

SKRIPSI
ANALISIS KEKAKUAN LENTUR PADA SANDWICH
ALUMINIUM FOAM

Disusun dan Diajukan oleh:
MUH FADLI FAUZAN

D021 19 1087



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS KEKAKUAN LENTUR PADA SANDWICH ALUMINIUM FOAM

Disusun dan diajukan oleh

Muh.Fadli Fauzan
D021 19 1043

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 27 Februari 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT.
NIP 19570914 198703 1 001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, ST., MT.
NIP 19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : MUH. FADLI FAUZAN
NIM : D021 19 1087
Program Studi : TEKNIK MESIN
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisis Kekakuan Lentur Sandwich Aluminium Foam}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain yang telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 27 Februari 2024

Yang Menyatakan



MUH.FADLI FAUZAN

ABSTRAK

MUH.FADLI FAUZAN. *Analisis Kekakuan Lentur Sandwich Aluminium Foam* (dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, M.T)

Komposit *sandwich* dapat dinilai sebagai jenis komposit yang tepat untuk menahan beban lentur, dampak, meredam getaran dan suara dari benda yang bergesekan diluarnya. Pada kereta api cepat penumpang diasumsikan sebagai pembebanan utama pada lantai kereta api cepat. Hal ini yang menjadi alasan utama material komposit sandwich dikembangkan untuk industri transportasi khususnya pada lantai badan kereta berkecepatan tinggi sebagai struktur bantalan beban utama. Untuk memenuhi kebutuhan kekuatan yang diinginkan dalam aplikasi tertentu khususnya pada kereta api cepat, komposit sandwich dengan inti aluminium foam merupakan pilihan yang menarik dengan karakteristik dan ketahanannya terhadap korosi. Adapun tujuan penelitian yaitu untuk menganalisis karakteristik material dari *sandwich aluminium foam* dengan variasi ketebalan foam 25 mm dan 30 mm. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan pengujian lentur tiga titik dan empat titik, menggunakan spesimen *sandwich aluminium foam* yang dibuat secara manual dengan merekatkan bagian kulit dengan inti foam menggunakan bahan adhesive. Pengujian dilakukan mengacu pada standar ASTM C 393 untuk dilakukan uji lentur tiga titik dan empat titik masing-masing dua spesimen uji tiap ukuran spesimen. Dari hasil pengujian rata-rata nilai kekuatan lentur pengujian tiga titik dengan ketebalan inti 25 mm adalah 33.353 MPa dan ketebalan inti 30 mm adalah 28.378 MPa. Sedangkan pada pengujian empat titik ketebalan inti 25 mm adalah 47.292 MPa dan ketebalan 30 mm 44.582 MPa, terjadi penurunan 5% - 19,72% pada saat penambahan ketebalan. Untuk kekakuan lentur pada pengujian lentur tiga titik spesimen 25 mm menghasilkan nilai kekakuan lentur $11.349 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ sementara pada spesimen 30 mm $15.257 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ atau lebih tinggi 25.61%. Pada pengujian lentur empat titik, spesimen dengan tebal inti 25 mm menghasilkan nilai kekakuan lentur $18.241 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}$ dan untuk pengujian dengan ketebalan 30 mm menghasilkan nilai kekakuan lentur $19.222 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}$. Tegangan geser rata-rata yang bekerja pada pengujian lentur tiga titik spesimen 25 mm adalah 5.675 MPa dan pada spesimen 30 mm adalah 5.350 MPa. Adapun beban maksimum yang diperoleh spesimen 25 mm adalah 6.675 kN dengan defleksi 51.172 mm sedangkan pada spesimen 30 mm 6.65 kN dengan defleksi 57.224 mm untuk pengujian lentur tiga titik. Pada pengujian lentur empat titik nilai perbandingan antara beban dan perpindahan yaitu spesimen 25 mm 16.6 kN dengan perpindahan 41.826, sementara spesimen 30 mm 20.3 kN dengan perpindahan 20.275 mm.

Kata Kunci: *Komposit Sandwich Sandwich Aluminium Foam, Uji Lentur Tiga Titik dan Empat Titik*

ABSTRACT

MUH.FADLI FAUZAN. Analysis of Flexural Stiffness of Aluminum Foam Sandwich (supervised by Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, M.T)

Sandwich composites can be considered as the right type of composite to withstand bending, impact, vibration and sound loads from objects rubbing outside. In fast trains, passengers are assumed to be the main loading on the fast train floor. This is the main reason sandwich composite materials were developed for the transportation industry, especially on the floor of high-speed train bodies as the main load-bearing structure. To meet the desired strength requirements in certain applications, especially on fast trains, sandwich composites with aluminum foam cores are an attractive choice with their characteristics and resistance to corrosion. The purpose of the research is to analyze the material characteristics of aluminum foam sandwiches with foam thickness variations of 25 mm and 30 mm. This research was conducted experimentally with three-point and four-point bending tests, using aluminum foam sandwich specimens made manually by gluing the skin to the foam core using adhesive materials. The test was carried out referring to the ASTM C 393 standard to carry out three-point and four-point bending tests of two test specimens each specimen size. From the test results the average value of the bending strength of the three-point test with a core thickness of 25 mm is 33.353 MPa and a core thickness of 30 mm is 28.378 M.Pa. While in the four-point test, the core thickness of 25 mm is 47.292 MPa and the thickness of 30 mm is 44.582 MPa, there is a decrease of 5% - 19.72% when adding thickness. For bending stiffness in three-point bending testing, the 25 mm specimen produces a bending stiffness value of $11.349 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ while for the 30 mm specimen it was $15,257 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ or 25.61% higher. In the four-point bending test, the specimen with a core thickness of 25 mm produced a bending stiffness value of $18,241 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$ and for the test with a thickness of 30 mm produced a bending stiffness value of $19.222 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$. The average shear stress acting on the three-point bending test of the 25 mm specimen is 5.675 MPa and on the 30 mm specimen is 5.350 MPa. The maximum load obtained by the 25 mm specimen is 6.675 kN with a deflection of 51.172 mm while on the 30 mm specimen is 6.65 kN with a deflection of 57.224 mm for the three-point bending test. In the four-point bending test, the value of the ratio between load and displacement is 25 mm specimen 16.6 kN with a displacement of 41.826, while 30 mm specimen 20.3 kN with a displacement of 20.275 mm.

Keywords: Aluminum Foam Sandwich Composite, Three-Point and Four-Point Bending

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xii
KATA PENGANTAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Aluminium Foam	5
2.1.1 Sandwich Aluminium Foam	8
2.2 Aluminium	10
2.3 Aplikasi Sandwich Aluminium Foam	15
2.3.1 Industri Kereta Api	15
2.3.2 Adaptor Roket Arine 5	16
2.3.3 Industri Otomotif	16
2.4 Tegangan Regangan.....	17
2.5 Pengujian Lentur	19
2.5.1 Uji Lentur Tiga Titik	20
2.5.2 Uji Lentur Empat Titik	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	23
3.2 Alat dan Bahan.....	28

3.3	Prosedur Pengujian.....	29
3.4	Rencana dan Jadwal Penelitian.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		31
4.1	Analisa Kekuatan Bending.....	31
4.1.1	Pengujian Lentur Tiga Titik.....	32
4.1.2	Pengujian Lentur Empat Titik.....	34
4.2	Pengaruh Variasi Ketebalan Inti Foam terhadap Beban Lentur Maksimum.....	<u>37</u>
4.2.1	Pengujian Lentur Tiga Titik.....	37
4.2.2	Pengujian Lentur Empat Titik.....	38
4.3	Karakteristik Material Sandwich Aluminium Foam.....	40
4.3.1	Pengujian Lentur Tiga Titik.....	40
4.3.2	Pengujian Lentur Empat Titik.....	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		47
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA		49
LAMPIRAN.....		52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Struktur pori <i>closed-cell metal foam</i>	8
Gambar 2 Struktur pori <i>open cell metal foam</i>	8
Gambar 3 Struktur Sandwich Aluminium Foam.....	9
Gambar 4 Bentuk 3D Sandwich aluminium foam	9
Gambar 5 Aplikasi Sandwich Aluminium foam pada industri kereta api.....	15
Gambar 6 Aplikasi Sandwich Aluminium foam pada adaptor roket	17
Gambar 7 Uji Lentur Tiga Titik.....	21
Gambar 8 Uji Lentur Empat Titik	22
Gambar 9 Lokasi penelitian di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.....	23
Gambar 10 Universal Testing Machine.....	24
Gambar 11 <i>Sandwich Aluminium Foam</i>	24
Gambar 12 Gerinda.....	25
Gambar 13 Spidol.....	25
Gambar 14 Ragum.....	26
Gambar 15 Jangka Sorong dan Mistar.....	26
Gambar 16 Gergaji Besi.....	27
Gambar 17 Lem Besi.....	27
Gambar 18 Diagram Alir Penelitian.....	28
Gambar 19 Jarak Antar Titik Tekan.....	29
Gambar 20 Pengujian Lentur Tiga Titik Spesimen 1 25 mm.....	32
Gambar 21 Pengujian Lentur Tiga Titik Spesimen 2 25 mm	33
Gambar 22 Pengujian Lentur Tiga Titik Spesimen 1 30 mm.....	33
Gambar 23 Pengujian Lentur Tiga Titik Spesimen 2 30 mm.....	34
Gambar 24 Pengujian Lentur Empat Titik Spesimen 1 25 mm.....	35
Gambar 25 Pengujian Lentur Empat Titik Spesimen 2 25 mm.....	35
Gambar 24 Pengujian Lentur Empat Titik Spesimen 1 30 mm	36
Gambar 25 Pengujian Lentur Empat Titik Spesimen 2 30 mm.....	36
Gambar 26 Grafik perbandingan antara beban dan Perpindahan pengujian lentur tiga titik	38

Gambar 27 Grafik perbandingan antara beban dan Perpindahan pengujian lentur tiga titik.....	39
Gambar 28 Grafik kekuatan bending pada permukaan sandwich untuk pengujian lentur tiga titik.....	40
Gambar 29 Grafik tegangan geser pada inti sandwich untuk pengujian lentur tiga titik.....	41
Gambar 30 Grafik kekakuan lentur pada permukaan sandwich untuk pengujian lentur tiga titik.....	42
Gambar 31 Grafik kekuatan lentur pada inti <i>sandwich</i> untuk pengujian lentur empat titik.....	43
Gambar 32 Grafik tegangan geser pada inti <i>sandwich</i> untuk pengujian lentur empat titik.....	44
Gambar 32 Grafik kekakuan lentur pada inti sandwich untuk pengujian lentur empat titik.....	45
Gambar 33 Grafik analisa perbandingan karakteristik material <i>sandwich aluminium foam</i>	47

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Karakteristik Aluminium <i>Foam</i>	7
Tabel 2 Sifat-Sifat Fisik Aluminium.....	11
Tabel 3 Sifat-Sifat Mekanik Aluminium.....	12
Tabel 4 Klasifikasi Paduan Aluminium.....	12
Tabel 5 Komposisi Kimia Paduan Aluminium.....	14
Tabel 6 Kelebihan dan Kekurangan Metode Uji <i>Three Point Bending dan Four Point Bending</i>	20
Tabel 7 Rencana dan Jadwal Penelitian.....	30

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
TPB	= Pengujian lentur tiga titik
FPB	= Pengujian lentur empat titik
25-TPB	= Spesimen 25-TPB
25-FPB	= Spesimen 25-FPB
30-FPB	= Spesimen 30-FPB
30-TPB	= Spesimen 30-TPB
σ_t	= Nilai tegangan sesungguhnya (MPa)
σ_e	= Nilai tegangan perhitungan (MPa)
σ_{TPB}	= Nilai tegangan lentur tiga titik (MPa)
σ_{FPB}	= Nilai tegangan lentur empat titik (MPa)
ε_t	= Nilai regangan sesungguhnya
ε_e	= Nilai regangan perhitungan
E	= Modulus elastisitas (MPa)
Δl	= Perubahan panjang (mm)
l	= Panjang awal (mm)
P_1	= Beban lentur tiga titik (N)
P_2	= Beban lentur empat titik (N)
L_1	= Panjang span pengujian lentur tiga titik (mm)
L_2	= Panjang span pengujian lentur empat titik (mm)
D_{TPB}	= Nilai kekakuan lentur tiga titik (N.mm ²)
D_{FPB}	= Nilai kekakuan lentur empat titik (N.mm ²)
Δ_1	= Defleksi pada pengujian lentur tiga titik (mm)
Δ_2	= Defleksi pada pengujian lentur empat titik (mm)
t	= Tebal <i>skin</i> (mm)
d	= Tebal <i>sandwich</i> (mm)
c	= Tebal inti (mm)
b	= Lebar spesimen (mm)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Proses Pembuatan Spesimen	43
Lampiran 2 Spesimen <i>Sandwich Aluminium Foam</i>	44
Lampiran 3 Mesin Uji Bending.....	45
Lampiran 4 penekan yang digunakan dalam proses pengujian.....	46
Lampiran 5 Proses Pengujian dan pengambilan data	47
Lampiran 6 Grafik Hasil Pengujian <i>three point bending</i> spesimen dengan ketebalan inti 25 mm.....	48
Lampiran 7 Grafik Hasil Pengujian <i>three point bending</i> spesimen dengan ketebalan inti 30 mm.....	49
Lampiran 8 Grafik Hasil Pengujian <i>four point bending</i> spesimen dengan ketebalan inti 25 mm.....	50
Lampiran 9 Grafik Hasil Pengujian <i>four point bending</i> spesimen dengan ketebalan inti 30 mm.....	51

KATA PENGANTAR

Menguntai ungkapan syukur diantara nikmat yang Allah SWT berikan berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Analisis Kekakuan Lentur Sandwich Aluminium Foam”

Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu bagian dari persyaratan yang perlu dipenuhi untuk memperoleh gelar Sarjana pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis mengucapkan banyak terima kasih yang terdalam untuk kedua orangtua penulis atas cinta, doa, dan juga dukungan moril dan materi yang diberikan kepada penulis. Penghargaan dan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada Ibunda tercinta Dra.Maulidi Umar,M.Pd dan juga Ayahanda Drs.Jemmain,M.Hum yang selalu memberikan kasih sayang yang sangat luar biasa sehingga penulis mampu sampai pada titik ini. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan kesehatan, kekuatan dan keselamatan

Penulis juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan, bantuan dan masukan terutama kepada :

1. Bapak Prof. Dr Ir. H Ilyas Renreng,M.T, selaku pembimbing atas segala bimbingan, arahan serta masukan yang telah diberikan dari penyusunan proposal sampai dengan penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Fauzan,ST,MT,Ph.D selaku dosen pembimbing kedua sekaligus penguji dan Bapak Rudi ST.,MT selaku dosen penguji dua yang telah memberikan segala bimbingan, arahan , serta koreksi demi kelancaran penyusunan skripsi ini.
3. Seluruh dosen dan staff Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang sangat bermanfaat bagi penulis

.Partner penelitian penulis, Bor Nur Hamnashri yang banyak membantu penulis mulai dari diskusi perencanaan penelitian,pembuatan spesimen ,pengambilan data hingga penyusunan skripsi

4. Keluarga besar SMAN 16 Makassar terkhusus Ibunda wakasek kesiswaan Dra.Maulidi,M.Pd yang senantiasa memberikan semangat,bantuan dan motivasi kepada penulis dalam proses penelitian ini
5. Saudara(i) seperjuangan BRUZHLEZZ 19 yang selalu membantu dan mejadi partner dalam berdiskusi sejak awal perkuliahan,masuk laboratoruun hingga proses penyusunan skripsi
6. Gurunda tercinta Dra.Maulidi,M.Pd yang selalu membimbing penulis mulai dari bangku sekolah dan terus memberikan nasihat hingga penghujung masa perkuliahan S-1
7. Pemilik nomor induk mahasiswa 200605500007 yang pernah menjadi salah satu support system terbaik penulis mulai dari awal masuk perkulihan hingga sampai ke titik ini,walau tak sempat menggenggam seutuhnya penulis berharap semoga tuhan mempertemukan dan menyatukan kembali di garis waktu yang tepat.
8. Keluarga besar dan pimpinan Perum Damri Kantor Cab Makassar,PT.Bumi Karsa dan Bahar Trans yang memberikan peluang kepada penulis untuk menambah pengalaman kerja dan mengisi waktu senggang semasa kuliah.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat berharap adanya kritik maupun saran yang membangun untuk kesempurnaan skripsi ini di masa yang akan datang. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan juga bagi peneliti selanjutnya. Terima kasih

Gowa 12 Februari 2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, bahan komposit *sandwich* telah banyak digunakan dalam transportasi dan aplikasi industri lainnya karena sifat mekaniknya yang luar biasa (misalnya, kekakuan dan kekuatan spesifik yang tinggi) dibandingkan dengan sebagian besar bahan tradisional. Menurut Yudha (2021) Komposit *sandwich* menjadi salah satu jenis material komposit struktur yang dinilai cocok untuk dikembangkan. Material Komposit *sandwich* tersusun atas 3 lapisan yang terdiri dari plat aluminium sebagai kulit permukaan, perekat dan aluminium foam sebagai material inti (*core*) di bagian tengahnya.

Y.Zhao (2021) menyatakan bahwa komposit *sandwich* merupakan material yang dapat menahan beban lentur, dampak, meredam getaran dan juga suara. Struktur *sandwich* terdiri dari dua lembar *face sheet* dengan kekakuan yang tinggi dan diisi dengan *core* di tengahnya. Aluminium *foam* merupakan material komposit yang ringan, kuat, anti karat dan juga dapat menyerap energi. Bahan ini memiliki sifat mekanik yang unik, yaitu dapat menahan tegangan deformasi yang besar namun memiliki tegangan konstan yang kecil. Mengisi *core* dari komposit *sandwich* dengan *aluminium foam* dapat meningkatkan sifat penyerapan energi dan menstabilkan kurva struktur (Ilyas et al,2020).

Komposit *sandwich* dapat dinilai sebagai jenis komposit yang tepat untuk menahan beban lentur, dampak, meredam getaran dan suara dari benda yang bergesekan diluarnya. Pada kereta api cepat penumpang diasumsikan sebagai pembebanan utama pada lantai kereta api cepat. Hal ini yang menjadi alasan utama material komposit *sandwich* dikembangkan untuk industri transportasi khususnya pada lantai badan kereta berkecepatan tinggi sebagai struktur bantalan beban utama. Untuk memenuhi kebutuhan kekuatan yang diinginkan dalam aplikasi tertentu khususnya pada kereta api cepat, komposit *sandwich* dengan inti aluminium *foam* merupakan pilihan yang menarik dengan karakteristik dan ketahanannya terhadap korosi (Chang et al,2021)

Berdasarkan uraian di atas dibutuhkan riset lebih mendalam mengenai sandwich *aluminium foam* dengan variasi ketebalan *foam* sehingga dapat diketahui karakteristik material dan sifat mekanik dari *sandwich aluminium foam* dengan menggunakan metode pengujian beban lentur tiga titik dan empat titik. Hal ini bertujuan untuk mengetahui perilaku lentur material pada *sandwich aluminium foam*. Metode pengujian beban lentur tiga titik dan empat titik dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan *universal testing machine*. Dengan demikian penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk pengembangan teknologi material penyusun dalam industri transportasi modern di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan masalah – masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh dari variasi ketebalan inti *foam* terhadap kekuatan bending pada *sandwich aluminium foam*?
2. Bagaimana pengaruh dari variasi ketebalan inti *foam* terhadap nilai kekakuan lentur pada *Sandwich Aluminium Foam* ?
3. Bagaimana karakteristik material dari *sandwich aluminium foam* dengan variasi ketebalan *foam* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, ada beberapa tujuan dari penelitian ini antara lain :

1. Menganalisis pengaruh dari variasi ketebalan inti *foam* terhadap kekuatan bending pada *Sandwich Aluminium Foam*
2. Menganalisis pengaruh variasi ketebalan inti *foam* terhadap nilai kekuatan lentur dari produk *Sandwich Aluminium Foam*
3. Menganalisis karakteristik material dari *sandwich aluminium foam* dengan variasi ketebalan *foam*

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain :

1. Penelitian dilakukan secara eksperimental
2. Menggunakan pelat *aluminium alloy 7072*
3. Menggunakan 2 variasi ketebalan inti spesimen
4. Pembuatan spesimen dengan cara manual, perekat antara pelat aluminium dan core menggunakan bahan adesif 0,1 mm
5. Dimensi spesimen yang digunakan adalah panjang 300 mm, tebal pelat aluminium 6 mm serta tebal core 25 mm dan 30 mm.
6. Pengujian lentur menggunakan metode beban lentur tiga titik dan empat titik.

1.5 Manfaat Penelitian

a. Bagi Penulis

1. Sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Dapat mengaplikasikan ilmu dan keterampilan yang diperoleh pada masa kuliah.

b. Bagi Universitas

1. Dapat menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan material konstruksi di bidang transportasi
2. Dapat menjadi bahan referensi bagi generasi mendatang dalam pembuatan dan penyusunan tugas akhir.

c. Bagi Industri

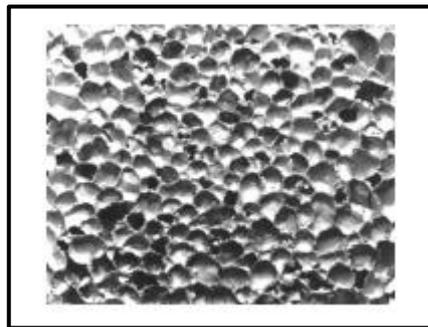
Sebagai bahan acuan bagi industri moda transportasi untuk merancang dan membangun konstruksi alat transportasi khususnya pada rantai kereta cepat.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium Foam

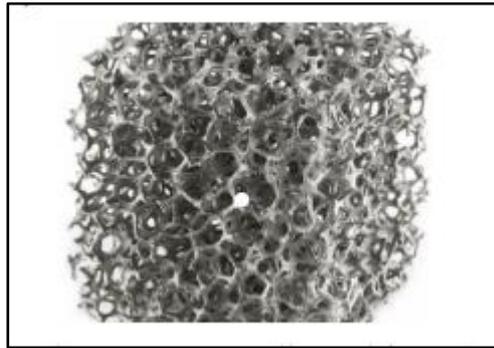
Aluminium Foam Sandwich (AFS) adalah produk yang terdiri dari inti busa paduan aluminium yang sangat berpori dan dua aluminium lembaran wajah paduan. Lapisan-lapisan itu melekat erat satu sama lain oleh ikatan logam. Penggunaan panel *sandwich* seperti itu telah diusulkan untuk banyak sektor industri termasuk otomotif, pembangunan kapal, kereta api, dan industri pesawat terbang. Panel *sandwich* dibandingkan dengan bahan padat atau busa telanjang memiliki berbagai keunggulan. *Metal foam* termasuk kelompok logam seluler, yang memiliki sel polihedral, tetapi bentuknya dapat bervariasi dalam beberapa kasus di mana pemadatan terarah menciptakan perbedaan morfologi. *Metal foam* dapat di golongkan dalam sel terbuka, tertutup sel, atau kombinasi keduanya, hal ini disebabkan karena bentuk dari pori-pori. *Metal foam* sebagai penyusun dari *sandwich foam* dapat diklasifikasikan menjadi foam rongga sel terbuka dan tertutup. *Foam* dengan rongga sel terbuka membentuk jaringan yang saling berhubungan penyangga padat sehingga memungkinkan media fluida mengalir melaluinya. (Banhart & Seeliger 2012)



Gambar 1 Striktur pori closed-cell metal foam (Sumber: Veale, 2010)

Menurut Dawood (2010) *Foam* rongga tertutup terdiri dari jaringan pori-pori tertutup yang berdekatan. Perbedaan antara rongga tertutup dan terbuka konfigurasi terlihat jelas di pori-pori. *Foam* dengan rongga terbuka memungkinkan aliran cairan dan gas, untuk aplikasi yang berbeda mulai dari penyaringan hingga pertukaran panas. Pada rongga tertutup konfigurasi optimal untuk penyerapan energi atau

benturan dan aplikasi struktural seperti di helm sepeda, bumper mobil, jembatan dan bangunan. Media cair tidak dapat melewati *foam* dengan rongga tertutup sehingga dapat di aplikasikan pada konstruksi karena kekakuan tinggi dan kepadatan rendah. Berbeda dengan busa polimer yang memiliki sifat elastis, *aluminium foam* tidak bersifat elastis sehingga tetap dalam posisi deformasinya setelah menerima benturan.



Gambar 2 Struktur pori open-cell metal foam (Sumber: Vasenjak, 2008)

Menurut penelitian Vasenjak (2008) perbandingan antara foam berpori-sel tertutup pada foam berpori terbuka saling berhubungan sehingga memungkinkan adanya aliran yang melewati pori-pori tersebut. Foam jenis ini dapat diaplikasikan pada sistem perpindahan kalor, seperti pendingin komponen elektronik, tangki kriogenik, dan penukar kalor PCM, juga pada sistem penyerapan energi kalor, dan difusi suatu aliran. Adapula *foam* dengan ukuran pori yang lebih kecil atau tidak kasat mata dapat diaplikasikan pada proses perpindahan kalor industri kimia.

Material *aluminium foam* ini memiliki tingkat daya serap energi yang relatif tinggi dengan berat jenis rendah dan sangat baik sehingga material ini telah diterapkan dalam industri otomotif khususnya pada bagian akustik dan peredam getaran, industri kedirgantaraan sebagai komponen struktural di turbin, dalam industri angkatan laut sebagai peredam getaran frekuensi rendah, dan di industri konstruksi sebagai hambatan suara dalam 12 terowongan dan sebagai bahan keselamatan berupa pelidung kebakaran dan sistem perlindungan struktur ledakan. *Aluminium foam* pada dasarnya mempertahankan beberapa sifat fisik dari unsur penyusunnya berupa kekakuan, densitas dan ketangguhan. Keunggulan dari

metal *foam* secara khusus adalah kombinasi dari karakteristik material tersebut yang tidak dapat dimiliki oleh material lain. *Aluminium foam* memiliki sifat:

- a) Kekuatan (10 MPa) dan kekakuan (1 GPa) struktur yang cukup tinggi.
- b) Densitas yang rendah, yaitu sekitar 1/5 dari aluminium padatan.
- c) Kemampuan penyerapan energi mekanik, panas, dan getaran yang besar.

Berikut ini merupakan karakteristik material *metal foam*

Tabel 1 Karakteristik Aluminium *Foam*

Kekuatan Kompresi	367 psi	(2.53 MPa)
Kekuatan tarik	180 psi	(1.24 MPa)
Kekuatan geser	190 psi	(1.31 MPa)
Modulus Elastis (Tekanan)	15×10^3 psi	(103.08 MPa)
Modulus Elastis (Tegangan)	14.6×10^3 psi	(101.84 MPa)
Modulus Geser	2.9×10^4 psi	(199.95 MPa)
Nilai Piramida Vicker	35 HV	
Panas Spesifik	214 BTU/lb-°F	(895J/g-C)
Konduktivitas Termal Massal	3.4 BTU/ft-hr-F	(5.8 W/m-C)
Koefisien Ekspansi Termal (0-100 °C)	13.1×10^{-6} in/in-- f	(23.58×10^{-6} m/m -C)
Resistivitas Massal	2.84×10^{-5} ohm - in	(7.2×10^{-5} ohm-cm)
Titik Lebur	1220°F	(660°C)

Sumber : Zulhis (2021)

Proses pembuatan *aluminium foam* pertama kali dilakukan oleh Benjamin Sosnick pada tahun 1943. Di mulai dengan percobaan mendispersikan gas kedalam aluminium padat dengan bantuan unsur merkuri (Hg) menggunakan bejana bertekanan tinggi. Dengan bantuan tekanan tinggi penguapan unsur merkuri terjadi bersamaan saat temperatur leleh aluminium sehingga menyebabkan pembentukan *foam* (busa). Sehingga foam tersusun setelah proses terdispersinya gas ke dalam suatu fasa liquid. Dalam hal ini, jika gas tersebut terdispersi ke dalam *liquid-metal*,

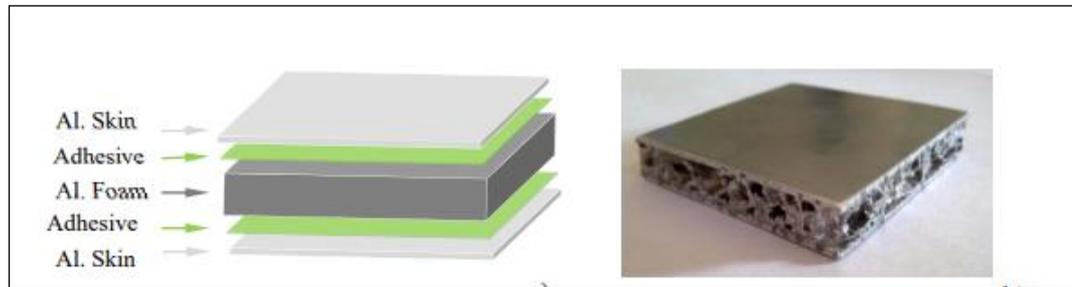
maka jenis ini disebut *liquid-metal foam*. Bentuk padatan dari material ini selanjutnya disebut sebagai *metal foam*. Jika di tinjau kembali pengertian sebelumnya *aluminium foam* tersusun atas aluminium padat dengan struktur berpori pada sebagian besar material. Unsur logam pada material ini hanya mengisi 5-25% dari keseluruhan volume *foam*. Dengan kata lain, *aluminium foam* memiliki porositas yang tinggi, dimana volume total porinya lebih besar dibanding volume logam solidnya (Dawood,2010).

Menurut penelitian Zulphis (2021) *aluminium foam* sering di manfaatkan sebagai material pengisi dalam struktur ringan yang mengalami benturan dan dampak kecepatan tinggi atau sebagai alat isolasi termal atau akustik. *Foam* rongga tertutup, khususnya busa *Al-alloy*, menunjukkan tegangan konstan sehingga dapat menyerap tingkat energi yang lebih tinggi dari pada jenis aluminium padat. *Foam* ini menunjukkan tekanan respon elastis selama pemberian dampak. Sebagian besar energi yang diserap tidak dapat diubah menjadi energi deformasi plastik, sehingga menjadi keuntungan dari penggunaan material *aluminium foam*

2.1.1 Sandwich Aluminium Foam

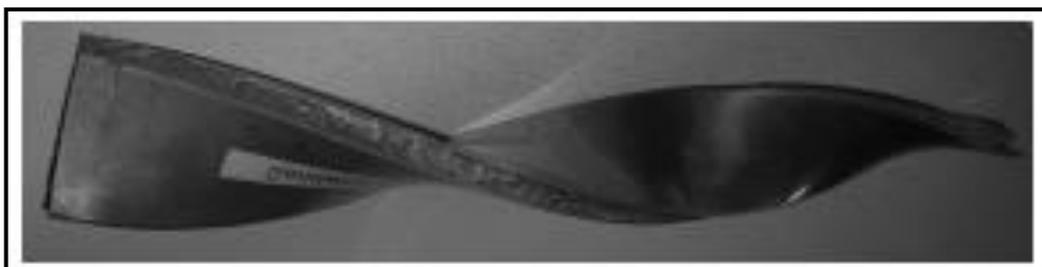
Sandwich aluminium foam merupakan produk panel sandwich yang terbuat dari dua lembar pelat aluminium padat dan inti *foam* yang terbuat dari paduan aluminium. Struktur sandwich aluminium foam yaitu terdiri dari aluminium foam dalam bentuk sandwich, di mana logam aluminium bawah dan atas lembaran dilekatkan menggunakan lapisan perekat dari polimer poliuretan atau *adhesif*. Sandwich aluminium foam dapat di kategorikan menjadi material komposit, Zainuri (2011) menyatakan komposit *Sandwich* terdiri atas dua komponen yaitu, kulit dan inti *core*. Pada umumnya perekat digunakan untuk mengikat kulit dengan inti, sehingga lapisan perekat juga dapat dianggap sebagai komponen tambahan dalam struktur. Ketebalan lapisan perekat pada umumnya diabaikan karena jauh lebih kecil dibandingkan dengan ketebalan kulit atau inti *sandwich*, berkisar diantara 0,1-0,5 mm. Ikatan yang kuat antara kulit dan inti bertujuan untuk mencegah kegagalan antar permukaan di bawah beban yang diterapkan untuk meningkatkan sifat lentur komposit *sandwich*. Sifat komposit *sandwich* bergantung

pada properti dari kulit dan inti. Struktur *sandwich* memiliki kelemahan. Kelemahan utama yaitu hilangnya kapasitas beban akibat kerusakan indentasi.



Gambar 3 Struktur Sandwich aluminium foam (Sumber: Sadek, 2016)

Berbagai teknologi telah diusulkan untuk membuat panel sandwich yang menggabungkan busa aluminium dan lembaran logam. Proses perekatan pada *sandwich aluminium foam* menggunakan adhesif. Pendekatan yang paling jelas adalah ikatan perekat (*adhesive bonding*). Sifat-sifat panel sandwich yang dihasilkan kemudian diberikan oleh interaksi pada busa, lembaran dan perekat, tergantung pada parameter yang dipilih berdasarkan mode kegagalan yang akan diamati. Sementara perekat dapat menjadi nilai tambah pada sifatnya, misalnya kapasitas redaman yang tinggi, biasanya masalah yang terkait dengan lem, biaya tinggi, kesulitan daur ulang, memotivasi berbagai jenis ikatan. Cara lain untuk memproduksi *sandwich aluminium foam* dikembangkan di Institut Fraunhofer pada tahun 1992. Komposit tiga lapis dari paduan aluminium berbuisa – mengandung TiH₂ sebagai bahan peniup – dan dua lembar muka di kedua sisi (biasanya paduan Al, tetapi baja dan titanium juga telah digunakan) dibuat dengan ekstrusi atau penggulangan bubuk dan berbagai pengerolan berikutnya. operasi, setelah itu lapisan inti panel diperluas dengan memanaskan hingga suhu berbuisa. Membentuk prekursor sebelum berbuisa dapat menghasilkan bentuk 3D



Gambar 4 Bentuk 3D Sandwich aluminium foam (Sumber: Banhart, 2008)

Menurut penelitian Pratomo (2018) *Sandwich aluminium foam* dapat menjadi alternatif struktur tambahan yang memiliki karakteristik penyerapan energi yang baik, ringan dan kekakuan yang tinggi. Hal ini dikarenakan inti busa aluminium tersusun atas aluminium seluler dengan gas yang terisi secara homogen di sepanjang material. Karakteristik tahan terhadap ledakan telah di evaluasi secara eksperimental dengan berbagai jenis eksperimen yang diklasifikasikan ke dalam tiga jenis yaitu *direct ballistic method*, *ballistic pendulum method* dan *clamped method*. Panel *sandwich* terdiri dari lapisan tipis (juga disebut kulit) yang mengapit inti. Permukaannya terbuat dari bahan berkekuatan tinggi, seperti baja, dan komposit seperti grafit/epoksi, pada bagian inti terbuat dari bahan tebal dan ringan yaitu bahan seperti busa, karton, kayu lapis. Motivasi dalam melakukan ini ada dua. Pertama, jika pelat atau balok dibengkokkan, tegangan maksimum terjadi pada permukaan atas dan bawah. Oleh karena itu, di gunakan material berkekuatan tinggi hanya di bagian atas dan bawah serta material berkekuatan rendah dan ringan di tengah. Dengan demikian, meningkatkan ketebalan dengan menambahkan inti di tengah akan meningkatkan resistansi ini. Perhatikan bahwa gaya geser maksimum di tengah panel *sandwich*, sehingga membutuhkan inti untuk menahan gaya geser. Keunggulan dalam berat dan kekakuan lentur membuat panel *sandwich* banyak di aplikasikan di bandingkan bahan lainnya. Panel *sandwich* dievaluasi berdasarkan kekuatan, keamanan, berat, daya tahan, ketahanan korosi, ketahanan penyok ,tusukan, ketahanan cuaca, dan biaya. Bahan permukaan yang paling umum digunakan adalah paduan aluminium dan plastik yang diperkuat serat. Aluminium memiliki modulus spesifik yang tinggi, akan tetapi menimbulkan korosi tanpa dilakukan perawatan dan rentan melengkung, (Autar, 2006)

2.2 Aluminium

Wahyu Fajar (2018) dalam penelitiannya menyatakan bahwa aluminium merupakan jenis logam ringan yang mempunyai ketahanan terhadap korosi yang baik hal ini terjadi ketika aluminium terkena udara, lapisan tipis aluminium oksida akan terbentuk pada permukaan logam. Hal ini yang mencegah terjadinya korosi dan karat. Aluminium terbuat dari bauksit dan kreolit memiliki kemurnian hingga

99,85% dengan dielektrolisa kembali sampai 99,996 %, berwarna abu kepekatan. Pada kondisi standar aluminium merupakan logam yang cukup lembut dan kuat. Aluminium juga merupakan jenis logam *non-ferrous* yaitu jenis logam yang tidak mengandung unsur besi di dalamnya. Aluminium akan meningkatkan kekuatan mekaniknya dengan penambahan unsur logam lain seperti Cu, Mg, Si, Mn dll, hal ini juga memberikan sifat baik seperti ketahanan terhadap karat, tidak mudah aus dan koefisien pemuaian rendah. Produksi aluminium tercatat hampir 15 juta ton per tahun pada tahun 1981, hal ini disebabkan karena penggunaan yang luas meliputi peralatan rumah tangga, material otomotif, konstruksi dan industri transportasi lainnya

Di tinjau dari sifatnya aluminium cukup ringan dan memiliki kepadatan yang rendah, berkisar tiga kali lipat dari air, dimana massa jenisnya sepertiga dari besi atau baja. Aluminium dapat menerima berbagai perlakuan yaitu ditempa, proses permesinan, disolder, pengerasan, las, ditarik dan ditekan. Hal itulah yang menyebabkan material aluminium banyak digunakan dalam keperluan sehari-hari misalnya peralatan dapur, industri otomotif dan sebagainya.

Tabel 2 Sifat-Sifat Fisik Aluminium

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	> 99,0
Masa jenis (20°C)	2,6989	2,71
Titik cair	660,2	653-657
Panas jenis (cal/g·°C) (100°C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik (%)	64,94	59 (dianil)
Tahanan listrik koefisien temperatur (/°C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (20-100°C)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis kristal, konstanta kisi	<i>fcc</i> , $a=4,013 \text{ kX}$	<i>fcc</i> , $a=4,04 \text{ kX}$

Sumber *Surdia, T. dan S, Saito. (1999)*

Aluminium banyak digunakan dengan memadukan unsur lain sebab tidak kehilangan sifat ringan dan sifat-sifat mekanisnya, serta mampu cornya diperbaiki dengan menambah unsur-unsur lain. Kandungan unsur magnesium hingga 15,35% dapat menurunkan titik lebur logam paduan yang cukup besar, dari 660°C sampai 450°C. Kandungan unsur magnesium dapat menjadikan logam paduan dapat bekerja

dengan baik pada temperatur yang sangat rendah, kebanyakan logam akan mengalami kegagalan pada temperatur tersebut.

Aluminium jenis *alloy* yang terdiri dari paduan utama unsur Si dan Mg pada perbandingan tertentu akan terbentuk *magnesium silica*. Hasil paduan aluminium ini mampu untuk dilakukan proses heat treatment, ketangguhan akan berkurang jika dibandingkan dengan paduan Aluminium Cu dan Zn

Tabel 3 Sifat-Sifat Mekanik Aluminium

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		> 99,0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm ²)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur (0,2%) (kg/mm ²)	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

Sumber : Surdia, T. dan S, Saito. (1999)

. Silikon memiliki sifat yang getas dan dapat dengan mudah mengalami kegagalan berupa retak, seperti fatik terjadi didalam Alloy Al-Si terutama dengan pengintian dan pertumbuhan retakan halus atau yang biasa disebut *microcrack* pada sekeliling fasa *magnesium* atau di dalam matriks aluminium. Namun, hal ini tidak menjadikan aluminium paduan dapat ditempa menggunakan panas dengan mudah karena korosi akan terjadi pada suhu di atas 60°C.(Fadly,2016)

Tabel 4 Klasifikasi Paduan Aluminium

Standar AA	Standar Alcoa terdahulu	Keterangan
1001	1S	Al murni 99,5% atau di atasnya
1100	2S	Al murni 99,0% atau di atasnya
2010-2029	10S-29S	Cu merupakan unsur paduan utama
3003-3009	3S-9S	Mn "
4030-4039	30S-39S	Si "
5050-5086	50S-69S	{ Mg "
6061-6069			{ Mg_{2}Si "
7070-7079	70S-79S	Zn "

Sumber : Surdia, T. dan S, Saito. (1999)

Rohman R (2010) menyelidiki sifat lain yang dimiliki pada aluminium yaitu sangat mudah difabrikasi, hal ini sangat menguntungkan di sektor industri Dapat

dituang dengan berbagai cara penuangan apapun dan dapat di-*forming* dengan beberapa cara, antara lain *rolling*, *forging*, *drawing*, dll menjadi bentuk yang cukup rumit sekalipun. Aluminium sangat mudah bereaksi dengan oksigen dari udara sehingga reaksi ini dapat menghasilkan aluminium oksida (Al_2O_3) yang melekat erat dan rapat pada permukaan aluminium. Lapisan oksida inilah yang sebenarnya tahan korosi, dan dapat melindungi bagian dalam dari logam aluminium terhadap berbagai macam media yang berpotensi menyebabkan korosi. Unsur aluminium oksida yang menempel pada permukaan aluminium, menimbulkan kerugian berupa aluminium menjadi sulit dilas atau disolder

Safrisal (2016) menyelidiki bahwa paduan aluminium dapat dikelompokkan dalam tiga cara, yaitu berdasarkan pembuatan, dengan klasifikasi paduan cor dan paduan tempa, berdasarkan perlakuan panas dengan klasifikasi dapat dan tidak dapat diperlaku - panaskan dan cara ketiga yang berdasarkan unsur-unsur paduan yaitu : Al murni, Al-Cu, Al-Mn, Al-Si, Al-Mg, Al-Mg-Si, dan Al-Zn. Paduan yang dapat menerima perlakuan panas yaitu paduan di mana kekuatannya dapat diperbaiki dengan pengerasan dan penempaan sedangkan paduan aluminium yang tidak dapat menerima perlakuan panas kekuatannya hanya dapat diperbaiki dengan cara pengerjaan dingin. Sifat pengerasan presipitasi dan paduan aluminium tergantung pada unsur-unsur paduannya. Pengerasan pada paduan aluminium yang dapat diperlaku-panaskan tidak karena adanya transformasi martensit seperti dalam baja karbon tetapi karena adanya pengendapan halus fasa kedua dalam butir Kristal paduan. Karena proses ini maka pengerasan pada paduan aluminium disebut pengerasan presipitasi. Aluminium dalam bentuk paduan yang sering dikenal dengan istilah aluminium *alloy* merupakan jenis aluminium yang digunakan cukup besar saat ini. Berdasarkan metode peleburannya, aluminium paduan dapat di klasifikasikan menjadi dua kelompok utama yaitu paduan tempa dan paduan tuang. Dapat dilihat pada tabel dibawah komposisi aluminium paduan yang. Tidak menutup kemungkinan dalam jangka waktu tertentu di temukan lagi jenis aluminium paduan terbaru. Aluminium dalam bentuk murni dinilai memiliki kekuatan yang rendah dan tidak cukup baik diaplikasikan sebab membutuhkan ketahanan deformasi dan patahan, maka dari itu perlu ditambahkan unsur lain untuk meningkatkan kekuatannya. Berikut ini tabel komposisi aluminium paduan.

Tabel 5 Komposisi Kimia Paduan Aluminium

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Each	[Note (5)]	Al
1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	....	0.05	0.03 [Note (6)]	0.03	....	99.60 min [Note (7)]
1100	0.95 si + Fe		0.05 - 0.20	0.05	....	....	0.10	....	0.05	0.15	99.00 min [Note (7)]
3003	0.6	0.7	0.05 - 0.20	1.0 - 1.5	....	....	0.10	....	0.05	0.15	Remainder
Aklad 3003	3003 Clad with 7072										
3004	0.30	0.7	0.25	1.0 - 1.5	0.8 - 1.3	....	0.25	....	0.05	0.15	Remainder
Aklad 3004	3004 Clad with 7072										
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2 - 2.8	0.15 - 0.35	0.10	....	0.05	0.15	Remainder
5083	0.40	0.10	0.40 - 1.0	4.0 - 4.9	0.05	0.05 - 0.25	0.25	0.15	0.05	0.15	Remainder
5086	0.40	0.50	0.10	0.20 - 0.7	3.5 - 4.5	0.05 - 0.25	0.25	0.15	0.05	0.15	Remainder

Sumber : ASME section II,(2001)

Aluminium murni tanpa campuran unsur logam lain sangat lunak, elastis dan tidak begitu kuat. Aluminium murni memiliki kekuatan tegangan 49 MPa dan 700 Mpa. Aluminium memiliki warna perak mengkilap, warnanya dapat berubah menjadi kelabu muda akibat pembentukan oksida apabila diletakkan di udara. Oksida ini sangat ulet dan tahan api. .Karenanya aluminium murni jarang sekali dipakai. Untuk memperbaiki sifat aluminium sering ditambahkan unsur logam lain berupa tembaga, mangan, magnesium silisium atau seng yaitu untuk mendapatkan kenaikan kekuatan dan kekerasan serta beberapa keuntungan lainnya. Kekuatan aluminium akan lebih optimal apabila dipadukan dengan unsur lain dan diberi perlakuan panas, yang akan menyebabkan terbentuknya presipitat yang kecil (submikro) namun kuat, yang akan menghalangi terjadinya dislokasi ketika dilakukan proses permesinan(Rochman R,2010).

Pada proses pembuatan sandwich *aluminium foam* menggunakan plat aluminium sebagai bahan skin dengan jenis paduan Al-Zn atau lebih spesifik seri 7072. Paduan ini termasuk jenis yang dapat menerima perlakuan panas . Biasanya ke dalam paduan pokok Al-Zn ditambahkan Mg, Cu, dan Cr. Kekuatan tarik yang dapat dicapai lebih dari 50 kg/mm² , sehingga paduan ini dinamakan juga ultra duralium.Namun sifat paduan ini berlawanan dengan kekuatan tariknya, sifat mampu las dan daya tahan terhadap korosi kurang baik. Dalam waktu akhir-akhir ini paduan Al-Zn-Mg mulai banyak digunakan dalam konstruksi las, karena jenis ini

mempunyai sifat mampu las dan tahan korosi yang lebih baik dari paduan dasar Al-Zn.

2.3 Aplikasi *Sandwich Aluminum Foam*

2.3.1 Industri Kereta Api

Penggunaan material aluminium foam pada kereta seperti pada Gambar 2.4 dapat memberikan keuntungan karena dapat memenuhi kebutuhan material yang ringan namun kuat sehingga beban angkut dapat ditingkatkan.



Gambar 5 Aplikasi *Sandwich Aluminium Foam* pada industri kereta api

Banhart (2001) menyelidiki bahwa pemanfaatan bahan aluminium foam masih sangat sulit di temui pada industri kereta api karena kondisi ini tidak dapat dibandingkan dengan penggunaan material aluminium *foam* pada mobil yang lebih mudah didapatkan, sebab memiliki fleksibilitas yang tinggi dalam 20 jenis pembuatan bahan. Spare part mobil berbahan aluminium *foam* yang diproduksi secara massal memiliki standar yang telah ditentukan dan harga yang lebih murah. Material aluminium *foam* di sarankan dalam proses pembuatan kereta api untuk mengoptimalkan penyerapan energi pada saat terjadi tabrakan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik material yang kaku sehingga tidak diperlukan lagi tulang rusuk dalam proses pembuatannya. Material yang ringan sangat menguntungkan karena kereta dapat bergerak lebih cepat dan efisien. Hisyam (2022) menyatakan pada umumnya, material yang digunakan dalam pembuatan modul energi *absorber* adalah aluminium, dari berbagai penelitian yang dilakukan pada kecepatan tumbukan terjadi adanya deformasi plastis. Hal ini menunjukkan penyerapan energi pada modul energi *absorber*. Fungsi utama penambahan *foam* adalah sebagai sistem keamanan pasif agar efektif mampu menyerap energi pada saat terjadi tumbukan yang datang secara tiba tiba untuk mengurangi resiko terjadinya kecelakaan berat.

2.3.2 Adaptor Roket Ariene 5

Banhart pada penelitiannya (2008) roket 'Ariane 5' Eropa menggunakan dua adaptor berbentuk kerucut yang mendukung muatan. Saat ini material penyusunnya terbuat dari *aluminium honeycomb* dan harus diproses dengan biaya tinggi. Tujuan mengganti kerucut ini dengan material *aluminium sandwich foam* yang lebih murah dan lebih mudah proses dengan mengelas bersama 12 segmen *aluminium sandwich foam* melengkung dengan pengelasan TIG. Kerucut yang dihasilkan lebar dasarnya hampir 4 m dan beratnya 180 kg. Dalam pengujian dengan beban hingga 100 kN baik pada bidang normal maupun bidang geser, prototipe menunjukkan kekuatan yang cukup tetapi kekakuan yang masih 10% terlalu rendah. Prototipe berikutnya akan dibangun sesuai dengan kekakuan bahan yang lebih tinggi



Gambar 6 Aplikasi Sandwich Aluminium Foam pada roket (*Sumber : Banhart, 2008*)

2.3.3 Industri Otomotif

Menurut Musyafriadi, (2021) Penggunaan *aluminium foam* pada mobil dapat mengoptimalkan beberapa utama yang berkaitan dengan keamanan kendaraan, yaitu penyerapan energi ketika terjadi tabrakan, berat beban konstruksi, dan mengurangi laju perpindahan kalor. Selain itu peran penggunaan *aluminium foam* pada kendaraan juga dapat meredam suara yang ditimbulkan baik pada proses pembakaran atau bising dari lingkungan sekitar. Contoh penggunaan material *aluminium foam* pada dunia otomotif yaitu pada bagian penutup

bagasi, kap mesin, dan sebagai material pengisi pada tabung penyambung bumper mobil depan dan belakang serta sebagai *crush box* serta *frame* mobil. Bagian penutup kap mobil dan kap mesin yang berbahan aluminium foam digunakan untuk mengoptimalkan massa dari konstruksi dan stabilitas.

2.4 Tegangan Regangan

Tegangan dapat di definisikan sebagai sistem gaya atau beban eksternal yang bekerja pada suatu benda, gaya internal baik sama dan berlawanan dipasang di berbagai bagian benda yang menahan gaya eksternal. Tegangan dapat di rumuskan sebagai perbandingan jumlah perbandingan gaya atau reaksi dengan luas penampang. Maka persamaan yang di gunakan adalah

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Dimana :

σ = Tegangan (N/m²)

F = Gaya yang bekerja (N)

A = Luas Penampang (m²)

Regangan merupakan perubahan ukuran dari panjang mula mula, sebagai hasil dari gaya yang menekan atau menarik pada material. Batasan sifat elastis perbandingan tegangan regangan akan linier dan akan berakhir pada titik mulur. Regangan juga dapat di artikan sebagai kondisi material yang mengalami deformasi. Regangan dapat di notasikan dengan persamaan berikut ini

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\delta}{l} \quad (2)$$

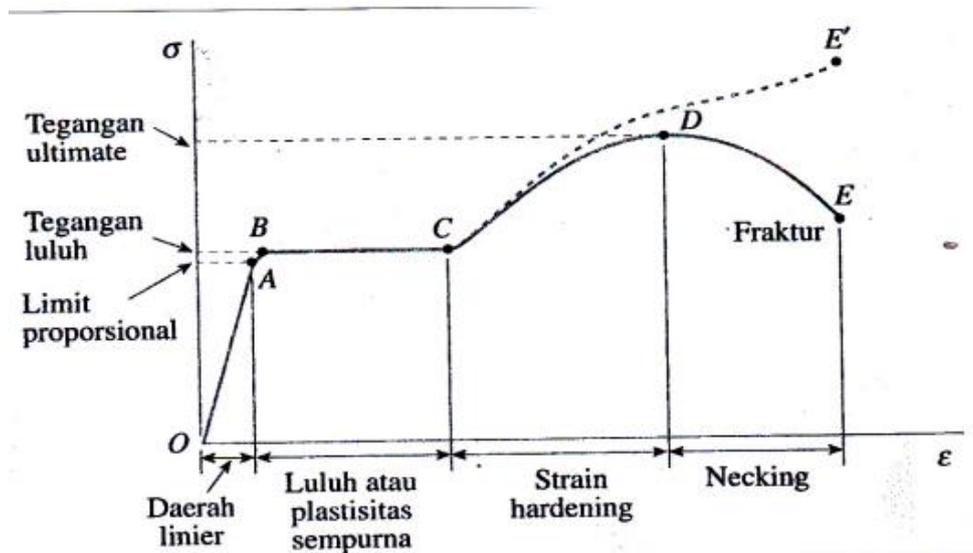
Sehingga :

σ = Tegangan (N/m²)

l = Panjang mula mula benda (m)

δ = Pertambahan panjang benda (m)

Diagram tegangan regangan merupakan diagram yang menyatakan kekuatan benda dari hasil uji tarik maupun uji tekan. Dalam proses pengujian material akan di tarik maupun di tekan hingga patah



Gambar 6 Grafik Tegangan Regangan (Sumber: Mulyati, 2019)

Diagram dimulai dari garis lurus dari pusat sumbu 0 ke titik A, yang menyatakan bahwa hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah ini linier dan proporsional, dimana titik A tegangan maksimum, tidak terjadi perubahan bentuk ketika beban diberikan disebut batas elastis, jadi tegangan di A disebut limit proporsional, dan OA disebut daerah elastis. Mulai dari titik B terjadi perpanjangan yang cukup besar pada spesimen uji tanpa adanya penambahan gaya tarik (dari B ke C), fenomena ini disebut luluh dari bahan, dan titik B dapat di artikan sebagai titik luluh. Di daerah antara B dan C, spesimen menjadi plastis sempurna, yang berarti bahwa bahan terdeformasi tanpa adanya penambahan beban. Setelah mengalami regangan besar yang terjadi selama peluluan di daerah BC, spesimen mulai mengalami pengerasan regang atau biasa di sebut *strain hardening*. Perpanjangan benda di daerah ini membutuhkan peningkatan beban tarik, sehingga diagram tegangan-regangan mempunyai kemiringan positif dari C ke D, dan beban pada akhirnya mencapai titik maksimum, dan tegangan di titik D disebut tegangan ultimit. Penarikan batang lebih lanjut akan disertai dengan pengurangan beban dan akhirnya terjadi putus/patah di suatu titik yaitu pada titik E. (Mulyati, 2012)

2.5 Pengujian Lentur

Pada penelitian Ainulmakhrus(2015) Pengujian lentur dapat di definisikan sebagai proses pengujian spesimen material dengan cara di tekan untuk mendapatkan hasil berupa data mengenai kekuatan lengkung (lentur) suatu material yang di uji. Alat uji lentur merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengujian kekuatan lengkung atau yang biasa di sebut lentur pada suatu bahan atau material. Dalam pengujian lentur terdapat titik lentur yang berfungsi sebagai tumpuan spesimen uji dan juga sebagai penerus gaya tekan yang dikeluarkan oleh alat uji . Dimensi tumpuan titik lentur akan berpengaruh terhadap hasil pengujian. Proses pengujian lentur memiliki dua macam pengujian, yaitu pengujian lentur tiga titik dan empat titik.

Metode pengujian ini mencakup penentuan sifat-sifat konstruksi *sandwich* datar yang mengalami lentur mendatar sedemikian rupa sehingga momen yang diterapkan menghasilkan kelengkungan bidang-bidang yang berhadapan dengan *sandwich*. Uji lentur pada konstruksi *sandwich* datar dapat dilakukan untuk menentukan kekakuan lentur *sandwich*, kekuatan geser inti dan modulus geser, atau kekuatan tekan dan tarik permukaan. Pengujian untuk mengevaluasi kekuatan geser inti juga dapat digunakan untuk mengevaluasi ikatan inti-ke-muka. Kekakuan *sandwich* dan modulus geser inti dapat ditentukan dengan perhitungan yang melibatkan defleksi terukur dari spesimen lentur *sandwich*. Pengujian dapat dilakukan pada spesimen pendek dan spesimen panjang atau pada satu spesimen yang dibebani dengan dua cara, dan kekakuan lentur dan modulus geser dapat ditentukan dengan solusi simultan dari persamaan lendutan lengkap untuk setiap bentang atau setiap pembebanan. Jika nilai modulus hadap diketahui, balok bentang pendek dapat diuji dan lendutan lentur yang dihitung dikurangi dengan lendutan total balok.(ASTM C393)

Menurut Schamid 2008 proses uji lentur dilakukan dengan cara menekuk benda kerja atau spesimen bahan hingga mengalami perubahan bentuk berupa peregangan logam pada sekitar daerah garis lurus dalam hal ini sumbu netral. Parameter pengujian lentur meliputi tegangan lentur, regangan lentur, modulus

elastisitas dan ketangguhan patah. Dapat kita ketahui bahwa lembaran plat dengan bentuk gelombang mempunyai kekakuan yang lebih tinggi daripada lembaran plat yang rata. Pada pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui respon material terhadap kombinasi tegangan, kompresi, dan gaya geser.

Tabel 6 Kelebihan dan Kekurangan Metode Uji lentur tiga titik dan empat titik

Sumber : Ainulmakhrus, (2015)

Kelebihan	
+ Kemudahan persiapan spesimen dan pengujian	+ Penggunaan rumus perhitungan lebih mudah
+ Pembuatan <i>point</i> lebih mudah	+ Lebih akurat hasil pengujiannya
Kekurangan	
- Kesulitan menentukan titik tengah persis, karena jika posisi tidak di tengah persis penggunaan rumus berubah	- Pembuatan <i>point</i> lebih rumit
- Kemungkinan terjadi pergeseran, sehingga benda yang diuji pecah/patah tidak tepat di tengah maka rumus yang digunakan kombinasi tegangan lengkung dengan tegangan geser	- 2 <i>point</i> atas harus bersamaan menekan benda uji. Jika salah satu <i>point</i> lebih dulu menekan benda uji maka terjadi <i>three point bending</i> , sehingga rumus yang digunakan berbeda.

2.5.1 Uji Lentur Tiga Titik

Uji lentur tiga titik adalah metode pengujian yang menggunakan dua tumpuan dan satu penekan. Pada bagian bawah terdapat dua tumpuan dan satu tumpuan nya terletak pada bagian atas yang berperan sebagai penekan. Persamaan yang digunakan untuk pengujian lentur tiga titik antara lain :

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{P}{(d+C)b} \quad (4)$$

$$D = \frac{E(d^3 - C^3)b}{12} \quad (5)$$

Keterangan persamaan:

σ_f = Kekuatan lentur (MPa)

P = beban atau Gaya yang terjadi (kN)

t = ketebalan kulit (mm)

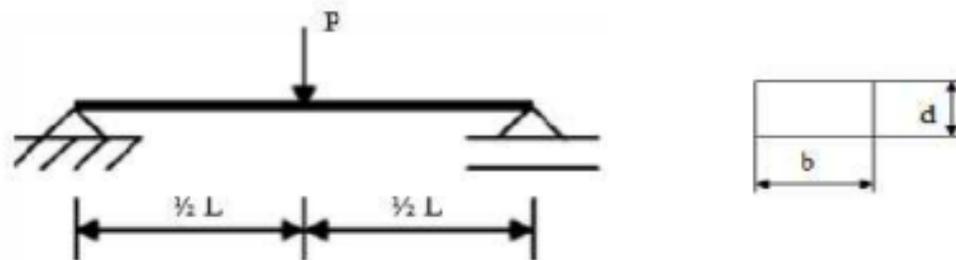
c = Ketebalan inti (mm)

b = lebar benda uji (mm)

d = Ketebalan benda uji (mm)

τ = Tegangan geser

D = Kekakuan lentur



Gambar 7 Uji Lentur Tiga Titik((*Sumber :Ainulmakhrus,2015*))

2.5.2 Uji Lentur Empat Titik

Uji lentur empat titik merupakan cara pengujian yang menggunakan dua tumpuan dan dua penekan. Pada bagian bawah terdapat dua titik yang berfungsi sebagai tumpuan dan dua titik penekan pada bagian atas yang berfungsi sebagai penekan. Uji lentur empat titik dapat di notasikan dengan persamaan berikut

$$\sigma_f = \frac{PL}{4t(d+c)b} \quad (6)$$

$$D = \frac{P_1 L_1^3 \left[1 - \left(\frac{11 L_2^2}{8 L_1^2} \right) \right]}{48 \Delta_1 \left[1 - \left(\frac{2 P_1 L_1 \Delta_2}{P_2 L_2 \Delta_1} \right) \right]} \quad (7)$$

Keterangan Persamaan :

P_1 = Beban pada uji lentur tiga titik (N).

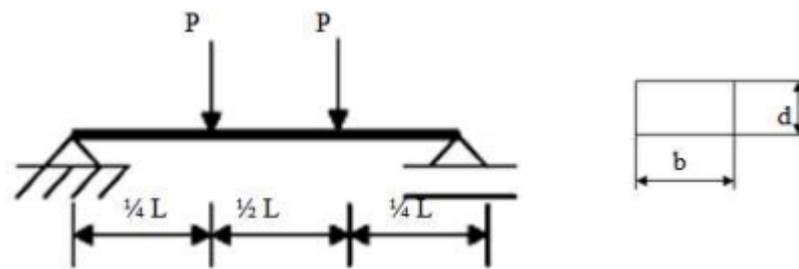
P_2 = Beban pada uji lentur empat titik (N).

L_1 = Panjang span pada uji lentur tiga titik (mm).

L_2 = Panjang span pada uji lentur empat titik (mm).

Δ_1 = Total defleksi span pada empat titik (mm)

Δ_2 = Total defleksi span pada empat titik (mm).



Gambar 8 Uji Lentur Empat Titik ((Sumber :Ainulmakhrus,2015)