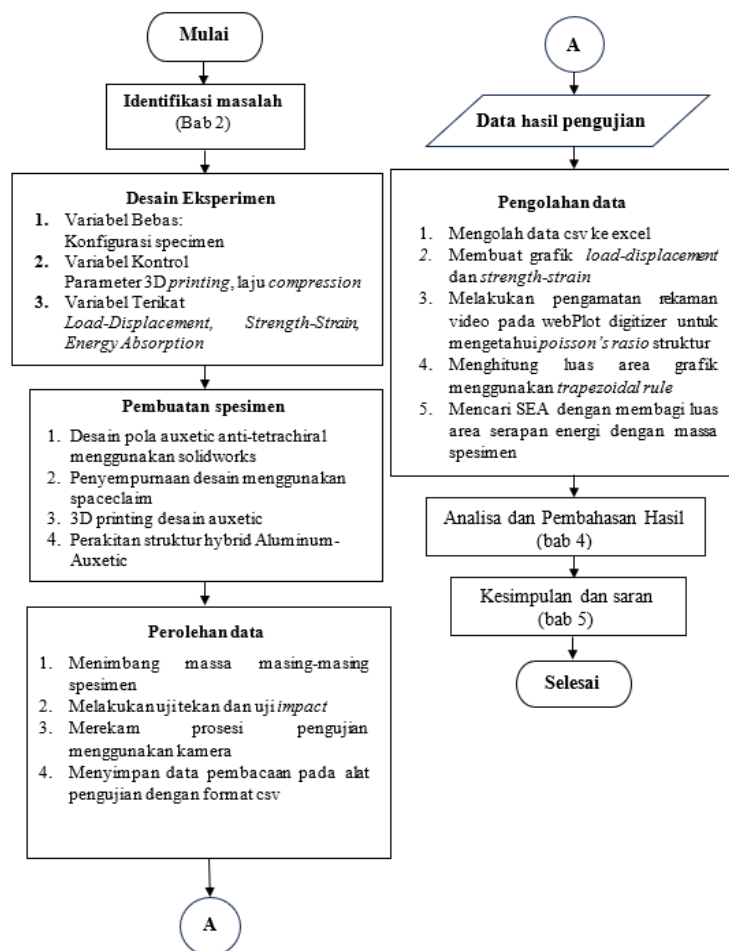
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3 METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi struktur *auxetic* dan aluminium terhadap performa *crashworthiness* pada uji tekan quasi-static. Melalui eksperimen pada keseluruhan spesimen, diharapkan diperoleh data kuantitatif terkait *specific energy absorption* (SEA), *initial peak force* (IPF), *mean crushing force* (MCF), dan *crushing force efficiency* (CFE). Hasil pengujian diharapkan mampu menjadi acuan dalam pengembangan struktur absorpsi energi berbasis struktur *auxetic* hybrid.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah diagram alir yang digunakan pada penelitian ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada gambar 3.1, menunjukkan langkah-langkah yang diperlukan untuk melakukan penelitian. Pada tahap awal, dilakukan identifikasi masalah dengan melakukan studi literatur pada penelitian terdahulu terkait pengembangan *crashbox* dan

struktur *auxetic*. Berdasar dari temuan pada studi literatur, terdapat beberapa celah dan temuan terhadap pengembangan struktur *auxetic* sebagai *crashbox*. Pengembangan yang dimaksud adalah penggabungan antara struktur *auxetic* berbahan *poly lactic acid* (PLA) dengan *aluminium tube sheet* menggunakan perekat *adhesive epoxy*. Penggabungan 2 material yang berbeda ini diharapkan dapat meningkatkan *energy absorption* (EA) dari struktur *hybrid*.

Pada penelitian kali ini, bertujuan membandingkan pengaruh perbedaan penempatan antara *auxetic* dan aluminium pada *hybrid tube* dengan tiga layer pada parameter-parameter yang telah ditentukan (*crashworthiness indicator*). Hipotesis yang diusulkan mengenai sinergi antara material dengan *poisson's ratio* yang berkebalikan (negatif untuk *auxetic*, dan positif untuk aluminium) dapat meningkatkan *energy absorption* akibat arah deformasi yang saling berkebalikan. Spesimen yang akan diuji terdiri dari tiga sampel pada setiap empat konfigurasi spesimen sebagai berikut :

1. PLA *Auxetic tube anti-tetrachiral* 1,5mm (AU) (*baseline*)
2. Aluminium *sheet* 0,2 mm (AL) (*baseline*)
3. Dual *auxetic* (tiga lapis (AU-AL-AU), dengan dua lapis *auxetic* dan satu lapis aluminium di bagian tengah)
4. Dual aluminium (tiga lapis (AL-AU-AL), dengan dua lapis aluminium dan satu lapis *auxetic* di bagian tengah)

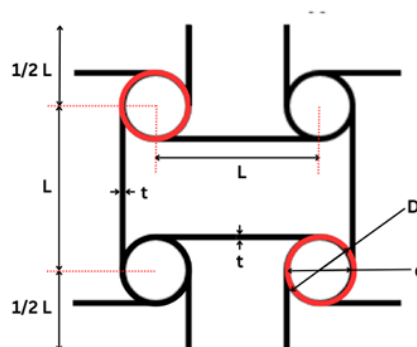
Data diperoleh dengan melakukan uji eksperimen *quasi-static* dengan parameter pengujian yang sama. Hasil dari uji eksperimental tiap konfigurasi dibandingkan untuk menentukan *crashworthiness* terbaik. Data tersebut kemudian dibahas dan kesimpulan diambil dari penelitian ini.

3.2 Desain dan Material Spesimen

Pada penelitian kali ini, *auxetic anti-tetrachiral tube* dan aluminium *tube* digunakan sebagai *baseline* (material penyusun) konfigurasi spesimen yang lain.

3.2.1 Desain *Auxetic* Anti-tetrachiral Tube

Berikut adalah dimensi *baseline* pola serta spesimen *Auxetic anti-tetrachiral tube* yang digunakan:



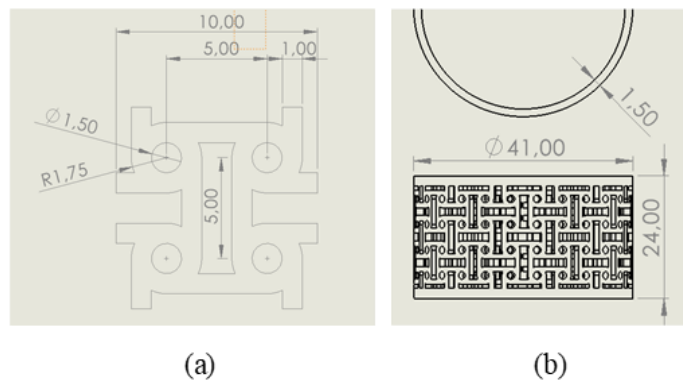
Gambar 3.2 Desain Topologi Unit Cell *Auxetic* Anti-tetrachiral

(Xia et al, 2024)

Tabel 3.1 Dimensi unit cell Spesimen Anti-tetrachiral

Dimension	Simbol	Nilai ukuran
<i>Total dimension of unit cell</i>	-	10 mm x 10 mm
Diameter lingkaran dalam (mm)	d	1.5 mm
Diameter lingkaran luar (mm)	D	3.5 mm
Tebal ligamen (mm)	t	1 mm
Panjang ligamen (mm)	L	5 mm

Dimensi pada tabel 3.1 menyesuaikan pada gambar 3.2 sebagai referensi desain. Dimensi unit cell yang telah ditentukan kemudian dibuat berpola pada *sheet* dengan ukuran 24x1,5x1319,5 mm secara merata. *Sheet* dengan pola *auxetic* kemudian dilakukan *rolling* sehingga membentuk *tube* dengan ukuran 24x1,5xD41 mm, seperti yang terlihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 (a) Topologi unit cell Anti-Tetrachiral dan (b) Dimensi *Auxetic Tube*
Desain *auxetic tube* pada gambar 3.3 (b), akan digunakan pada keseluruhan konfigurasi yang memiliki komponen spesimen *auxetic tube*.

3.2.2 Material *Auxetic Tube*

Pada pembuatan *auxetic tube* menggunakan material PLA+ yang merupakan varian ditingkatkan dari PLA biasa, menawarkan peningkatan kekuatan, ketangguhan, dan kemampuan cetak yang lebih baik. Material PLA+ yang digunakan berasal dari SUNLU, dengan properties material sebagai berikut:

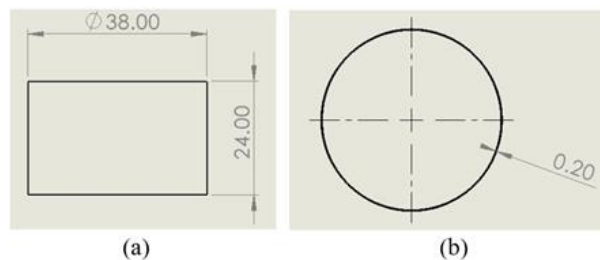
Tabel 3.2 Properties Material PLA+ SUNLU

Mechanical Properties	Material PLA+
Density (g/cm^3)	1.23
Young's Modulus (MPa)	3170
Tensile Strength (MPa)	53.4
Poisson Ratio	0.35

Data properties material tersebut didapatkan pada *Filament Technical Data Sheet* yang telah disediakan oleh SUNLU. Properties material yang diperoleh berasal dari data *test method* dengan standar internasional seperti :ISO 527/2 dan ISO 1183.

3.2.3 Desain Aluminium Tube

Berikut adalah dimensi *baseline* pola serta spesimen aluminium *tube* yang digunakan:

**Gambar 3.4** Dimensi spesimen aluminium *tube* (a) tampak depan (b) tampak atas

Desain *auxetic tube* pada gambar 3.4 akan digunakan pada keseluruhan konfigurasi yang memiliki komponen spesimen aluminium *tube*.

3.2.4 Material Aluminum Sheet

Material properties pada aluminium 3003 didapatkan dengan referensi dari laman web MatWeb dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 3.3 Properties Material Aluminum 3003 (MatWeb. (n.d.). Aluminum(Al))

Mechanical Properties	Aluminum
Density (g/cm^3)	2.6989
Young's Modulus (GPa)	70
Shear Modulus (GPa)	26
Poisson Ratio	0.33

Sebagai basis data material terkemuka, MatWeb menyediakan properti material yang terpercaya karena mengumpulkan data langsung dari produsen material bersertifikat (seperti Alcoa, ThyssenKrupp), standar internasional (ASTM, ISO), dan studi peer-reviewed. Setiap entri material di MatWeb dilengkapi dengan informasi sumber data, metode pengujian, dan kondisi pengukuran (misal: heat treatment, temper), sehingga

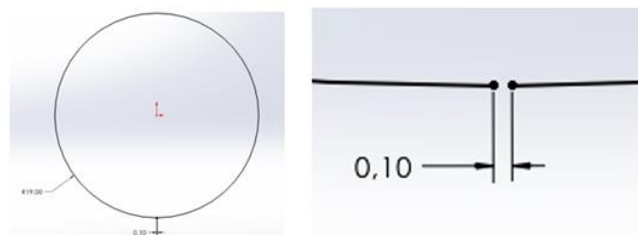
memungkinkan peneliti melacak asal-usul data. Selain itu, MatWeb secara rutin memperbarui datanya sesuai perkembangan riset dan standar industri terbaru

3.3 Tahapan Pembuatan Spesimen

Dalam tahapannya, spesimen akan menjalani 3 tahapan pembuatan, yaitu design, cetak (3D Print), dan Perakitan. Hal tersebut akan dijelaskan sebagai berikut:

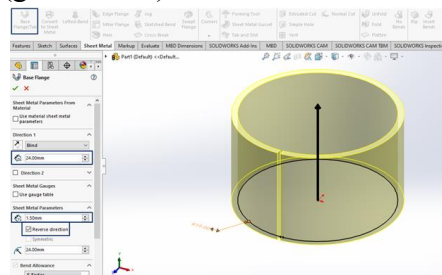
3.3.1 Pembuatan Desain Geometri *Auxetic*

Pembuatan desain *auxetic* anti-tetrachiral menggunakan *software* CAD Solidworks 2022. Pembuatan desain dilakukan dengan membuat *sketch* lingkaran yang tidak tersambung ujung-ujungnya, seperti yang terlihat pada gambar 3.5, sebagai dasar untuk pembuatan *base flange sheet*.



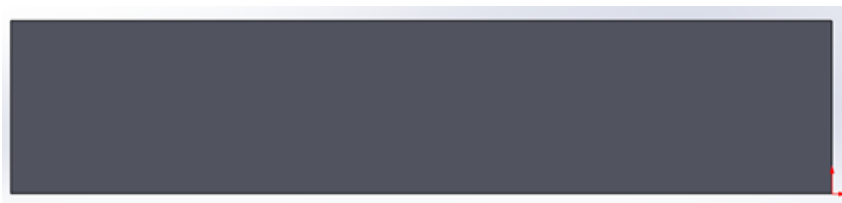
Gambar 3.5 Sketsa 2D Lingkaran

Sketch lingkaran tersebut kemudian diextrude setinggi 24 mm dan ketebalan 1,5 mm sehingga membentuk *tube*(gambar 3.6)

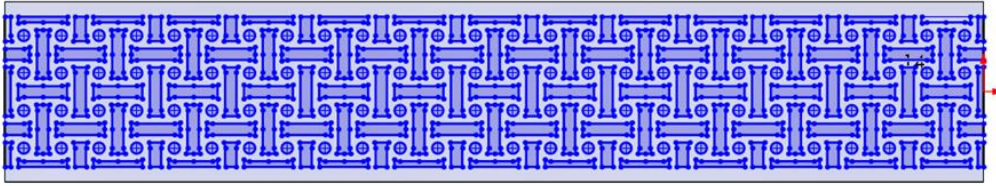


Gambar 3.6 Hasil Extrude Sketsa 2D Lingkaran

Desain *tube* yang telah didapatkan kemudian dilakukan *unfold* pada menu "*sheet metal*" sehingga diperoleh plat berbentuk persegi panjang. Pada salah satu sisi plat tersebut akan digambar (*sketch*) berupa pola anti-tetrachiral dengan dimensi unit cell yang telah ditentukan.

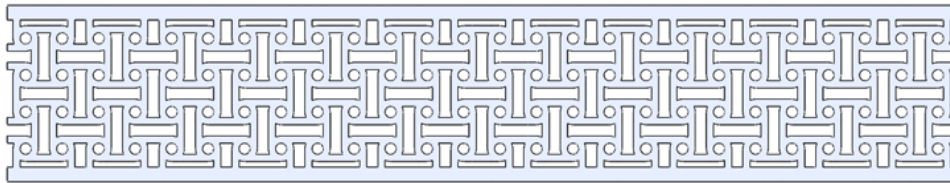


Gambar 3.7 Plat Persegi Panjang (*Sheet*)



Gambar 3.8 Pola Anti-tetrachiral pada permukaan *Sheet*

Pola Anti-tetrachiral yang telah terdesain pada permukaan plat akan dijadikan sebagai “cetakan” dengan melakukan proses *extrude cut*. Proses tersebut akan memotong *sheet* sesuai dengan pola yang telah terukir, sehingga menciptakan *sheet* dengan pola-pola yang telah ditentukan.



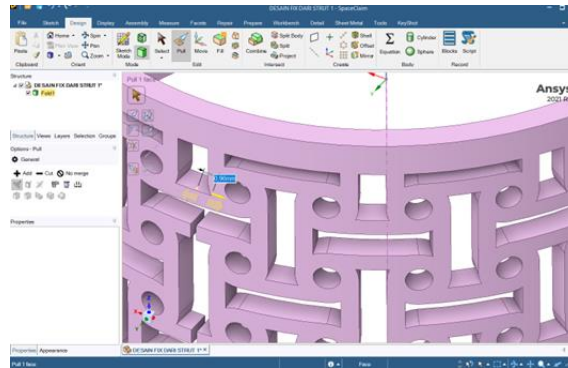
Gambar 3.9 *Sheet* yang Telah di Extrude Cut dengan Pola Anti-tetrachiral

Selanjutnya *sheet* yang telah berlubang sesuai pola anti-tetrachiral akan dilipat kembali dengan menu *fold* menjadi bentuk tabung. Pada menu “*fixed face*” dipilih *edge* yang ditunjukkan pada garis panah lalu klik “*collect all bends*”.



Gambar 3.10 *Auxetic tube* Anti-tetrachiral

Karena pada awal pembuatan desain masih menggunakan 2D *sketch* lingkaran dengan ujung-ujungnya yang tidak menyatu, maka diperlukan software CAD lain untuk memperbaiki hal tersebut, yaitu dengan menggunakan software Spaceclaim.



Gambar 3.11 Penyatuan Bagian *Tube*

Geometri yang belum tersambung pada gambar 3.10 akan diproses pada Spaceclaim untuk menyambungkan bagian sehingga menjadi *tube* yang bersatu. Pada menu *pull*, daerah yang masih belum tersambung akan “ditarik” hingga menyatu, seperti yang terlihat pada gambar 3.11.

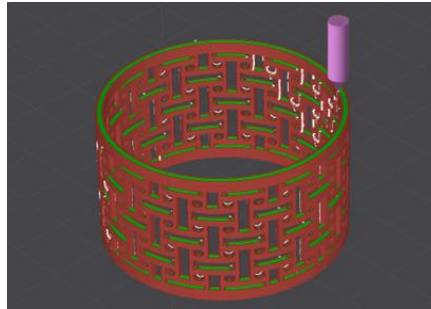
3.3.2 Pembuatan *Auxetic Tube* (3D Print)

Desain *auxetic tube* yang telah jadi kemudian akan diimport dan diproses pada salah satu software *slicing* 3D printing, yaitu Creality Print. Software ini bertujuan untuk mengubah file menjadi extension yang dapat dibaca oleh 3D print, yaitu gcode. File ini berisi perintah dan parameter-parameter yang kemudian akan memerintah 3D Print untuk melakukan pencetakan sesuai prosedur dan parameter yang telah ditentukan. Berikut adalah parameter yang digunakan untuk mencetak *auxetic tube* pada 3D Print:

Tabel 3.4 3D Print Setting

Parameters (Unit)	Value
<i>Layer height (mm)</i>	0.1
<i>Initial layer height (mm)</i>	0.1
<i>Infill Density (%)</i>	100
<i>Infill Line Distance (mm)</i>	5.33
<i>Infill Pattern</i>	Line
<i>Infill Line Multiplier</i>	1
<i>Infill Overlap Percentage (%)</i>	30

Setelah parameter print diatur, dilakukan *slicing* untuk melihat simulasi pencetakan secara step by step sehingga dapat melihat apakah nantinya ada kesalahan pada pencetakan yang dapat menyebabkan cacat material.



Gambar 3.12 Tampilan Slicing pada Creality Print

Kemudian dilakukan printing menggunakan jenis 3D Printing Ender-3 V3 KE dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.5 Spesifikasi Mesin 3D Printing Creality Ender-3 V3 KE

Constant Parameter	Value
<i>Nozzle Diameter (mm)</i>	0.4
<i>Bed Temperature (°C)</i>	60
<i>Infill Pattern</i>	Line
<i>Printing speed (mm/s)</i>	200
<i>Nozzle Printing Temperature (°C)</i>	220

Proses pencetakan dilakukan dengan kondisi *open enclosure* dengan rata-rata suhu ruangan berkisar pada 27°C.



Gambar 3.13 Proses Pencetakan Auxetic Tube

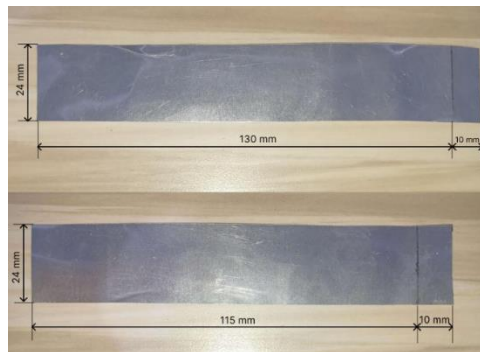


Gambar 3.14 Hasil 3D Printing *Auxetic Tube*

Pada gambar 3.14, terlihat hasil 3D printing *auxetic tube* dengan sedikit *stringing* pada celah-celah *auxetic*. Hal tersebut dapat dihilangkan dengan melakukan pemotongan secara manual supaya terlihat lebih rapi.

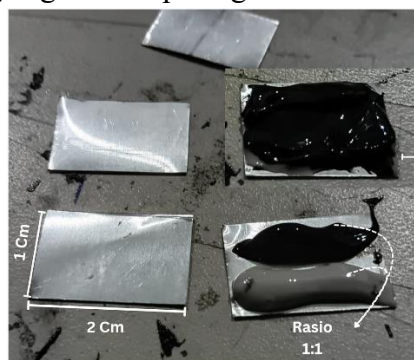
3.3.3 Penggabungan Antara aluminium *Sheet* dengan *Auxetic Tube*

Aluminum *sheet* dipotong dengan dimensi seperti yang terlihat pada gambar 3.15.



Gambar 3.15 Dimensi Aluminum *sheet*

Keduanya direkatkan menggunakan perekat adhesive epoxy dengan urutan lapisan sesuai dengan konfigurasi yang ada. Pengeleman pada permukaan aluminium *sheet* harus memiliki jumlah yang sama untuk setiap konfigurasi, sehingga ditetapkan jumlah lem dan ratio adhesif epoxy seperti yang terlihat pada gambar 3.16.



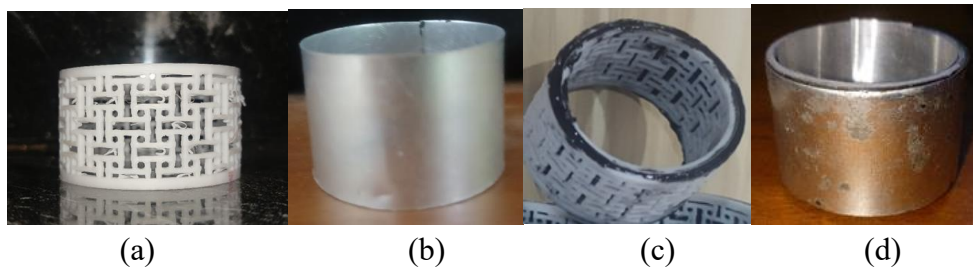
Gambar 3.16 Kontrol Pengeleman

Setelah perekat diaplikasikan secara merata, kemudian dilakukan penjepitan sampai menunggu perekat kering untuk memastikan ikatan antara keduanya lebih merata.



Gambar 3.17 Proses Penjepitan dan Pengeleman

Setelah sekitar 2 jam, *clamp* dilepas dan spesimen dibiarkan selama 24 jam supaya perekat mengeras dengan sempurna. Pada gambar 3.16 mellihatkan hasil akhir spesimen sebelum dilakukan pengujian.



Gambar 3.18 Konfigurasi Spesimen (a) *Auxetic Tube* Anti-tetrachiral (baseline); (b) *Aluminum Tube* (baseline); (c) Dual *Auxetic*(tiga lapis (AU-AL-AU), dengan dua lapis *auxetic* dan satu lapis alumunium di bagian tengah); (d) Dual *Aluminum*(tiga lapis (AL-AU-AL))

3.4 Prosedur Pengujian

Pada penelitian kali ini menggunakan pengujian tekan quasi-static. Sebelum dilakukan pengujian, spesimen yang telah selesai dibuat ditimbang massanya sebagai pertimbangan untuk perhitungan *specific energy absorption* (SEA). Berikut adalah massa dari spesimen uji:



Gambar 3.19 Penimbangan Salah Satu Massa Spesimen

Tabel 3.6 Massa spesimen pada setiap konfigurasi spesimen uji

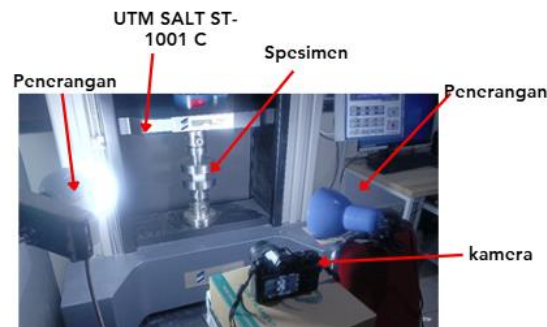
Konfigurasi	Spesimen	Massa (gram)
Aluminum Tube	1	1,79
	2	1,68
	3	1,88
Auxetic Tube	4	2,85
	5	2,92
	6	2,85
Dual Auxetic	7	9,93
	8	10,01
	9	10,06
Dual Aluminum	10	8,59
	11	8,79
	12	8,87

Pengujian pada penelitian ini menggunakan quasi-static yang merupakan metode evaluasi mekanis dengan menerapkan pembebanan pada material atau struktur secara perlahan (1,5 - 15 mm/menit menurut standar ISO 6892-1) sehingga efek inersia dan dinamika dapat diabaikan. Tujuannya adalah untuk mengamati respons material dalam kondisi terkontrol, seperti deformasi plastis, *collapse behavior*, atau mekanisme serapan energi tanpa gangguan faktor eksternal seperti panas akibat gesekan atau gelombang kejut (Courtney, 2005).

Pengujian ini dilakukan dengan meletakkan spesimen pada plate mesin kemudian diberikan pembebanan dengan laju deformasi sebesar 5mm/menit. Gaya yang diperlukan untuk mendeformasi spesimen dengan laju tersebut nantinya akan direkam dengan format *csv load-displacement* dan *strength-strain* dengan memasukkan luas permukaan spesimen yang terkena kontak langsung dengan mesin. Pengujian tekan dilakukan menggunakan alat Universal Testing Machine SALT ST-1001 C dengan data spesifikasi pada tabel 3.7. Peralatan pendukung yang digunakan pada pengujian ini yakni kamera dan penerangan untuk merekam waktu proses penekanan spesimen, seperti yang terlihat pada gambar 3.20. Rekaman pengujian ini digunakan untuk mengetahui sifat deformasi yang dialami oleh spesimen.

Tabel 3.7 Spesifikasi Mesin UTM SALT ST-1001 C

Machine Quality	Value
<i>Merk</i>	SALT
<i>Model</i>	ST-1001
<i>Frame Capacity</i>	20kN
<i>Load Cell</i>	10kN
<i>Power</i>	220V 1 PH, 50, 60Hz / 400W



Gambar 3.20 Set-up Pengujian Tekan Quasi-static

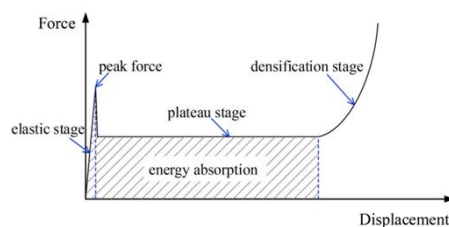
Dari pengujian ini akan diperoleh hasil berupa kurva *load-displacement* dan *strength-strain* yang digunakan untuk menganalisis pengaruh konfigurasi spesimen pada besaran kekuatan, kekakuan, dan penyerapan energi dari spesimen yang diuji.



Gambar 3.21 Hasil grafik *load-displacement* pengujian tekan

3.5 Metode Pengolahan Data Hasil Pengujian

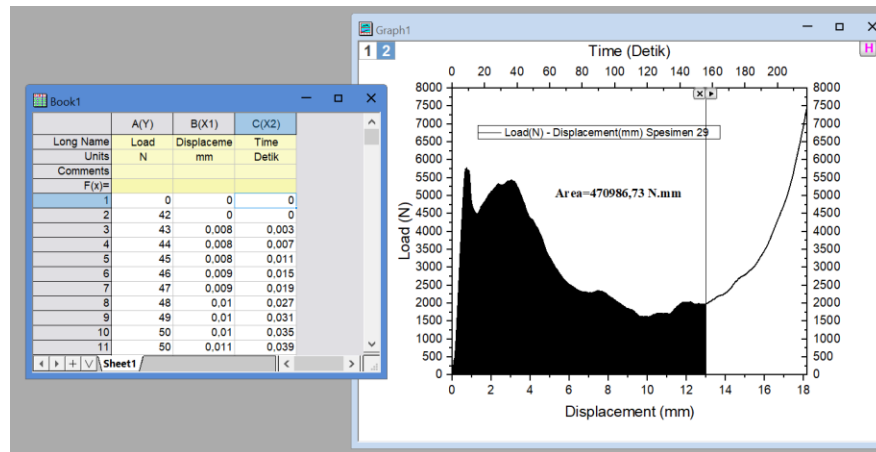
Data hasil pengujian dari uji tekan quasi-static yang masih berupa CSV file *extension* akan diolah menggunakan microsoft excell untuk menjadi grafik *Load-displacement* dan *Strength-Strain*, seperti pada gambar 3.22. Hal ini diperlukan untuk analisis dan visualisasi pengolahan data. Penyerapan energi pada spesimen ditentukan dengan mencari luas area dibawah grafik *load-displacement* (Zhang et al., 2020).



Gambar 3.22 Luas daerah untuk serapan energi
(Zhang et al, 2020)

Untuk menghitung luasan daerah di bawah kurva grafik, software OriginPro dapat digunakan sebagai alat bantu untuk mempermudah perhitungan. OriginPro mencari luasan dengan metode pendekatan trizoid, yaitu dengan membagi area di bawah kurva

menjadi trapesium-trapesium kecil. Luas total dihitung dari jumlah luas semua trapesium, sehingga didapatkan nilai yang mendekati luasan sesungguhnya.



Gambar 3.23 Tampilan pengolahan data pada OriginPro
Pencarian nilai parameter crashworthiness yang lain seperti MCF juga dapat dilakukan dengan mencari nilai rata-rata load pada rentang displacement tertentu.

3.6 Rancangan Penelitian Experimental

Penelitian ini menggunakan variasi konfigurasi antara *auxetic* dengan aluminium. Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah *Initial Peak Force (IPF)*, *Energy Absorption*, dan *Specific Energy Absorption (SEA)*. Berikut merupakan tabel pengamatan yang akan dilakukan dalam penelitian ini.

Tabel 3.8 Rancangan Penelitian Eksperimental

Konfigurasi	Spesimen	Massa	EA (N.mm)	EA (J)	IPF (N)	SEA (J/gr)	MCF (N)	CFE(%)
Aluminum Tube	1							
	2							
	3							
Auxetic Tube	4							
	5							
	6							
Dual Auxetic	7							
	8							
	9							
Dual Aluminum	10							
	11							
	12							

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi kinerja *crashworthiness* struktur tabung penyerap energi dilakukan melalui serangkaian uji tekan *quasi-static* yang diterapkan pada tiga spesimen untuk setiap variasi konfigurasi. Analisis dan pembahasan berikut difokuskan untuk menjawab tujuan utama penelitian, yaitu mengukur seberapa besar pengaruh kombinasi material *auxetic* dan aluminium, menelaah dampak variasi susunan komponen pada struktur *hybrid*, serta menentukan konfigurasi yang menghasilkan performa terbaik secara keseluruhan.

Adapun pembahasan dalam bab ini disusun secara bertahap, diawali dengan analisis data kuantitatif parameter *crashworthiness*. Temuan tersebut diperdalam melalui pengamatan visual mekanisme deformasi guna memahami perilaku fisik struktur dalam menyerap energi. Selanjutnya, studi komparasi dilakukan untuk menilai keunggulan desain dibandingkan penelitian terdahulu, sebelum akhirnya dirangkum dalam pemetaan kinerja untuk menentukan konfigurasi terbaik.

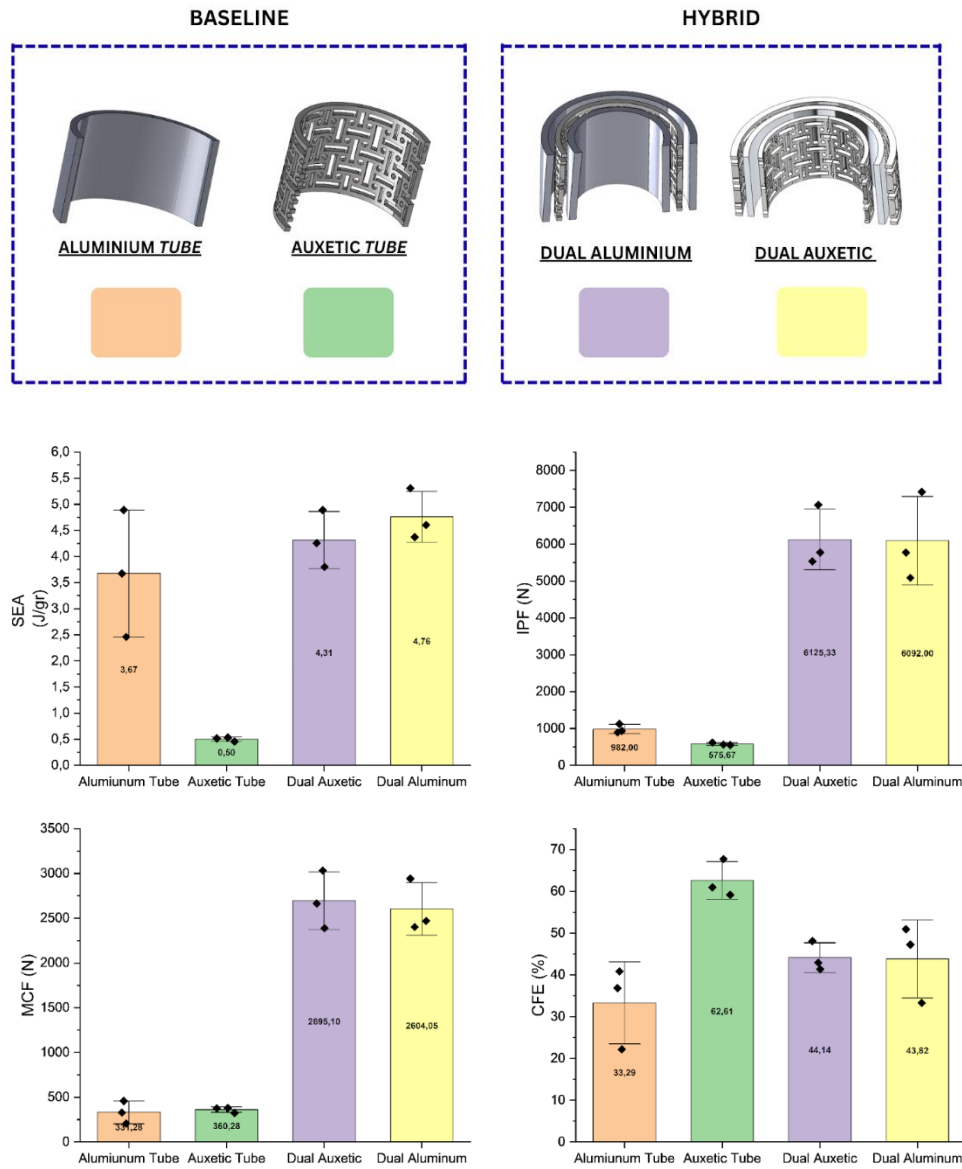
4.1 Evaluasi *Crashworthiness* Parameter

Analisis kuantitatif pada penelitian ini didasarkan pada data yang diekstraksi dari kurva *load-displacement* hasil pengujian. Dari kurva tersebut, diturunkan beberapa parameter kunci untuk mengevaluasi berbagai aspek kinerja *crashworthiness*, meliputi: kekuatan puncak awal (IPF) untuk mengukur resistansi awal, gaya hancur rata-rata (MCF) sebagai indikator stabilitas, efisiensi gaya hancur (CFE), serta penyerapan energi spesifik (SEA) untuk menilai efisiensi energi terhadap massa. Rangkuman nilai rata-rata seluruh parameter tersebut untuk setiap konfigurasi dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Uji Parameter *Crashworthiness* Seluruh Spesimen

Konfigurasi	Spesimen	Massa	EA (N.mm)	EA (J)	Peak Force (N)	SEA (J/gr)	MCF (N)	CFE(%)
Aluminum Tube	1	1,79	6572,90	6,57	892,00	3,67	328,65	36,84
	2	1,68	4132,63	4,13	931,00	2,46	206,63	22,19
	3	1,88	9170,98	9,17	1123,00	4,89	458,55	40,83
Auxetic Tube	4	2,85	1299,01	1,30	549,00	0,46	324,75	59,15
	5	2,92	1504,65	1,50	617,00	0,52	376,16	60,97
	6	2,85	1519,68	1,52	561,00	0,53	379,92	67,72
Dual Auxetic	7	9,927	48525,82	48,53	7065,00	4,89	3032,86	42,93
	8	10,013	42618,85	42,62	5535,00	4,26	2663,68	48,12
	9	10,057	38220,13	38,22	5776,00	3,80	2388,76	41,36
Dual Aluminum	10	8,586	39500,38	39,50	7418,00	4,60	2468,77	33,28
	11	8,791	38426,87	38,43	5084,00	4,37	2401,68	47,24
	12	8,871	47067,00	47,07	5774,00	5,31	2941,69	50,95

KONFIGURASI HYBRID

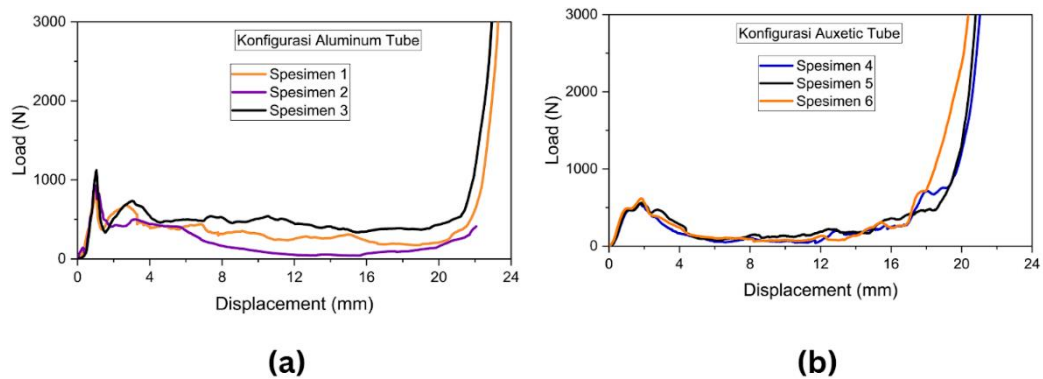


Gambar 4.1 Perbandingan Nilai Keseluruhan Parameter Crashworthiness

Analisis lebih lanjut mengenai perilaku mekanik yang menghasilkan nilai parameter *crashworthiness* tersebut dapat diamati melalui karakteristik kurva *load-displacement* berikut

4.1.1 Karakteristik Kurva *load-displacement*

Karakteristik kurva *load-displacement* merepresentasikan respons (berupa displacement) struktur terhadap beban tekan yang diberikan. Gambar 4.2 hingga Gambar 4.4 memperlihatkan perbandingan perilaku mekanik dari keempat konfigurasi yang diuji.

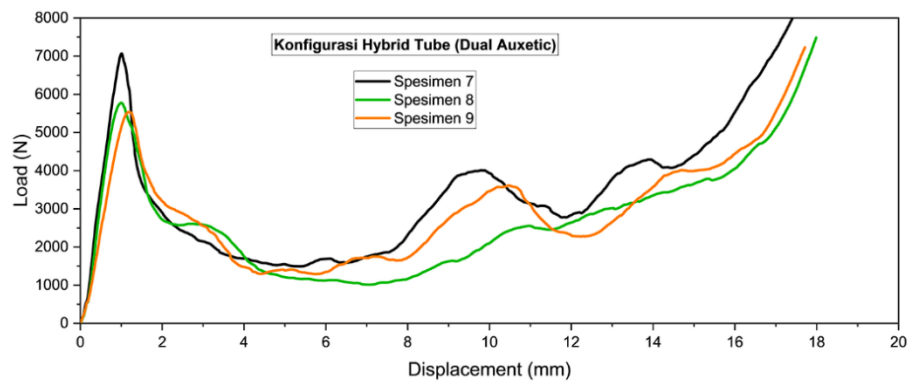


Gambar 4.2 Grafik Kurva *Load-displacement* Konfigurasi Baseline (a) aluminium tube
(b) Auxetic tube

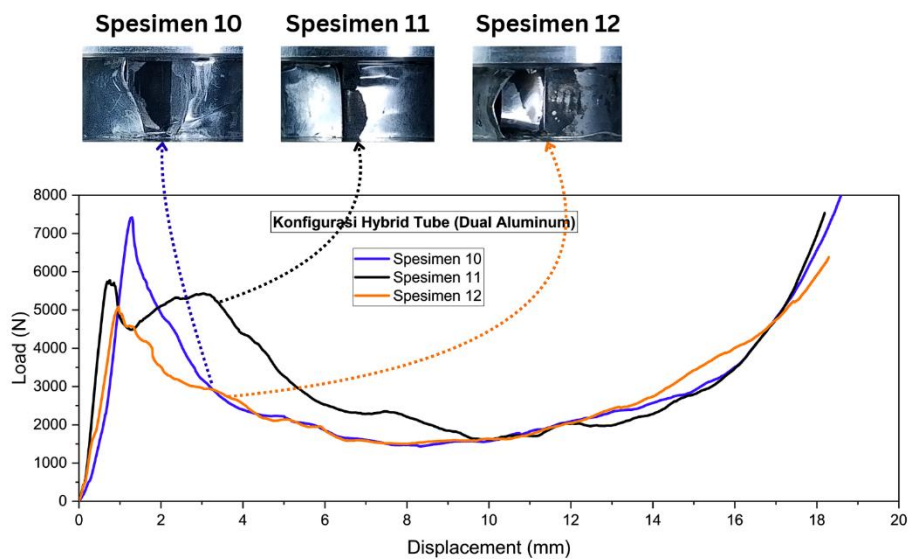
Gambar 4.2 menyajikan kurva *load-displacement* untuk kedua konfigurasi komponen *baseline*. Pada Gambar 4.2(a), ketiga spesimen aluminium tube menunjukkan pola deformasi yang konsisten, ditandai dengan pencapaian IPF yang relatif seragam pada kisaran 890–1100 N. Setelah mencapai puncak awal, terjadi penurunan beban sesaat yang diikuti oleh kemunculan *2nd peak*, mengindikasikan inisiasi pembentukan *local buckling*. Meskipun terdapat sedikit variasi pada perilaku *post-peak* antar spesimen, karakteristik umum kurva yang dihasilkan tetap menunjukkan tren yang serupa.

Sementara itu, kurva *load-displacement* untuk konfigurasi *auxetic tube* pada Gambar 4.2(b) menunjukkan tingkat konsistensi dan *repeatability* yang sangat tinggi. Ketiga spesimen menampilkan tren kurva yang hampir identik dari awal hingga akhir pembebanan. Nilai IPF yang dicapai juga saling berdekatan, yakni pada kisaran 550–620 N. Hal tersebut menegaskan bahwa respons struktur *auxetic* terhadap beban tekan dapat diprediksi. Berbeda dengan aluminium, penurunan gaya setelah IPF pada *auxetic tube* cenderung lebih tajam dan diikuti oleh fase gaya rendah yang stabil, merepresentasikan mekanisme kegagalan yang didominasi oleh fraktur getas pada material PLA+.

Beralih pada konfigurasi hybrid, Gambar 4.3 menampilkan kurva *load-displacement* untuk hybrid dual *auxetic*. Ketiga spesimen menunjukkan konsistensi perilaku deformasi yang sangat baik, ditandai dengan pola kurva yang memiliki tren identik dari awal pembebanan. Posisi *displacement* saat tercapainya IPF maupun *2nd peak* terjadi pada titik yang relatif seragam antar spesimen. Perbedaan yang teramati hanya terbatas pada magnitudo gaya yang mampu ditahan, yang merupakan variasi wajar dalam proses manufaktur material hybrid.



Gambar 4.3 Grafik Kurva *Load-displacement* Konfigurasi Hybrid Dual *Auxetic*



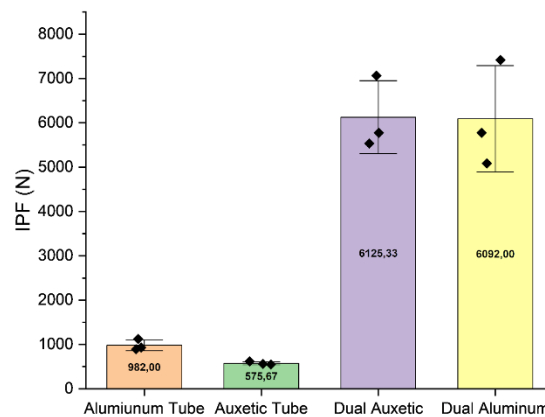
Gambar 4.4 Grafik Kurva *Load-displacement* Konfigurasi Hybrid Dual aluminium

Sebaliknya, kurva untuk konfigurasi hybrid dual aluminium pada Gambar 4.4 memperlihatkan variasi perilaku yang berbeda antar spesimen, yang sangat dipengaruhi oleh integritas fabrikasi tabung aluminium. Spesimen 10 dan 12 menunjukkan pola serupa di mana kapasitas menahan beban menurun drastis segera setelah mencapai IPF tanpa pembentukan *2nd peak*. Penurunan tajam ini diasosiasikan dengan kegagalan prematur pada sambungan adhesif lapisan aluminium yang menyebabkan hilangnya kekakuan struktural secara tiba-tiba. Berbeda dengan keduanya, Spesimen 11 mampu mempertahankan beban hingga mencapai puncak kedua, mengindikasikan ketahanan sambungan adhesif yang lebih baik dan memungkinkan mekanisme deformasi hybrid berkembang lebih lanjut sebelum kegagalan total. Karakteristik kurva tersebut memberikan gambaran awal mengenai respons struktur. Untuk analisis yang lebih

terukur, evaluasi kinerja akan dilanjutkan dengan pembahasan parameter *crashworthiness* berikut ini.

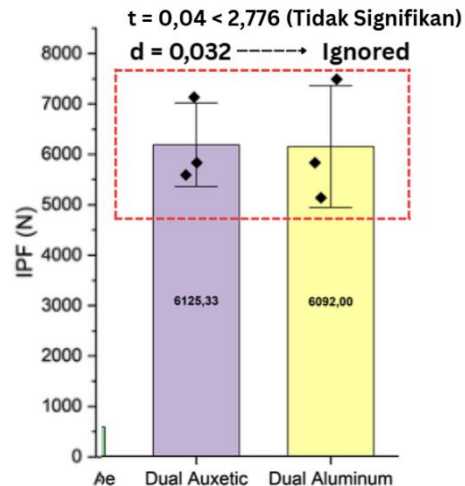
4.1.2 Initial Peak Force (IPF)

IPF merepresentasikan kekuatan maksimum yang dapat ditahan oleh sebuah struktur sebelum kegagalan plastis mulai terjadi dan merupakan indikator penting dari resistansi awal terhadap tumbukan. Gambar 4.5 menyajikan perbandingan nilai rata-rata IPF untuk keempat konfigurasi yang diuji.



Gambar 4.5 Perbandingan Nilai Parameter IPF Setiap Konfigurasi

Berdasarkan data yang disajikan pada gambar 4.5, konfigurasi hybrid, yaitu dual *auxetic* dan dual aluminium, menunjukkan nilai IPF yang jauh lebih superior dibandingkan dengan konfigurasi komponen penyusunnya. Konfigurasi Dual *Auxetic* mencatatkan IPF rata-rata sebesar 6125,33 N, sementara Dual aluminium sebesar 6092,00 N. Nilai ini menunjukkan peningkatan kekuatan puncak lebih dari enam kali lipat dibandingkan aluminium *tube* murni yang memiliki IPF rata-rata 982,00 N dan konfigurasi *auxetic tube* murni menunjukkan nilai IPF terendah, yaitu 575,67 N.

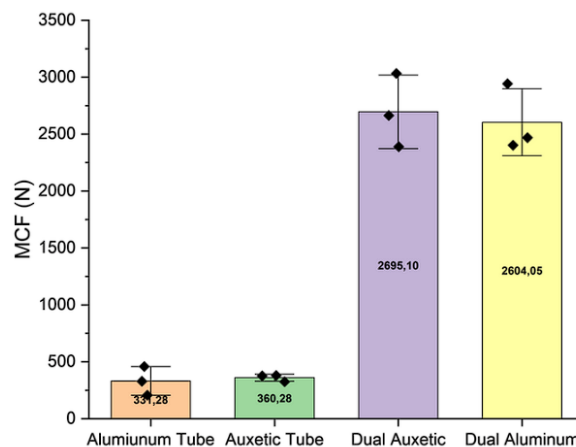


Gambar 4.6 Uji Statistik Pada Parameter IPF

Tumpang tindih data antara kedua varian hybrid dikonfirmasi oleh uji statistik dan *effect size* (kategori *Ignored*) pada gambar 4.6 yang menunjukkan bahwa perbedaan nilai IPF tersebut tidak signifikan baik secara statistik maupun praktis.

4.1.3 Mean Crushing Force (MCF)

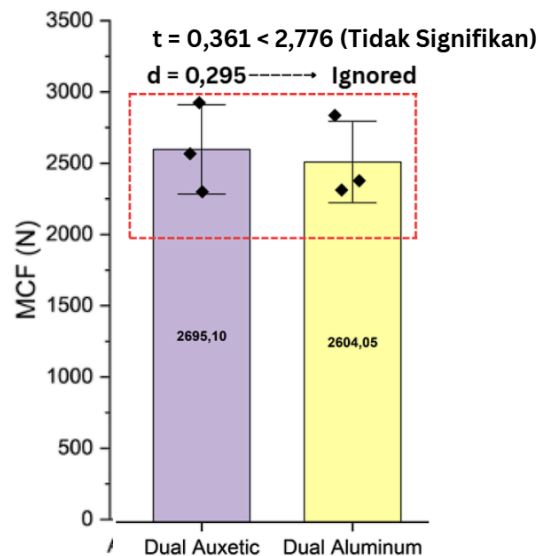
Parameter selanjutnya yang dievaluasi adalah MCF, disajikan pada Gambar 4.7. MCF merepresentasikan tingkat beban rata-rata yang dapat ditopang oleh struktur selama proses deformasi. Parameter ini merupakan indikator penting dari stabilitas struktur selama keruntuhan.



Gambar 4.7 Perbandingan Nilai MCF Setiap Konfigurasi

Hasil perbandingan MCF menunjukkan tren yang serupa dengan IPF, di mana konfigurasi hybrid secara signifikan mengungguli konfigurasi komponen penyusunnya. Konfigurasi dual *auxetic* mencatatkan MCF rata-rata tertinggi sebesar 2695,10 N, diikuti sangat dekat oleh dual aluminium dengan nilai 2604,05 N. Sementara itu, kedua

konfigurasi komponen penyusun menunjukkan nilai MCF yang jauh lebih rendah dan relatif setara satu sama lain, yaitu 331,28 N untuk aluminium *tube* dan 360,28 N untuk *auxetic tube*.

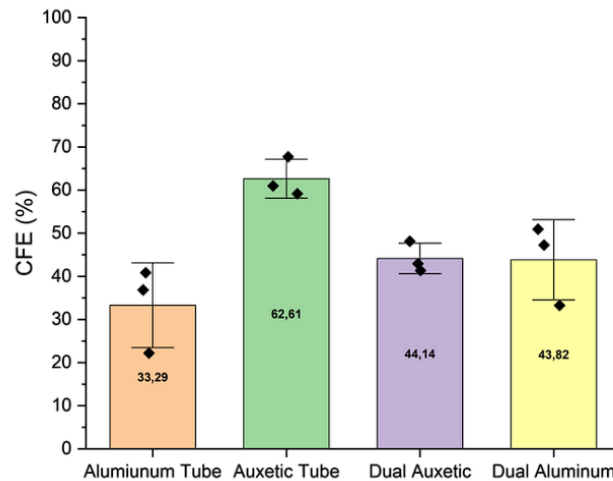


Gambar 4.8 Uji Statistik Pada Parameter MCF

Serupa dengan IPF, analisis statistik yang diilustrasikan pada gambar 4.8 mengonfirmasi bahwa variasi susunan lapisan hybrid tidak memberikan pengaruh nyata (*Ignored Effect*) terhadap nilai MCF.

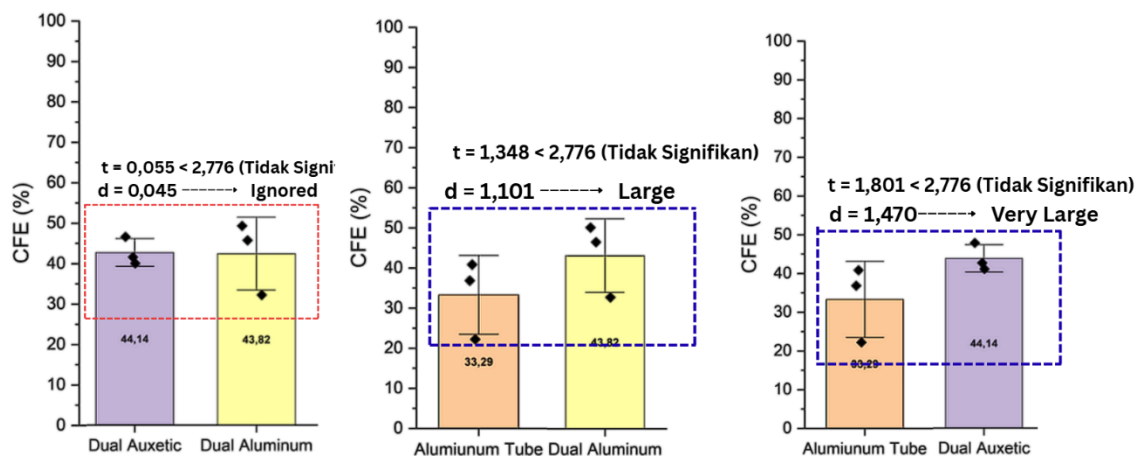
4.1.4 Crushing Force Efficiency (CFE)

CFE adalah parameter yang mengevaluasi seberapa ideal perilaku penyerapan energi sebuah struktur, dan juga dapat didefinisikan sebagai rasio antara MCF terhadap IPF. Nilai *CFE* yang mendekati 100% mengindikasikan kurva *load-displacement* yang ideal (mendekati bentuk kotak), di mana struktur terus menyerap energi pada tingkat beban yang mendekati kekuatan puncaknya.



Gambar 4.9 Perbandingan Nilai CFE Setiap Konfigurasi

Gambar 4.9 menunjukkan sebuah tren yang menarik dan berbeda dari parameter sebelumnya. Konfigurasi *auxetic tube* menunjukkan efisiensi tertinggi dengan nilai CFE rata-rata 62,61% dan memiliki konsistensi data yang sangat baik (standar deviasi kecil). Di sisi lain, kedua konfigurasi hybrid, dual *auxetic* dan dual aluminium, mencatatkan nilai CFE rata-rata yang hampir identik, yaitu 44,14% dan 43,82%. aluminium *tube* murni menunjukkan efisiensi rata-rata terendah sebesar 33,29%.

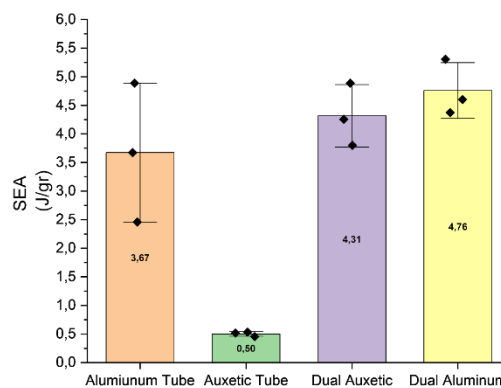


Gambar 4.10 Uji Statistik Pada Parameter CFE

Meskipun kinerja antar varian hybrid setara (*Ignored Effect*), analisis *effect size* pada gambar 4.10 menunjukkan bahwa struktur hybrid memberikan peningkatan stabilitas deformasi yang substansial (*Large to Very Large Effect*) dibandingkan baseline aluminium, terlepas dari posisi lapisan *auxetic*.

4.1.5 Specific Energy Absorption (SEA)

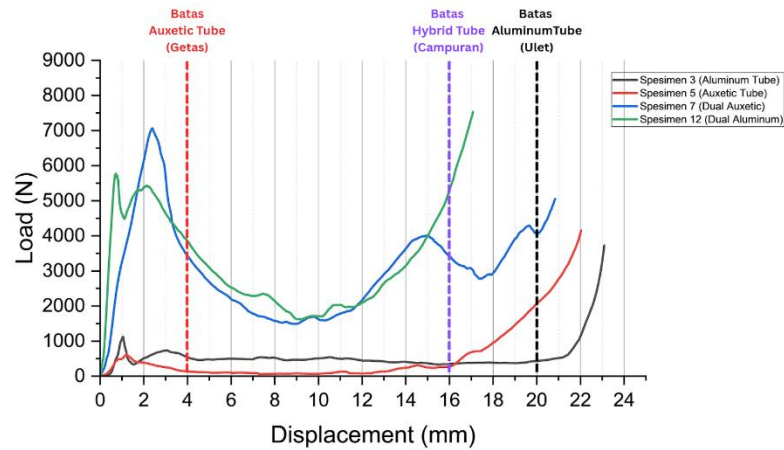
Parameter yang paling penting dalam analisis *crashworthiness* adalah Penyerapan Energi Spesifik (SEA), disajikan pada Gambar 4.11. SEA mengukur jumlah energi yang diserap (luas di bawah kurva *load-displacement*) per satuan massa spesimen. Ini adalah parameter utama untuk mengevaluasi kemampuan *crashworthiness* sebuah struktur, di mana nilai SEA yang tinggi menunjukkan kemampuan penyerapan energi yang besar dengan bobot yang ringan.



Gambar 4.11 Perbandingan Nilai SEA Setiap Konfigurasi

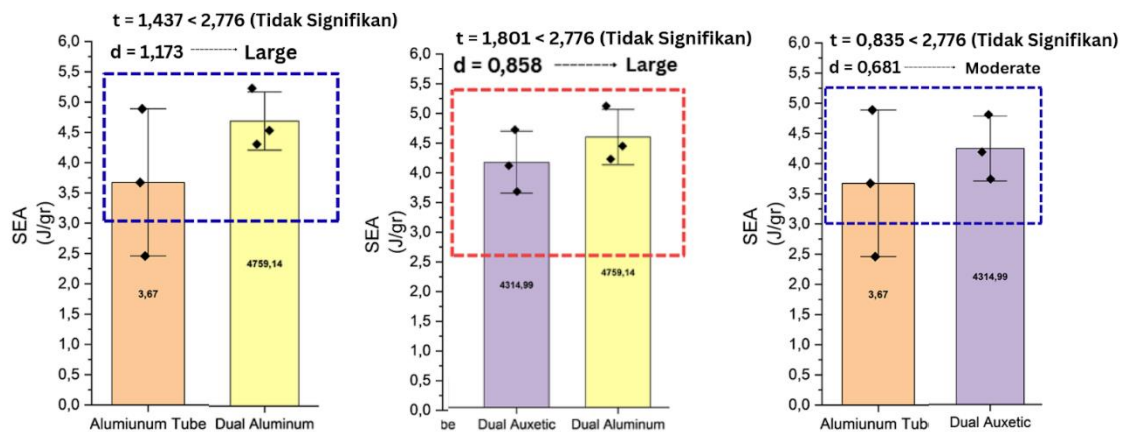
Perhitungan SEA menggunakan batas *displacement* yang berbeda untuk setiap jenis konfigurasi guna merefleksikan rentang kerja efektifnya, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.12

1. Untuk material getas (*auxetic tube*), batas integrasi 4 mm digunakan karena struktur telah mengalami fraktur di titik tersebut, sehingga struktur tidak lagi menahan beban secara efektif (Wirawan et al., 2024)
2. Untuk konfigurasi hybrid, batas 16 mm dipilih sesuai dengan referensi literatur (Tao et al., 2023) yang merekomendasikan 60-70% dari tinggi spesimen sebagai rentang deformasi efektif untuk struktur hybrid.
3. Untuk material ulet (*aluminium tube*), batas 20 mm digunakan karena mendekati titik awal densifikasi (Hermawan et al., 2025)



Gambar 4.12 Batas Penentuan Deformasi Efektif

Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi Dual aluminium memiliki SEA rata-rata tertinggi sebesar 4,76 J/g, diikuti oleh Dual *Auxetic* sebesar 4,31 J/g dan aluminium *tube* sebesar 3,67 J/g. *auxetic tube* kembali menunjukkan nilai terendah dengan SEA rata-rata 0,5 J/g



Gambar 4.13 Uji Statistik Pada Parameter SEA

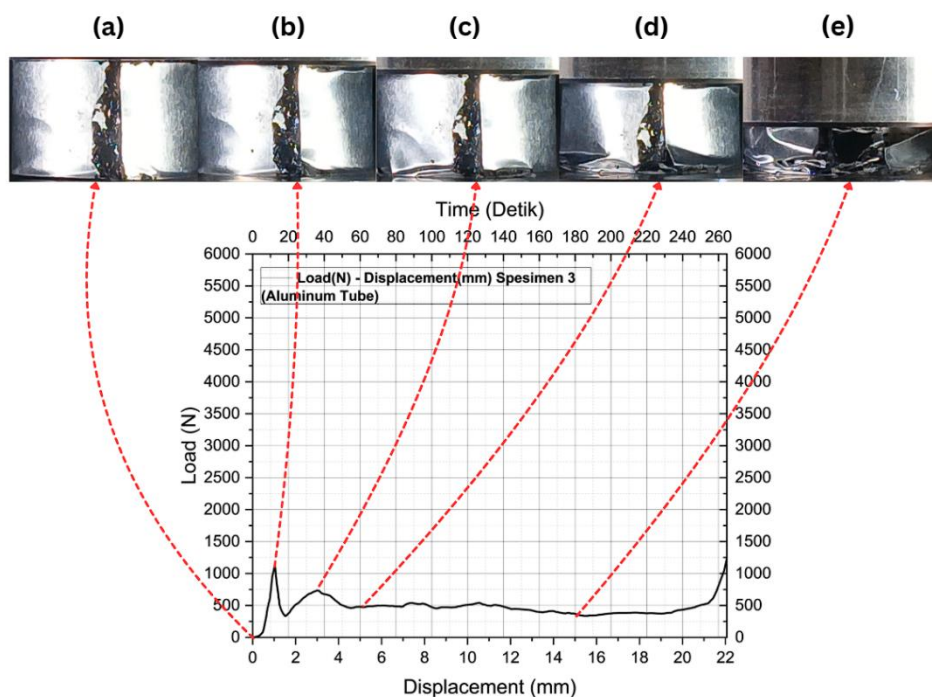
Pola distribusi data yang serupa dengan parameter CFE juga ditunjukkan oleh parameter SEA, seperti yang terlihat pada gambar 4.11 Terlihat bahwa rentang data antara konfigurasi aluminium *tube* dan kedua varian Hybrid saling tumpang tindih, sementara konfigurasi *auxetic tube* terpisah sendiri dengan nilai efisiensi yang paling rendah. Walaupun terdapat *overlap*, analisis *effect size* menunjukkan bahwa perbedaan kinerja antar konfigurasi tetap ada dan terukur. Analisis *effect size*, seperti pada gambar 4.13, mengungkapkan bahwa konfigurasi dual aluminium memiliki keunggulan praktikal (*Large Effect*) dibandingkan dual *auxetic* maupun baseline aluminium, mengindikasikan bahwa penggunaan lapisan luar dan dalam aluminium paling efektif dalam meningkatkan rasio penyerapan energi per massa

4.2 Pola Keruntuhan dan Mekanisme Deformasi

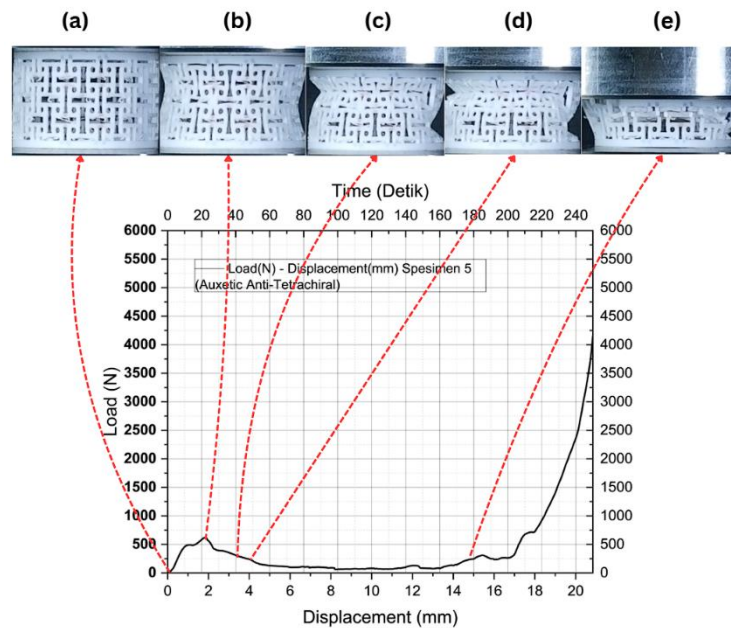
Analisis pola keruntuhan (*collapse pattern*) dan mekanisme deformasi merupakan bagian krusial dalam evaluasi kinerja *crashworthiness* sebuah struktur penyerap energi. Pola deformasi tidak hanya memberikan gambaran visual mengenai wujud akhir spesimen setelah deformasi, tetapi juga menjelaskan proses dan mekanisme fisik yang mendasari data kuantitatif pada kurva *load-displacement*. Untuk menganalisis mekanisme dan deformasi secara detail, akan dipilih satu spesimen yang kurva *load-displacement* serta pola keruntuhannya paling representatif mewakili perilaku rata-rata dari kelompok konfigurasi tersebut. Analisis mendalam pada spesimen perwakilan ini akan digunakan untuk mengilustrasikan fenomena-fenomena kunci yang terjadi selama proses uji tekan *quasi-static*.

4.2.1 Mekanisme Deformasi Struktur Komponen Tunggal (*Baseline*)

Perbedaan karakteristik kurva *load-displacement* antara kedua material dasar (*baseline*) berkaitan dengan mekanisme fisik bagaimana struktur tersebut merespons gaya tekan.



Gambar 4.14 Pola Keruntuhan Spesimen 3 (*aluminium tube*)

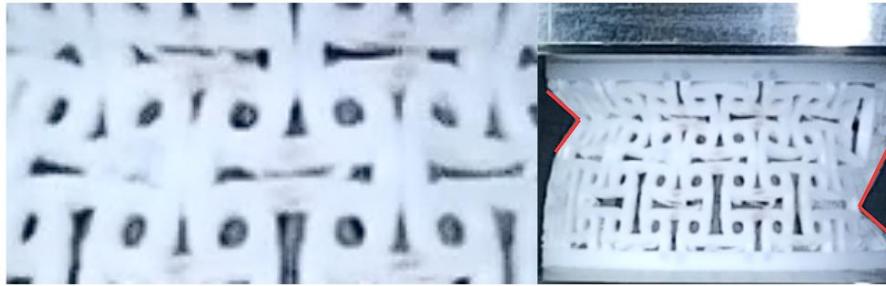


Gambar 4.15 Pola Keruntuhan Spesimen 5 (*Auxetic tube*)

Pada aluminium *tube*, mekanisme deformasi yang dominan adalah *progressive plastic buckling*. Sebagaimana terlihat pada foto deformasi (Gambar 4.14), dinding tabung melipat keluar dan ke dalam secara bergantian. Namun, karena dinding tabung yang tipis, lipatan yang terbentuk cenderung tidak stabil. Ketidakstabilan ini terkonfirmasi secara visual pada Gambar 4.16, yang memperlihatkan dominasi mode asimetris menyerupai wajik (*diamond mode*), sebuah pola deformasi yang secara mekanis kurang efisien dalam mendisipasikan energi karena melibatkan volume deformasi plastis yang lebih sedikit. Ketidakstabilan dan inefisiensi pola lipatan ini menjelaskan mengapa nilai CFE pada tabung aluminium relatif rendah (33,29%), serta berdampak pada capaian nilai SEA yang tidak maksimal.

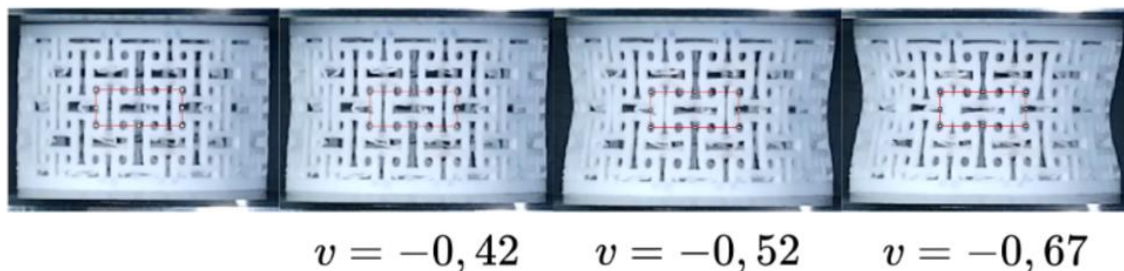


Gambar 4.16 Pola *buckling* Mode Asimetris Wajik (*diamond*)
(Guillow et al, 2001)



Gambar 4.17 *Twisting Deformation* Pada *Auxetic Anti-tetrachiral*

Perilaku deformasi unik pada *auxetic tube* yang didominasi oleh mekanisme *twisting deformation* memiliki korelasi langsung dengan karakteristik *Negative Poisson's Ratio* (NPR) yang terukur. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa struktur ini memiliki nilai $\nu = -0,67$ pada fase elastis. Secara mekanika, nilai poisson ratio negatif ini mengonfirmasi adanya kontraksi radial yang dipicu oleh rotasi ligamen *anti-tetrachiral*. Fenomena ini menciptakan mekanisme *Compression-Torsion Coupling* (CTC) yang mendistribusikan gaya tekan secara lebih merata melalui rotasi internal struktur. Efek stabilitas dari rotasi ligamen inilah yang menyebabkan tabung *auxetic* mencatatkan nilai CFE tertinggi sebesar 62,61%. Karakteristik NPR mencegah terjadinya *global buckling* (tekuk mendadak) yang biasanya menjatuhkan beban secara drastis, sehingga menjaga daerah *plateau* tetap stabil dan meningkatkan nilai MCF relatif terhadap IPF-nya.

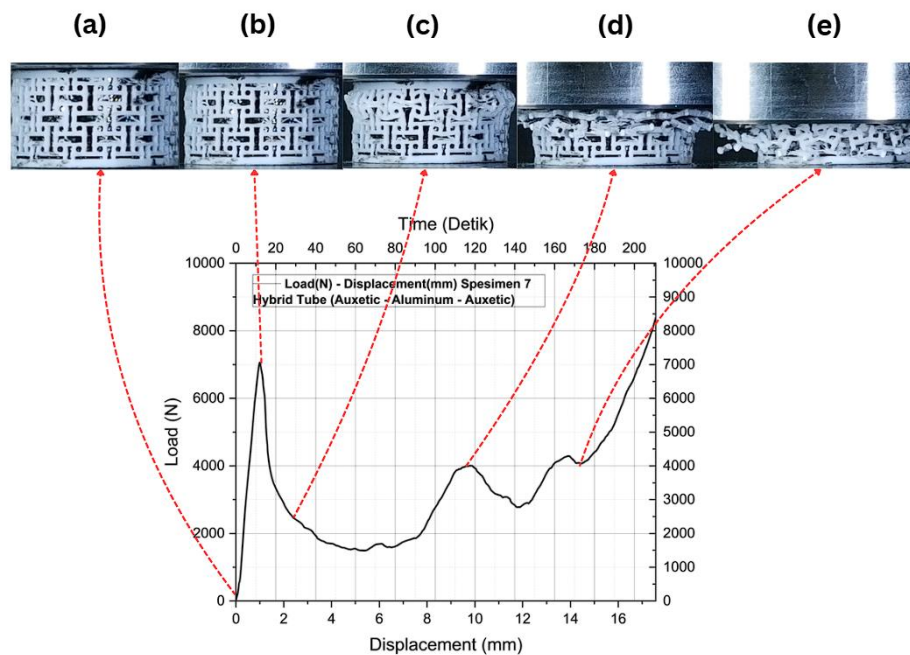


Gambar 4.18 Negatif Poisson's Ratio Pada *Auxetic Tube*

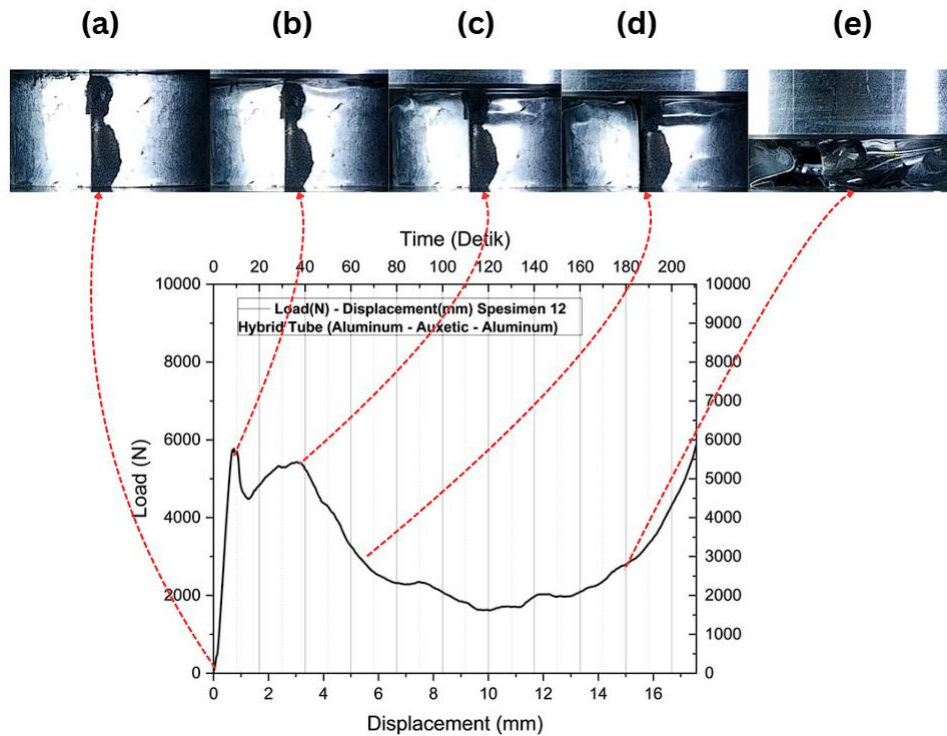
Namun, meskipun sifat NPR memberikan keuntungan signifikan pada stabilitas gaya (CFE), hal tersebut tidak mampu mengangkat nilai SEA yang tetap rendah (0,5 J/g). Rendahnya kapasitas penyerapan energi spesifik ini merupakan konsekuensi langsung dari sifat material PLA+ yang getas. Walaupun mekanisme rotasi ligamen berusaha menjaga integritas struktur, keterbatasan kegetasan material menyebabkan regangan plastis menjadi sangat terbatas. Akibatnya, struktur hanya mampu menahan beban dalam rentang deformasi yang pendek (sekitar 4 mm) sebelum akhirnya mengalami fraktur total. Terhentinya proses penyerapan energi secara prematur akibat patahnya material getas inilah yang menjelaskan mengapa struktur dengan efisiensi gaya (CFE) terbaik justru memiliki kapasitas penyerapan energi per satuan massa (SEA) yang paling rendah di antara konfigurasi lainnya.

4.2.2 Interaksi Antar-Lapisan dan Efek Sinergi pada Konfigurasi Hybrid

Lompatan performa kekuatan IPF dan MCF yang tinggi pada konfigurasi hybrid tidak hanya disebabkan oleh penjumlahan ketebalan material, melainkan juga akibat adanya efek interaksi antar-lapisan (*interlayer interaction effect*). Pada saat kompresi, aluminium cenderung mengalami ekspansi radial (menggembung ke luar), sementara struktur *auxetic* cenderung mengalami kontraksi radial (mempompas ke dalam) atau setidaknya menahan ekspansi, seperti yang terlihat pada gambar 4.17. Ketika digabungkan menggunakan perekat, terjadi mekanisme saling mengunci (*Interlocking confinement*). Seperti yang terlihat pada gambar 4.18 dan 4.19, kapasitas *load* mulai menurun ketika perekat mulai gagal dalam merekatkan kedua struktur.



Gambar 4.19 Keruntuhan Spesimen 12 (Dual *Auxetic*)



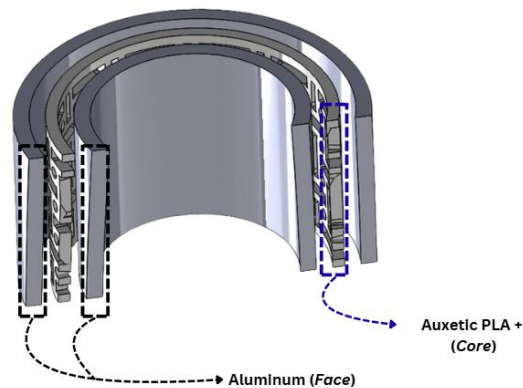
Gambar 4.20 Pola Keruntuhan Spesimen 12 (Dual aluminium)



Gambar 4.21 Delaminasi Lokal Pada Dual *Auxetic*

Teramati juga adanya delaminasi lokal pada konfigurasi dual *auxetic* di mana sebagian kecil lapisan *auxetic* terluar terkelupas dan melendut keluar, seperti yang terlihat pada gambar 4.20. Fenomena ini mengindikasikan bahwa ikatan adhesif di area tersebut telah gagal. Lendutan keluar ini juga kemungkinan besar disebabkan oleh desakan dari lapisan inti aluminium yang secara alami cenderung mengembang keluar (*buckling*), sehingga gaya ekspansi radial dari aluminium lebih dominan daripada efek penyusutan radial dari struktur *auxetic*. Hilangnya interaksi ini menyebabkan penurunan kapasitas *load* struktur karena tidak adanya dukungan antar-lapisan, seperti yang terlihat pada gambar 4.18 (c). Selain itu, transisi beban yang tidak mulus akibat terlepasnya lapisan menyebabkan fluktuasi gaya yang besar pada kurva *load-displacement*, yang secara

langsung menurunkan nilai CFE dan membatasi potensi SEA untuk mencapai titik maksimalnya

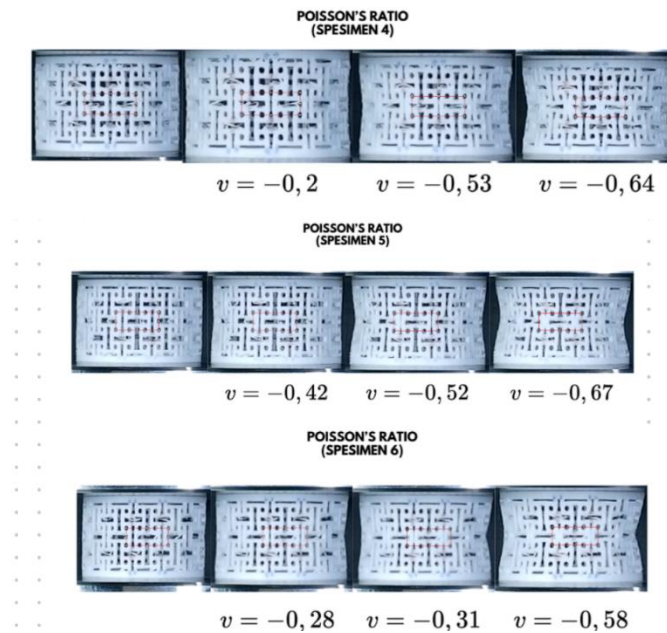


Gambar 4.22 Struktur Sandwich Dual aluminium

Tingginya nilai SEA pada konfigurasi dual aluminium menunjukkan efektivitas penerapan prinsip struktur *sandwich*. Secara umum, struktur *sandwich* dapat meningkatkan SEA karena adanya pembagian peran material yang sinergis (Zenkert, 1997). Material *face* idealnya harus memiliki *high compression* dan *tensile strength* karena bertugas menanggung beban utama, sedangkan material *core* berfungsi sebagai *stabilizer* untuk mencegah kegagalan dini pada *face*. Dalam penelitian ini, aluminium memiliki kekuatan yang jauh lebih tinggi relatif terhadap PLA+, sehingga sangat tepat ditempatkan sebagai *face* (kulit luar), seperti yang terlihat pada gambar 4.21. Di sisi lain, struktur *Auxetic* berfungsi sebagai *core* karena selain menstabilkan dinding aluminium, struktur ini juga memiliki kemampuan penyerapan energi yang tinggi melalui mekanisme deformasi uniknya. Oleh karena itu, konfigurasi dual aluminium yang menempatkan material keras di sisi luar dianggap lebih optimal dibandingkan dual *auxetic*, sehingga mampu menghasilkan performa penyerapan energi spesifik yang lebih unggul.

4.2.3 Evaluasi Poisson's Rasio

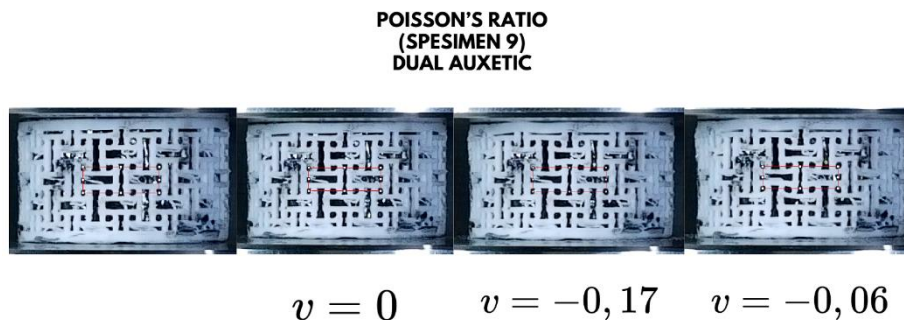
Untuk memvalidasi observasi visual mengenai mekanisme deformasi yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya, dilakukan analisis kuantitatif terhadap deformasi lateral menggunakan parameter Poisson's Ratio (ν). Pengukuran ini bertujuan untuk membuktikan efektivitas geometri *anti-tetrachiral* dalam menghasilkan perilaku *negative Poisson's ratio* (NPR) dan menganalisis dampaknya terhadap stabilitas struktur hybrid.



Gambar 4.23 Negatif Poisson's Ratio Auxetic Tube

Pada gambar 4.23, data pengukuran menunjukkan bahwa poisson ratio di daerah elastis dari ke tiga spesimen auxetic tube konsisten mendekati nilai -0,6. Nilai poisson's negatif ini mengkonfirmasi secara kuantitatif bahwa mekanisme rotasi node (seperti yang diamati pada Gambar 4.17) berkerja semakin efektif saat struktur tertekan lebih dalam. Hal ini menjelaskan mengapa kurva pada gaya auxetic tube cenderung lebih stabil (CFE tinggi), karena struktur secara aktif memadat ke arah dalam (*lateral shrinkage*) sehingga mencegah terjadinya *global buckling* yang tidak terkontrol.

Sebaliknya pengukuran pada konfigurasi Dual Auxetic (Spesimen 9), seperti yang terlihat pada gambar 4.24, mengungkapkan perbedaan dari material penyusunnya. Nilai Poisson's Ratio yang terukur sangat rendah, berkisar antara 0 hingga -0,17, dan bahkan mendekati perilaku material solid biasa pada deformasi lanjut.

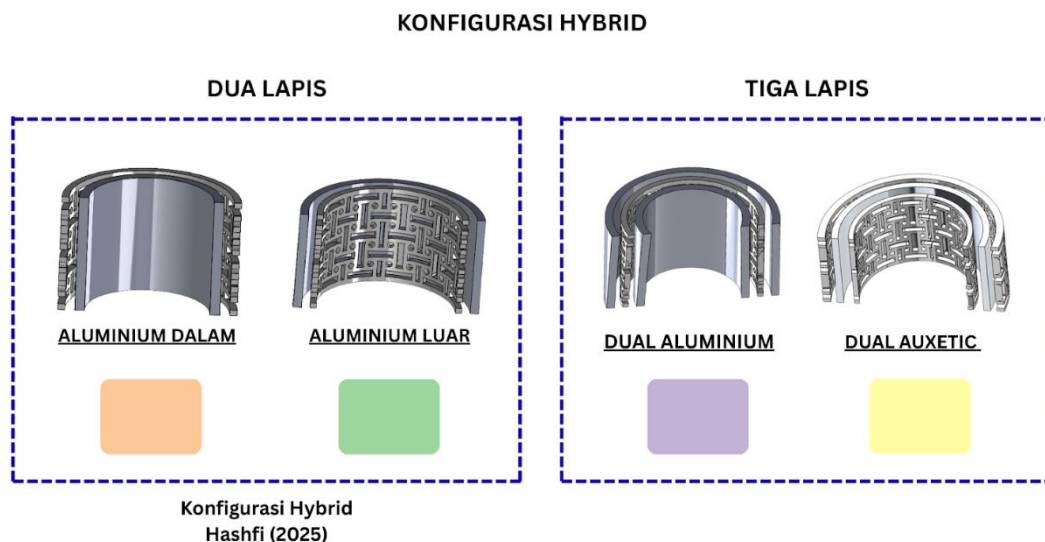


Gambar 4. 24 Possion's Ratio Dual auxetic

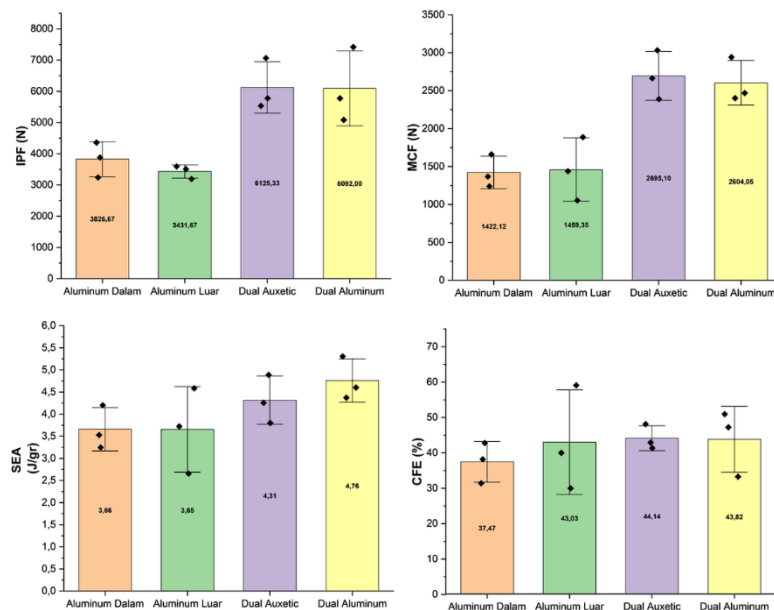
Data ini memvalidasi temuan visual pada Sub-bab 4.2.2 mengenai fenomena delaminasi lokal. Rendahnya nilai Poisson's Ratio menunjukkan bahwa interaksi antar dua lapisan auxetic justru memicu hambatan mekanis (*geometric locking*). Lapisan-lapisan tersebut saling mengunci sehingga node tidak dapat berputar bebas. Akibatnya, mekanisme penyusutan lateral terhambat, dan struktur kehilangan kemampuan densifikasi alaminya. Hilangnya sifat auxetic ini berkorelasi langsung dengan penurunan performa penyerapan energi (SEA) pada Dual Auxetic dibandingkan Dual Aluminium, karena struktur gagal memanfaatkan potensi penuh dari geometri selulernya.

4.3 Analisis Pengaruh Jumlah Lapisan

Untuk memvalidasi efektivitas konfigurasi tiga lapis yang diusulkan dalam penelitian ini, dilakukan studi komparasi terhadap konfigurasi dua lapis (*bi-tubular*) yang diperoleh dari penelitian Hashfi (2025), dengan desain eksperimen yang sama. Perbandingan visual antara kedua jenis konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 4.22, sedangkan perbandingan kinerja crashworthiness antar konfigurasi disajikan pada Gambar 4.23.



Gambar 4.25 Perbandingan Susunan Lapisan: Konfigurasi Tiga Lapis dengan Dua Lapis



Gambar 4.26 Perbandingan Parameter Crashworthiness Antara Susunan Dua Lapis dan Tiga Lapis

Jika melihat pada gambar 4.23, parameter kekuatan IPF dan MCF pada struktur tiga lapis (dual aluminium dan dual *auxetic*) menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan struktur dua lapis. Hal ini adalah fenomena yang wajar karena penambahan lapisan material secara langsung meningkatkan luas penampang struktur yang menahan beban, sehingga gaya reaksi yang dihasilkan pun bertambah. Menariknya, meskipun kekuatan meningkat, rata-rata CFE antara konfigurasi tiga lapis dan dua lapis cenderung setara, yaitu berada di kisaran 43-44%. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan lapisan ketiga tidak mengubah karakteristik kestabilan kurva gaya secara drastis.

Temuan paling menonjol terlihat pada parameter SEA. Secara teoritis, penambahan material akan meningkatkan massa struktur yang berpotensi menurunkan nilai SEA jika penyerapan energinya tidak sebanding. Namun, data menunjukkan bahwa dual aluminium (tiga lapis) justru mencatatkan rata-rata SEA tertinggi (4,76 J/g) dibandingkan konfigurasi lainnya. Hal ini membuktikan bahwa meskipun massa struktur bertambah, lonjakan kapasitas penyerapan energi yang dihasilkan jauh lebih tinggi, sehingga rasio energi-per-massa (SEA) tetap mengalami peningkatan. Keunggulan tersebut dapat dijelaskan melalui mekanisme Struktur Sandwich Ideal sebagai berikut:

- Konfigurasi tiga Lapis (dual aluminium): Membentuk formasi *Face-Core-Face* yang utuh. Struktur inti (*core*) *auxetic* terperangkap di antara dua dinding aluminium. Kondisi ini menciptakan efek *double confinement* yang memaksa *core* bekerja maksimal menyerap energi tanpa bisa melendut bebas. Mekanisme ini efektif mencegah instabilitas deformasi pada *face* dan memicu densifikasi material yang lebih padat, sebuah fenomena interaksi sinergis yang menurut Zenkert (1995) menjadi kunci utama peningkatan SEA pada struktur *sandwich*

- Konfigurasi dua Lapis: Hanya memiliki formasi *Face-Core* atau *Core-Face*, di mana salah satu sisi *core* tidak memiliki penopang (sisi bebas), sehingga efek *confinement* menjadi tidak efektif. Fenomena ini sejalan dengan temuan Sharifi et al. (2015) pada struktur *bi-tubular*, yang mengindikasikan bahwa interaksi antar dinding adalah kunci efisiensi energi. Ketidadaan kontak fisik akibat celah/gap menyebabkan struktur *bi-tubular* bekerja secara independen, sehingga menghilangkan manfaat mekanis dari *interaction effect*. Akibatnya, potensi penyerapan energi dari material inti tidak dapat dieksploitasi sepenuhnya, menghasilkan nilai SEA yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi tiga lapis.

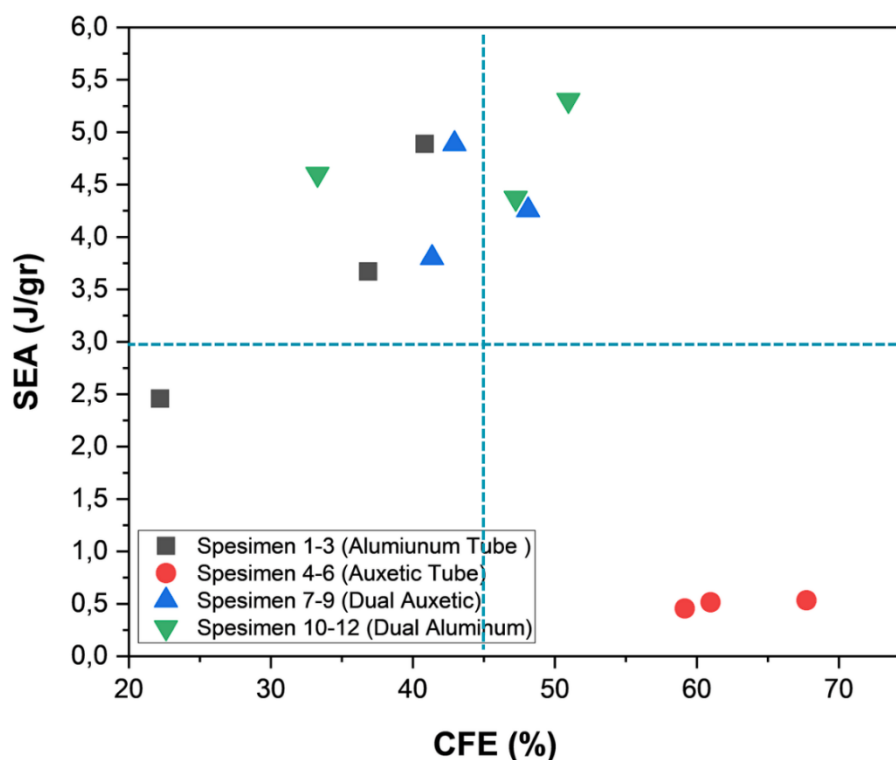
Dengan demikian, terbukti bahwa konfigurasi tiga lapis bukan sekadar penumpukan material, melainkan sebuah optimasi desain untuk mengaktifkan mekanisme kerja struktur *sandwich* yang sesungguhnya.

4.4 Perbandingan Performa dan Potensi Aplikasi

Evaluasi menyeluruh dilakukan dengan menggabungkan seluruh data pengujian untuk memetakan karakteristik kinerja dari setiap variasi desain. Pemetaan ini bertujuan untuk mengidentifikasi keunggulan relatif masing-masing konfigurasi ditinjau dari seluruh aspek *crashworthiness*. Hasil identifikasi ini kemudian menjadi dasar dalam merekomendasikan aplikasi yang paling tepat untuk masing-masing desain struktur.

4.4.1 Pemetaan Kinerja *Crashworthiness*

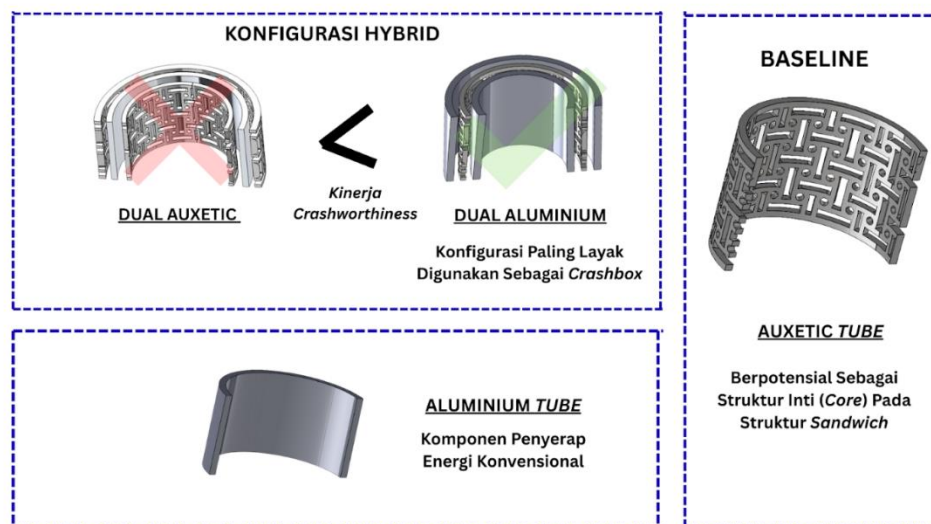
Evaluasi kinerja *crashworthiness* dilakukan secara menyeluruh menggunakan pemetaan multi-parameter yang menghubungkan efisiensi massa dengan kualitas deformasi struktur. mengacu pada kriteria desain optimal menurut Zhang et al. (2007), yang menyatakan bahwa komponen penyerap energi ideal harus mampu memaksimalkan SEA sekaligus menjaga IPF tetap rendah MCF yang tinggi, kondisi yang secara matematis diterjemahkan sebagai CFE yang tinggi. Berlandaskan prinsip tersebut, evaluasi kinerja pada penelitian ini dipetakan melalui plot SEA terhadap CFE sebagaimana tersaji pada Gambar 4.24. Pemetaan ini dipilih juga karena kedua variabel tersebut merupakan parameter ternormalisasi, sehingga mampu merepresentasikan kualitas desain secara objektif, memvisualisasikan keseimbangan antara efisiensi massa dan stabilitas deformasi tanpa bias oleh dimensi fisik maupun massa absolut spesimen.



Gambar 4.27 Grafik SEA-CFE

Berdasarkan pemetaan tersebut, *auxetic tube* menunjukkan karakteristik 'stabil namun lunak' dengan CFE tertinggi di area kanan-bawah, mengukuhkan potensinya sebagai struktur inti penstabil pada struktur sandwich, sedangkan aluminium *tube* menempati kuadran performa CFE terendah akibat kerentanannya terhadap instabilitas. Penerapan konfigurasi *hybrid* terbukti efektif menggeser posisi performa ke kuadran tengah-atas, di mana sinergi struktur berhasil menggabungkan kapasitas penyerapan energi (SEA) yang tinggi dari aluminium dengan kestabilan deformasi (CFE) dari *auxetic*, menghasilkan struktur yang tidak hanya ringan dan kuat, tetapi juga memiliki mekanisme keruntuhan yang lebih terkontrol dibandingkan komponen penyusun tunggalnya.

4.4.2 Potensi Aplikasi Tiap Konfigurasi



Gambar 4.28 Pemetaan Potensi Aplikasi

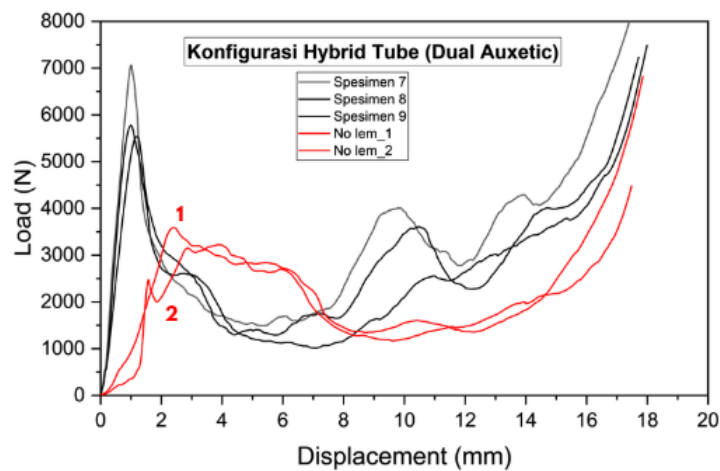
Gambar 4.26 merangkum pemetaan potensi aplikasi dari setiap konfigurasi yang diuji. aluminium *tube* ditempatkan sebagai representasi komponen penyerap energi konvensional, sedangkan *auxetic tube* dinilai memiliki potensi spesifik sebagai struktur inti (*core*) yang ideal untuk aplikasi struktur *sandwich*. Pada tingkatan konfigurasi hybrid, perbandingan kinerja menunjukkan bahwa dual aluminium memiliki performa *crashworthiness* yang lebih unggul dibandingkan dual *auxetic*. Hal ini menegaskan bahwa kombinasi material *face* aluminium dengan *core auxetic* merupakan susunan yang paling efektif, sehingga dual aluminium ditetapkan sebagai konfigurasi yang paling layak direkomendasikan sebagai komponen *crashbox*.

4.5 Analisis Penambahan Lem adhesif

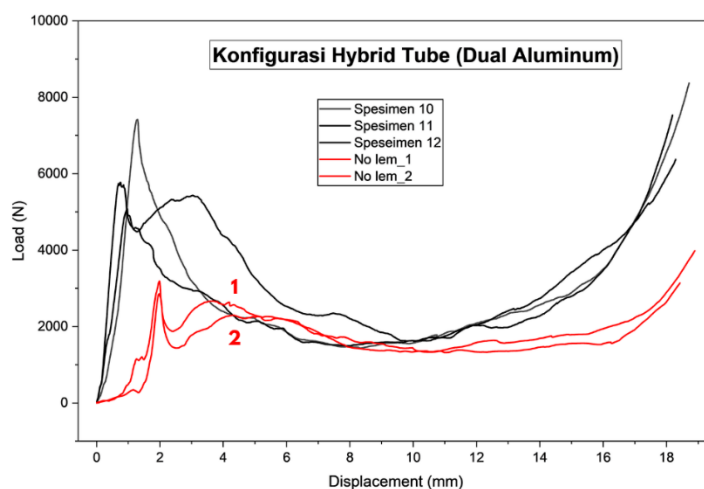
Untuk memverifikasi sejauh mana peran ikatan antar-lapisan (*interlayer bonding*) dalam menciptakan sinergi pada struktur hybrid, dilakukan pengujian komparasi terhadap spesimen Dual Auxetic dan Dual Aluminium yang dirakit tanpa menggunakan perekat (*no adhesive*). Pada konfigurasi ini, interaksi antar-lapisan hanya mengandalkan gesekan (*friction*) dan kontak mekanis semata.

4.5.1 Karakteristik Kurva Gaya

Perbandingan kurva *load-displacement* antara konfigurasi standar (dengan lem) dan tanpa lem diperlihatkan pada Gambar 4.29 dan 4.30. Secara visual, kurva spesimen tanpa lem (garis merah) menunjukkan karakteristik yang lebih landai di awal pembebanan dibandingkan spesimen dengan lem (garis hitam/abu-abu).



Gambar 4. 29 Komparasi Dual Auxetic Lem Dan Tanpa Lem



Gambar 4. 30 Komparasi Dual Aluminium Lem dan Tanpa Lem

Absennya perekat menyebabkan struktur kehilangan kekakuan awalnya. Lapisan-lapisan mengalami slip relatif satu sama lain, sehingga IPF turun secara signifikan. Berdasarkan

data perbandingan tabel 4.2, IPF dari kedua konfigurasi hybrid mengalami penurunan yang signifikan, bahkan sampai setengahnya.

Tabel 4.2 Crashworthiness Parameter Konfigurasi Dual Lem dan Tanpa Lem

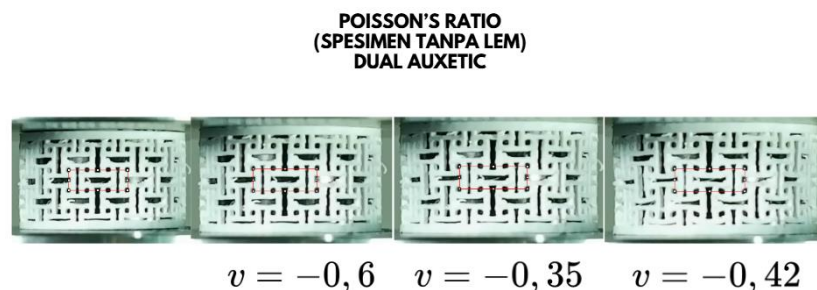
TANPA LEM								
Konfigurasi	Spesimen	Massa	EA (N.mm)	EA (J)	IPF (N)	SEA (J/gr)	MCF (N)	CFE(%)
Dual Auxetic	1	8,30	32639,00	32,64	3583,00	3,93	2039,94	56,93
	2	8,17	30235,81	30,24	3223,00	3,70	1889,74	58,63
Dual Aluminum	1	7,22	26387,96	26,39	3186,00	3,65	1649,25	51,77
	2	7,53	25336,00	25,34	2855,00	3,36	1583,50	55,46

DENGAN LEM								
Dual Auxetic	7	9,927	48525,82	48,53	7065,00	4,89	3032,86	42,93
	8	10,013	42618,85	42,62	5535,00	4,26	2663,68	48,12
	9	10,057	38220,13	38,22	5776,00	3,80	2388,76	41,36
Dual Aluminum	10	8,586	39500,38	39,50	7418,00	4,60	2468,77	33,28
	11	8,791	38426,87	38,43	5084,00	4,37	2401,68	47,24
	12	8,871	47067,00	47,07	5774,00	5,31	2941,69	50,95

Penurunan drastis pada IPF ini ternyata memberikan dampak positif pada parameter CFE. Karena puncak awal tidak terlalu ekstrim, rasio antara MCF dan IPF menjadi lebih seimbang. Fenomena ini mengindikasikan bahwa tanpa ikatan kaku, struktur terhindar dari lonjakan gaya awal yang memicu deselerasi mendadak, menghasilkan profil keruntuhan yang lebih stabil namun dengan kapasitas penahan beban total yang lebih rendah.

4.5.2 Evaluasi Poisson's Ratio

Temuan paling menarik terlihat pada perilaku deformasi lateral konfigurasi Dual Auxetic Tanpa Lem. Jika sebelumnya varian dengan lem menunjukkan nilai Poisson's Ratio mendekati nol akibat penguncian geometris, varian tanpa lem justru menunjukkan pemulihan sifat auxetic yang mendekati struktur penyusunnya.



Gambar 4.31 Poisson's Ratio Dual Auxetic Tanpa Lem

Berdasarkan hasil pengukuran pada Gambar 4.31, nilai Poisson's Ratio pada Dual Auxetic Tanpa Lem tercatat cukup negatif. Nilai ini sangat mendekati karakteristik *Single Auxetic Tube* yang berkisar di -0,6. Hal ini membuktikan Tanpa adanya perekat, lapisan auxetic

bagian dalam (core) dan bagian luar (face) tidak saling mengunci. Lapisan auxetic bebas melakukan kontraksi lateral (menyusut) tanpa tertahan oleh lapisan di sebelahnya. Akibatnya, mekanisme rotasi node dapat bekerja kembali secara bebas layaknya tabung tunggal, menghasilkan efek negatif Poisson's ratio yang besar

Meskipun penghilangan lem meningkatkan kestabilan (CFE naik) dan mengembalikan sifat auxetic (PR makin negatif), hal ini harus dibayar dengan penurunan kapasitas penyerapan energi total. Data pada tabel 4.2 menunjukkan penurunan nilai SEA yang konsisten, Dual Auxetic Turun dari 4,31 J/g (lem) menjadi 3,82 J/g (tanpa lem), sedangkan untuk Dual Aluminium Turun dari 4,76 J/g (lem) menjadi 3,51 J/g (tanpa lem). Analisis ini menyimpulkan bahwa perekat berfungsi sebagai pedang bermata dua. Di satu sisi, lem penting untuk menyatukan kekuatan antar-lapisan guna mencapai SEA maksimal yang didapatkan dari efek sinergi. Namun di sisi lain, ikatan yang terlalu kaku membatasi gerak bebas auxetic yang dapat menurunkan nilai negatif PR sehingga memicu lonjakan gaya awal tinggi mengakibatkan turunnya CFE. Konfigurasi tanpa lem menawarkan stabilitas yang lebih baik menyerupai *Auxetic Tube* murni, namun gagal mencapai kapasitas penyerapan energi setinggi konfigurasi yang dengan lem.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental, pengolahan data, dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh Penggabungan Material

Penggabungan struktur *auxetic* (PLA+) dan aluminium *tube* menjadi struktur *sandwich* memberikan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan komponen tunggalnya. Struktur *hybrid* mampu meningkatkan kekuatan puncak (IPF) hingga lebih dari enam kali lipat dibandingkan aluminium *tube* murni (dari ~982 N menjadi ~6092 N). Selain itu, terjadi lonjakan pada *Mean Crushing Force* (MCF) dan *Specific Energy Absorption* (SEA). Peningkatan ini terjadi akibat adanya efek interaksi antar-lapisan (*interlocking confinement*), di mana struktur *auxetic* menahan deformasi dinding aluminium, dan sebaliknya aluminium memberikan kekakuan pada *auxetic*, sehingga mengubah mode kegagalan menjadi lebih terkontrol dibandingkan aluminium murni yang mengalami ketidakstabilan (*unstable buckling*).

2. Analisis Perbedaan Susunan Komponen

Variasi susunan lapisan (konfigurasi) memiliki dampak nyata, terutama pada efisiensi penyerapan energi per massa (SEA). Konfigurasi Dual Aluminum (Aluminium-Auxetic-Aluminium) terbukti lebih unggul dibandingkan Dual Auxetic (Auxetic-Aluminium-Auxetic). Hal ini disebabkan karena susunan *Dual Aluminum* memenuhi prinsip struktur *sandwich* ideal (*Face-Core-Face*), di mana lapisan aluminium luar dan dalam memberikan efek *double confinement* yang maksimal terhadap inti *auxetic*. Sebaliknya, pada konfigurasi *Dual Auxetic*, terjadi fenomena delaminasi lokal pada lapisan terluar karena tidak adanya penopang sisi luar, yang menghambat potensi penyerapan energi maksimal.

3. Konfigurasi Terbaik Untuk Crashbox

Berdasarkan pemetaan kinerja crashworthiness, konfigurasi Dual Aluminum ditetapkan sebagai desain terbaik karena menghasilkan nilai SEA tertinggi (4,76 J/g) dengan CFE yang stabil (43,82%). Meskipun konfigurasi ini menghasilkan IPF yang tinggi (~6092 N) akibat peningkatan kekakuan struktur, hal tersebut masih dapat ditoleransi dan dioptimalkan lebih lanjut. Tingginya IPF bukanlah kelemahan permanen, melainkan karakteristik geometris yang dapat direduksi dengan penerapan inisiator keruntuhan (trigger) pada desain dinding terluar, sehingga struktur tetap aman bagi penumpang namun memiliki kapasitas penyerapan energi yang superior.

5.2 Saran

Berdasarkan kendala dan keterbatasan yang ditemui selama proses penelitian, penulis menyarankan beberapa hal berikut untuk pengembangan penelitian selanjutnya agar diperoleh hasil yang lebih akurat:

1. Penelitian ini terbatas pada uji *quasi-static*. Untuk aplikasi nyata *crashbox*, disarankan melakukan uji dampak dinamis guna mengetahui pengaruh *strain rate effect* terhadap perilaku material PLA+ dan aluminium..
2. Disarankan untuk menambah jumlah spesimen uji pada setiap variasi konfigurasi (lebih dari 3 sampel). Penambahan ini bertujuan untuk meningkatkan validitas data statistik, mengurangi *margin of error*, dan memastikan bahwa variabilitas hasil yang terjadi benar-benar merepresentasikan perilaku material, bukan akibat anomali cacat manufaktur.
3. Terdapat kendala ketersediaan *aluminium tube* berdinding tipis di pasaran, sementara penggunaan tabung komersial yang lebih tebal terkendala oleh kapasitas mesin uji tekan yang terbatas pada 20kN. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan mesin uji dengan kapasitas beban yang lebih besar.
4. Proses pembuatan *aluminium tube* pada penelitian ini dilakukan melalui metode pelengkungan plat (*rolling sheet*) yang direkatkan dengan *epoxy*. Metode ini terbukti menyebabkan kegagalan dini pada sambungan perekat, yang berdampak pada rendahnya nilai CFE dan fluktuasi gaya yang tidak ideal. Sangat disarankan bagi penelitian mendatang untuk menggunakan *seamless aluminium tube* (tabung tanpa sambungan) guna mendapatkan karakteristik deformasi logam murni yang sesungguhnya dan nilai CFE yang lebih representatif.
5. Material *auxetic* yang digunakan saat ini berbasis PLA+ yang memiliki karakteristik getas (*brittle*). Untuk meningkatkan ketangguhan struktur dan mencegah patah getas (*fracture*) yang terlalu cepat saat kompresi, disarankan untuk mempertimbangkan penggunaan material filamen yang memiliki sifat keuletan (*ductility*) dan elongasi yang lebih tinggi, seperti PETG

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on *crashworthiness* studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795>
- Alderson, A., Alderson, K. L., Attard, D., Evans, K. E., et al. (2010). *Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading*. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1042-1048.
- Alomarah, A., Masood, S. H., Sbarski, I., Faisal, B., Gao, Z., & Ruan, D. (20). Compressive properties of 3D printed *auxetic* structures: experimental and numerical studies. *Virtual and Physical Prototyping*, 15(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1644184>
- Alomarah, A., Ruan, D., Masood, S., & Gao, Z. (2020). *Compressive properties of additively manufactured multi-layer chiral/re-entrant auxetic structures*. *Materials & Design*, 192, 108730
- Baroutaji, A., Sajjia, M., & Olabi, A. G. (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. In *Thin-Walled Structures* (Vol. 118). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018>
- Bohara, R. P., Linforth, S., Thai, H. T., Nguyen, T., Ghazlan, A., & Ngo, T. (2023). Experimental, numerical, and theoretical crushing behaviour of an innovative *auxetic* structure fabricated through 3D printing. *Thin-Walled Structures*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110209>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials science and engineering: An introduction* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Printability of PLA and PLA-based composites for fused deposition modeling (FDM). *Additive Manufacturing*, 23, 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.021>
- Dusunceli, N., Drozdov, A. D., & Theilgaard, N. (2017). Influence of temperature on viscoelastic–viscoplastic behavior of poly(lactic acid) under loading–unloading. *Polymer Engineering and Science*, 57(3), 258–266. <https://doi.org/10.1002/pen.24404>

- Gunaydin, K., Eren, Z., & Kazanci, Z. (2019). *In-plane compression behavior of anti-tetrachiral and re-entrant honeycombs*. *Composite Structures*, 229, 111394.
- Huo, S., Gao, Z., & Ruan, D. (2022). *Crashworthiness of a hybrid tube with an auxetic layer*. *Engineering Failure Analysis*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106755>
- Hussain, N. N., Regalla, S. P., & Rao, Y. V. D. (2017). Comparative study of trigger configuration for enhancement of *crashworthiness* of automobile crash box subjected to axial impact loading. *Procedia Engineering*, 173, 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.198>
- Izdiharuddin, A. H. (2025). *Pengaruh Susunan Hybrid Tubular PLA Auxetic Anti-Tetrachiral - Aluminium Sheet Crashbox Terhadap Kinerja Crashworthiness*. Tugas Akhir Sarjana. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Justen, R., & Schöneburg, R. (2011). Crash safety of hybrid- and battery electric vehicles. *Proceedings of the 22nd ESV Conference*, Washington D.C.
- Kadir, A. A., & Al-Ahmari, A. M. (2019). *Energy absorption capability of anti-tetrachiral and re-entrant honeycomb structures under quasi-static loading*. *International Journal of Crashworthiness*, 24(5), 543-556.
- Lakes, R. (1987). Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235(4792), 1038–1040.
- Lee, W., Jeong, Y., Yoo, J., Huh, H., Park, S. J., Park, S. H., & Yoon, J. (2019). Effect of *auxetic* structures on crash behavior of cylindrical *tube*. *Composite Structures*, 208, 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.068>
- Li, K., Zhang, Y., Hou, Y., Su, L., Zeng, G., & Xu, X. (2023). Mechanical properties of re-entrant anti-chiral *auxetic* metamaterial under the in-plane compression. *Thin-Walled Structures*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110465>
- Lim, T. C. (2015). *Auxetic materials and structures*. Springer.
- Lorato, A., Innocenti, P., Scarpa, F., & Alderson, A. (2010). In-plane linear elastic properties of the anti-tetrachiral and tetrachiral honeycombs. *Physica Status Solidi (b)*, 247(6), 1538-1548.

- Lykayos, S. S. A., Kostazos, P. K., Venetsanos, O. V., & Manolakos, D. E. (2021). *Crashworthiness* performance of aluminium, GFRP and hybrid aluminium/GFRP circular *tubes* under quasi-static and dynamic axial loading conditions: A comparative experimental study. *Dynamics*, 1(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/dynamics1010004>
- Marzbanrad J., M.R. Ebrahimi, Multi-objective optimization of aluminium hollow *tubes* for vehicle crash energy absorption using a genetic algorithm and neural networks, *Thin-Walled Struct.* 49 (12) (2011) 1605–1615.
- Mohd Nurazzi, N. A., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Abdullah, N., & Rafiqah, S. A. (2021). Comparative analysis of 3D printing filaments: PLA vs. ABS vs. PETG. *Polymers*, 13(11), 1791. <https://doi.org/10.3390/polym13111791>
- Navale, A. B., Chippa, S. P., Chougule, D. A., & Raut, P. M. (2021). *Crashworthiness* aspects of electric vehicle design. *International Journal of Crashworthiness*, 26(4), 379–391. <https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1718462>
- Nia, A. A., & Hamedani, J. H. (2010). Comparative analysis of *energy absorption* and deformations of thin walled *tubes* with various section geometries. *Thin-Walled Structures*, 48(12), 946–954. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.07.003>
- Pang, X., Zhuang, X., Tang, Z., & Chen, X. (2010). Polylactic acid (PLA): Research, development and industrialization. *Biotechnology Journal*, 5(11), 1125–1136. <https://doi.org/10.1002/biot.201000135>
- Qiao, J. X., & Chen, C. Q. (2015). Impact resistance of uniform and functionally graded *auxetic* double arrowhead honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 83, 47-58.
- Shakeri, M., Mirzaeifar, Salehghaffari, New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled *tubes* under axial impact load, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C.-J. Mech. Eng. Sci.* 221 (8) (2007) 869–885.
- Sharifi, S., Karimzadeh, F., & Fereidoon, A. (2015). "Experimental investigation of bitubal circular energy absorbers under quasi-static axial load". *Thin-Walled Structures*, 89, 42-53.

- Shi, L., P. Zhu, R.-J. Yang, S.-P. Lin, Adaptive sampling-based RBDO method for vehicle crashworthiness design using Bayesian metric and stochastic sensitivity analysis with independent random variables, *Int. J. Crashworthiness* 18 (4) (2013) 331–342.
- Wang, W., Dai, S., Zhao, W., Wang, C., & Ma, T. (2021). Design optimization of a novel negative Poisson's ratio non-module battery pack system considering *crashworthiness* and heat dissipation. *Composite Structures*, 275, 114458. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114458>
- Wirawan, W. A., Junipitoyo, B., Putro, S. H. S., Sabitah, A., Suudy, A. H., Ridwan, R., & Chiron, 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>
- Wisch, M., Ott, J., Thomson, R., Léost, Y., Abert, M., & Yao, J. (2014). Recommendations and Guidelines for Battery Crash Safety and Post-Crash Safe Handling. *EverSafe, D3.I(3)*.
- Xia, J., Cui, Y., Wang, B., & Wang, K. (2024). Uniaxial compression performance of anti-tetrachiral structures considering the effects of cell size and boundary conditions. *Thin-Walled Structures*, 205(C), 112580. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112580>
- Yang, L., Harrysson, O., West, H., & Cormier, D. R. (2015). Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb *auxetic* structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Solids and Structures*, 69, 475-490.
- Yao, R., Pang, T., Zhang, B., Fang, J., Li, Q., & Sun, G. (2023). On the *crashworthiness* of thin-walled multi-cell structures and materials: State of the art and prospects. *Thin-Walled Structures*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110734>
- Zarei H.R, M. Kröger, Optimization of the foam-filled aluminium *tubes* for crush box application, *Thin-Walled Struct.* 46 (2) (2008) 214–221.
- Zenkert, D. (1995). *An introduction to sandwich structures* (Student ed.). KTH Royal Institute of Technology.

- Zhang, C., Lu, F., Lin, B., Ling, X., & Zhu, Y. (2024). Analysis on the collapse stress of *auxetic* tubular anti-tetrachiral structures. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2023.105167>
- Zhang, J., Lu, G., & You, Z. (2020). Large deformation and *energy absorption* of additively manufactured *auxetic* materials and structures: A review. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108340. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108340>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Tabel Perhitungan Uji Statistik Untuk Konfigurasi Hybrid (Dual *Auxetic* dan Dual Aluminum)

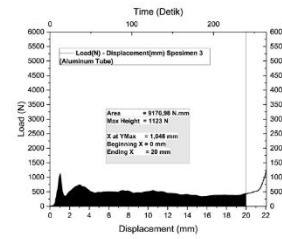
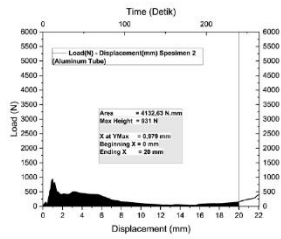
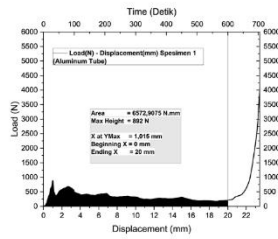
Dual Auxetic Vs Dual Aluminum				
Parameter Keterangan	IPF	SEA	MCF	CFE
$\bar{x}$ Dual Auxetic	6125,3	4315,0	2695,1	44,1
$\bar{x}$ Dual Aluminum	6092,0	4759,1	2604,0	43,8
Sdpooled	1028,222	517,532	309,099	7,047
SE Difference	839,540	422,563	252,379	5,754
(Independent T-test)				
T-test (t value)	0,040	1,051	0,361	0,055
T-test (t table)	2,776	2,776	2,776	2,776
Intepretation	Perbedaan Tidak Signifikan	Perbedaan Tidak Signifikan	Perbedaan Tidak Signifikan	Perbedaan Tidak Signifikan
(Effect Size)				
Cohen's d (d value)	0,032	0,858	0,295	0,045
Interpretation	Ignored	Large	Ignored	Ignored

2. Tabel Perhitungan Uji Statistik Untuk Konfigurasi Hybrid Dengan Baseline

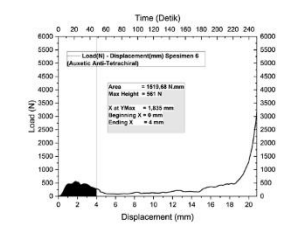
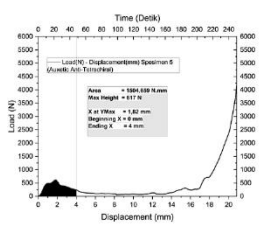
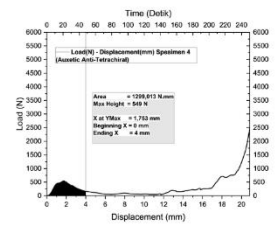
Dual Auxetic Vs Aluminum			Dual Aluminum Vs Aluminum		
Parameter Keterangan	CFE	SEA	Parameter Keterangan	CFE	SEA
$\bar{x}$ Dual Auxetic	44,1	4315,0	$\bar{x}$ Dual Aluminum	43,8	4759,1
$\bar{x}$ Aluminum	33,3	3673,0	$\bar{x}$ Aluminum	33,3	3673,0
Sdpooled	7,378	942,038	Sdpooled	9,568	925,639
SE Difference	6,024	769,171	SE Difference	7,812	755,781
(Independent T-test)			(Independent T-test)		
T-test (t value)	1,801	0,835	T-test (t value)	1,348	1,437
T-test (t table)	2,776	2,776	T-test (t table)	2,776	2,776
Intepretation	Perbedaan Tidak Signifikan	Perbedaan Tidak Signifikan	Intepretation	Perbedaan Tidak Signifikan	Perbedaan Tidak Signifikan
(Effect Size)			(Effect Size)		
Cohen's d	1,470	0,681	Cohen's d	1,101	1,173
Interpretation	Very Large	Moderate	Interpretation	Large	Large

3. Perhitungan SEA Menggunakan Aplikasi OriginLab

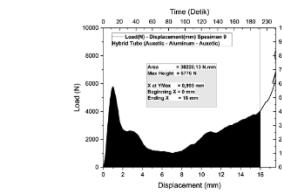
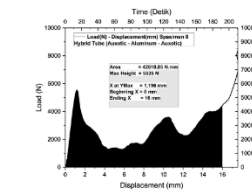
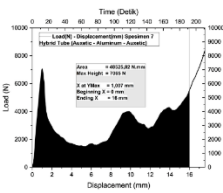
ALUMINUM TUBE (1-3)



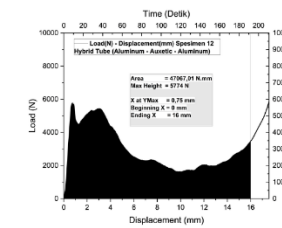
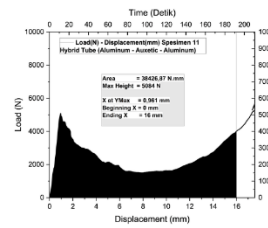
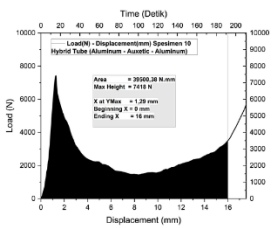
AUXETIC TUBE (4-6)



DUAL AUXETIC (7-9)



DUAL ALUMINUM (10-12)



4. Spesimen setelah pengujian

DUAL AUXETIC



DUAL ALUMINIUM



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Tuban, 27 Februari 2003. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SDIT AL-USWAH Tuban, SMPN 3 Tuban, dan SMAN 1 Tuban. Setelah menamatkan pendidikan menengah atas, penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen teknik mesin FTIRS ITS pada tahun 2021 dan terdaftar dengan NRP 5007211115.

Selama berkuliah, penulis sempat aktif di beberapa kegiatan organisasi dan kepanitiaan baik dari Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HMM), Departemen, maupun dari direktorat di ITS (DIKST). Saat ini penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Mekanika Benda Padat dan terlibat dalam proyek dosen Departemen Teknik Mesin ITS.