

SKRIPSI

**ANALISIS KEKAKUAN LENTUR PADA SANDWICH
ALUMINIUM FOAM MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

Disusun dan Diajukan oleh:

NUR HAMNASHRI

D021 19 1043



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS KEKAKUAN LENTUR PADA SANDWICH ALUMINIUM FOAM MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Disusun dan diajukan oleh

Nur Hamnashri
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 : NUR HAMNASHRI

NIM : D021 19 1043

Program Studi : TEKNIK MESIN

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisis Kekakuan Lentur pada Sandwich Aluminium Foam Menggunakan Metode Elemen Hingga}

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



NUR HAMNASHRI

ABSTRAK

NUR HAMNASHRI. *Analisis Kekakuan Lentur Pada Sandwich Aluminium Foam Menggunakan Metode Elemen Hingga* (dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT.)

Komposit *sandwich* memiliki keunggulan dalam sifat mekaniknya seperti kekakuan dan kekuatan spesifik yang tinggi serta dapat meredam getaran dan suara. Pada kereta api cepat, penumpang maupun angkutan barang diasumsikan sebagai pembebanan utama pada lantai kereta api cepat. Hal inilah yang menjadikan material komposit sandwich sebagai pilihan utama dalam pengembangan struktur transportasi modern khususnya pada lantai maupun badan kereta api cepat sebagai struktur bantalan beban utama. Untuk memenuhi kebutuhan kekuatan yang diinginkan dalam aplikasi tertentu khususnya pada kereta api cepat, pengisian inti komposit sandwich dengan aluminium *foam* merupakan pilihan yang menarik dengan karakteristik dan ketahanannya terhadap korosi. Adapun tujuan penelitian yaitu untuk menganalisis kekuatan dan kekakuan lentur material dari *sandwich aluminium foam* dengan variasi ketebalan inti *foam* 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm dan 30 mm. Penelitian ini dilakukan secara simulasi numerik dengan pengujian lentur tiga titik dan empat titik. Pengujian yang dilakukan mengacu pada standar ASTM C-393 untuk dilakukan uji lentur tiga titik dan empat titik. Data simulasi numerik kemudian divalidasi dengan hasil uji bending laboratorium untuk diamati kesesuaiannya dengan data eksperimen. Dari hasil simulasi, nilai kekuatan lentur tertinggi pada uji lentur tiga titik terdapat pada variasi ketebalan inti *foam* 5 mm dengan nilai 44.834 MPa. Begitu juga nilai kekuatan lentur tertinggi untuk uji lentur empat titik didapatkan pada variasi ketebalan inti *foam* 5 mm dengan nilai 69.480 MPa. Untuk nilai kekakuan lentur tertinggi pada uji lentur tiga titik didapatkan pada variasi ketebalan inti *foam* 30 mm dengan nilai 15256.512 MN.mm². Begitu juga nilai kekakuan lentur tertinggi untuk uji lentur empat titik didapatkan pada variasi ketebalan inti *foam* 30 mm dengan nilai 12.744 MN.mm². Untuk hasil perbandingan uji simulasi dan uji eksperimen terdapat kesesuaian yang baik, sehingga hasil simulasi dapat mewakili hasil uji secara eksperimen.

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

ABSTRACT

NUR HAMNASHRI. *Flexural Stiffness Analysis of Aluminum Foam Sandwich Using Finite Element Method (supervised by Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT.)*

Sandwich composites offer advantages in mechanical properties such as high stiffness and specific strength, as well as the ability to dampen vibrations and noise. In high-speed trains, both passengers and cargo are assumed to be the main loads on the fast train floor. This is what makes sandwich composite materials the preferred choice in the development of modern transportation structures, especially in the floors and bodies of high-speed trains as primary load-bearing structures. To meet the desired strength requirements in specific applications, especially in high-speed trains, filling the core of the sandwich composite with aluminum foam is an attractive option due to its characteristics and resistance to corrosion. The research objective is to analyze the strength and flexural stiffness of aluminum foam sandwiches with core thickness variations of 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, and 30 mm. This research was conducted through numerical simulation with three-point and four-point bending tests. The tests were conducted according to ASTM C-393 standards for three-point and four-point bending tests. The numerical simulation data were then validated with laboratory bending test results to observe their conformity with experimental data. From the simulation results, the highest flexural strength value in the three-point bending test was found in the 5 mm foam core thickness variation with a value of 44.834 MPa. Similarly, the highest flexural strength value for the four-point bending test was obtained in the 5 mm foam core thickness variation with a value of 69.480 MPa. The highest flexural stiffness value in the three-point bending test was obtained in the 30 mm foam core thickness variation with a value of 15256.512 MN.mm². Similarly, the highest flexural stiffness value for the four-point bending test was obtained in the 30 mm foam core thickness variation with a value of 12.744 MN.mm². There was good agreement between the simulation and experimental test results, indicating that the simulation results can represent the experimental results well.

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

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
KATA PENGANTAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Aluminium Foam	4
2.1.1 Sandwich Aluminium Foam	6
2.2 Aluminium	7
2.3 Aplikasi Sandwich Aluminium Foam.....	10
2.3.1 Industri Kereta Api.....	10
2.3.2 Industri Otomotif.....	10
2.4 Tegangan-Regangan.....	11
2.5 Uji Bending	13
2.5.1 Three-Point Bending	13
2.5.2 Four-Point Bending	14
2.6 Metode Elemen Hingga.....	15
2.7 Tegangan Von Mises	17
2.8 Software Abaqus CAE	17
2.8.1 Tahapan-Tahapan Menjalankan Program Abaqus	18
2.8.2 Komponen Pada Windows Utama Abaqus	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	22
3.1 Lokasi Penelitian.....	22
3.2 Alat dan Bahan.....	22
3.2.1 Alat.....	22
3.2.2 Bahan	25
3.3 Flowchart Penelitian	27
3.4 Prosedur Penelitian.....	28
3.5 Spesifikasi Sandwich Panel	35

3.6 Rencana dan Jadwal Penelitian	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Karakterisasi Material	37
4.1.1 Uji Tarik Aluminium Alloy 7072	37
4.1.2 Uji Tekan Aluminium Foam	39
4.2 Hasil Simulasi	41
4.2.1 Pengaruh Variasi Ketebalan Inti Foam terhadap Beban Lentur Maksimum	43
4.2.2 Pengaruh Variasi Ketebalan Inti Foam terhadap Tegangan Maksimum Von Mises.....	46
4.2.3 Pengaruh Variasi Ketebalan Inti Foam terhadap Kekuatan Lentur	48
4.2.4 Pengaruh Variasi Ketebalan Inti Foam terhadap Kekakuan Lentur.....	50
4.3 Validasi Simulasi terhadap Eksperimen	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN.....	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>Foam</i> rongga tertutup dan <i>foam</i> rongga terbuka	6
Gambar 2. Struktur <i>sandwich aluminium foam</i>	7
Gambar 3. Aplikasi aluminium <i>foam</i> pada industri kereta api.....	10
Gambar 4. (a) <i>Prototype crash absorber box</i> menggunakan <i>aluminium foam</i> dan (b) <i>Design CAD</i> penggunaan <i>aluminium foam</i> pada mobil	11
Gambar 5. Grafik tegangan-regangan	12
Gambar 6. Tahapan menjalankan program <i>abaqus</i>	19
Gambar 7. Komponen pada windows utama program <i>abaqus</i>	21
Gambar 8. Lokasi penelitian di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin	22
Gambar 9. <i>Universal testing machine</i>	23
Gambar 10. Mesin gerinda	23
Gambar 11. Ragum	23
Gambar 12. Gergaji besi	24
Gambar 13. Spidol	24
Gambar 14. Jangka sorong dan mistar	24
Gambar 15. Mesin amplas	25
Gambar 16. Logo <i>software</i> <i>abaqus</i> <i>simulia</i>	25
Gambar 17. (a) Skema standar ASTM E8/E8M - 13a dan (b) Spesimen uji tarik AA 7072	26
Gambar 18. Skema standar ISO 13314:2011(E).....	26
Gambar 19. <i>Flowchart</i> penelitian	27
Gambar 20. Tampilan opsi <i>create part</i>	28
Gambar 21. Tampilan seluruh <i>part</i> telah digabung	30
Gambar 22. Tampilan panel <i>step</i> pada <i>abaqus CAE</i>	30
Gambar 23. Tampilan panel <i>field output</i> pada <i>abaqus CAE</i>	30
Gambar 24. Tampilan panel <i>history output</i> pada <i>abaqus CAE</i>	31
Gambar 25. Tampilan panel <i>constraint</i> pada <i>abaqus CAE</i>	31
Gambar 26. Tampilan panel <i>contact property</i> pada <i>abaqus CAE</i>	32
Gambar 27. Tampilan panel <i>interaction</i> pada <i>abaqus CAE</i>	32
Gambar 28. Tampilan panel <i>boundary condition-1</i> pada <i>abaqus CAE</i>	33
Gambar 29. Tampilan panel <i>boundary condition-2</i> pada <i>Abaqus CAE</i>	33
Gambar 30. Tampilan <i>global seeds</i> pada <i>abaqus CAE</i> kemudian klik <i>apply</i>	34
Gambar 31. Tampilan panel <i>job</i> <i>abaqus CAE</i>	34
Gambar 32. Tampilan panel <i>job manager</i> <i>Abaqus CAE</i>	35
Gambar 33. Skema standar ASTM C393-00	35
Gambar 34. Kurva tegangan-regangan hasil uji tarik <i>aluminium alloy 7072</i>	38
Gambar 35. Perbandingan kurva tegangan-regangan perhitungan dan sesungguhnya	39
Gambar 36. Kurva tegangan-regangan plastis <i>aluminium alloy 7072</i>	39

Gambar 37. Kurva tegangan-regangan hasil uji tekan <i>aluminium foam</i>	40
Gambar 38. Perbandingan kurva tegangan-regangan kompresi perhitungan dan sesungguhnya	41
Gambar 39. Hasil simulasi pengujian lentur tiga titik dan empat titik.....	43
Gambar 40. Kurva pengaruh ketebalan inti <i>foam</i> terhadap beban lentur maksimum pada simulasi uji lentur tiga titik.....	43
Gambar 41. Kurva pengaruh ketebalan inti <i>foam</i> terhadap beban lentur maksimum pada simulasi uji lentur empat titik	44
Gambar 42. Tegangan von mises pada ketebalan inti <i>foam</i> 30 mm pada simulasi uji lentur tiga titik.....	46
Gambar 43. Tegangan von mises pada ketebalan inti 25 mm pada simulasi uji lentur empat titik	47
Gambar 44. Grafik perbandingan kekuatan lentur <i>sandwich</i> pada setiap variasi ketebalan inti <i>foam</i> pada simulasi uji lentur tiga titik	48
Gambar 45. Grafik perbandingan kekuatan lentur <i>sandwich</i> pada setiap variasi ketebalan inti <i>foam</i> pada simulasi uji lentur empat titik	49
Gambar 46. Grafik perbandingan kekakuan lentur panel <i>sandwich</i> pada setiap variasi ketebalan inti <i>foam</i> pada simulasi uji lentur tiga titik	50
Gambar 47. Grafik perbandingan kekakuan lentur panel <i>sandwich</i> pada setiap variasi ketebalan inti <i>foam</i> pada simulasi uji lentur empat titik.....	51
Gambar 48. Perbandingan (a) deformasi simulasi dan (b) deformasi eksperimen	52
Gambar 49. Perbandingan kurva beban terhadap perpindahan antara data simulasi dan eksperimen pada pengujian lentur tiga titik: (a) inti <i>foam</i> 25 mm dan (b) inti <i>foam</i> 30 mm.....	53
Gambar 50. Perbandingan kurva beban terhadap perpindahan antara data simulasi dan eksperimen pada pengujian lentur empat titik: (a) inti <i>foam</i> 25 mm dan (b) inti <i>foam</i> 30 mm.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik aluminium <i>foam</i>	5
Tabel 2. Sifat-sifat fisik aluminium	8
Tabel 3. Sifat mekanik aluminium	8
Tabel 4. Kelebihan dan kekurangan metode uji <i>three-point bending</i> dan <i>four-point bending</i>	15
Tabel 5. Dimensi spesimen uji tarik (dalam satuan mm).....	26
Tabel 6. Dimensi spesimen uji tekan	26
Tabel 7. Rencana dan jadwal penelitian.....	36
Tabel 8. Karakteristik <i>aluminium alloy 7072</i> sesungguhnya.....	38
Tabel 9. Karakteristik <i>aluminium foam</i> sesungguhnya	40
Tabel 10. Beban lentur maksimum pada simulasi uji lentur tiga titik	44
Tabel 11. Beban lentur maksimum pada simulasi uji lentur empat titik.....	45
Tabel 12. Tegangan maksimum von mises pada simulasi uji lentur tiga titik	47
Tabel 13. Tegangan maksimum von mises pada simulasi uji lentur empat titik ..	48
Tabel 14. Perbandingan <i>peak force</i> dari hasil simulasi dan eksperimen.....	54

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
TPB	Pengujian lentur tiga titik
FPB	Pengujian lentur empat titik
5-TPB	Pengujian lentur tiga titik variasi inti 5 mm
10-TPB	Pengujian lentur tiga titik variasi inti 10 mm
15-TPB	Pengujian lentur tiga titik variasi inti 15 mm
20-TPB	Pengujian lentur tiga titik variasi inti 20 mm
25-TPB	Pengujian lentur tiga titik variasi inti 25 mm
30-TPB	Pengujian lentur tiga titik variasi inti 30 mm
5-FPB	Pengujian lentur empat titik variasi inti 5 mm
10-FPB	Pengujian lentur empat titik variasi inti 10 mm
15-FPB	Pengujian lentur empat titik variasi inti 15 mm
20-FPB	Pengujian lentur empat titik variasi inti 20 mm
25-FPB	Pengujian lentur empat titik variasi inti 25 mm
30-FPB	Pengujian lentur empat titik variasi inti 30 mm
25-TPB-SIM	Spesimen 25-TPB simulasi
25-TPB-EKS	Spesimen 25-TPB eksperimen
30-FPB-SIM	Spesimen 30-FPB simulasi
30-FPB-EKS	Spesimen 30-FPB eksperimen
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 (kN)
P_2	Beban lentur empat titik (kN)
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 (MN.mm ²)
D_{FPB}	Nilai kekakuan lentur empat titik (MN.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. Tabel grafik pengujian tarik AL 7072	60
Lampiran 2. Tabel grafik pengujian tekan aluminium foam	60
Lampiran 3. Dokumentasi penelitian	61

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *Azza Wa Jalla* atas berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Analisis Kekakuan Lentur pada Sandwich Aluminium Foam Menggunakan Metode Elemen Hingga”.

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

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari peran banyak pihak yang telah memberikan bantuan, dorongan dan masukan kepada penulis sehingga pada kesempatan ini penulis dengan kerendahan hati dan rasa hormat mengucapkan banyak terima kasih yang terdalam untuk kedua orang tua penulis yaitu Ibunda tercinta Juliati, S dan juga Ayahanda Ir. Jabair, ST., MT., dan juga kepada saudara penulis Nur Hamnashri. 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, MT., 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 saran dan 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
4. Bapak Edi Iskandar ST. selaku laboran lab metalurgi fisik yang senantiasa membantu dan memberi arahan penulis dalam menjalankan penelitiannya.

5. Bapak Prof. Dr. Eng. Jalaluddin ST., MT., Selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Partner penelitian penulis, Bor Muh. Fadli Fauzan yang banyak membantu penulis mulai dari diskusi, perencanaan penelitian, pembuatan specimen, pengambilan data hingga penyusunan skripsi.
7. Saudara(i) seperjuangan BRUZHLEZZ 19 yang selalu membantu dan menjadi partner dalam berdiskusi sejak awal perkuliahan terkhusus kepada Jailani Ahmad Thufa'il, Subir, Muhammad Dimaz P., Taufik Rahmat, AM Diaz Miftah, Muh. Farhan, Muh. Arjun, Muh Adam Padanrangi, Muh. Dzulfaqar S., Ridwansyah Burhanuddin, Ilham Hamdi, Arief Fikri serta teman-teman lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
8. Pemilik nomor induk mahasiswa 40400120051 yang menjadi salah satu support system terbaik penulis mulai dari awal masuk perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini.
9. Serta semua pihak yang telah memberikan bantuan kepada penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

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 27 Februari 2024

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi, bahan komposit *sandwich* telah memunculkan inovasi penting dalam berbagai sektor, termasuk dalam moda transportasi dan industri lainnya. Keunggulan sifat mekaniknya, seperti kekakuan dan kekuatan spesifik yang tinggi, menjadikannya pilihan utama dalam pengembangan struktur transportasi modern. Panel inti *sandwich*, sebagai elemen struktural utama, telah diterapkan secara luas, termasuk dalam konstruksi lantai dan badan kereta berkecepatan tinggi (Chang et al., 2021).

Adriansyah (2021) menyatakan bahwa komposit *sandwich*, sebuah jenis material komposit struktural, menawarkan potensi pengembangan yang signifikan. Terdiri dari tiga lapisan, termasuk *face sheet* komposit datar sebagai kulit permukaan berbahan pelat aluminium, serta material inti di bagian tengahnya, komposit *sandwich* diakui mampu menahan beban lentur, impak, meredam getaran, dan suara. Oleh karena itu, pengembangan material komposit *sandwich* menjadi relevan, terutama untuk aplikasi dalam industri transportasi seperti lantai kereta cepat, konstruksi roket, serta kendaraan militer seperti tank dan pesawat terbang.

Mengenai kinerja lentur material *sandwich*, banyak peneliti yang telah melakukan simulasi numerik. Arbaoui et al. (2016) melakukan studi numerik terperinci tentang perilaku lentur empat titik dari panel *sandwich* berlapis. Mereka juga mengimplementasikan model numerik tanpa mempertimbangkan kerusakan untuk mensimulasikan dengan akurat perilaku elastis dari bahan tersebut. Hasil numerik konsisten dengan hasil eksperimental. Wang et al. (2018) melakukan serangkaian simulasi lentur tiga titik untuk panel *sandwich* keramik dan panel *sandwich* sarang lebah aluminium konvensional. Hasilnya menunjukkan bahwa konfigurasi geometris dari panel *sandwich* secara signifikan memengaruhi kinerja lentur.

Meskipun demikian, untuk memenuhi tuntutan kekuatan yang diinginkan dalam aplikasi tertentu, komposit *sandwich* dengan inti aluminium *foam* menjadi

pilihan yang menarik. Aluminium *foam*, dengan karakteristik ringan, kekuatan tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan kemampuan menyerap energi yang unik, memberikan dimensi baru pada struktur material. Pengisian inti komposit *sandwich* dengan aluminium *foam* dapat meningkatkan kemampuan penyerapan energi dan menstabilkan kurva struktur, menciptakan kombinasi material yang optimal. (Renreng et al., 2020).

Berdasarkan uraian di atas, diperlukan penelitian lebih mendalam mengenai *sandwich aluminium foam* dengan variasi ketebalan *foam* menjadi suatu kebutuhan. Hal ini bertujuan untuk memahami perilaku lentur material pada *sandwich aluminium foam*. Metode pengujian beban lentur tiga titik dan empat titik akan diaplikasikan menggunakan *software* metode elemen hingga untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terkait sifat mekaniknya. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif pada pengembangan teknologi material, khususnya dalam moda 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 lentur pada *sandwich aluminium foam* berdasarkan hasil permodelan menggunakan *software* Abaqus CAE?
2. Bagaimana pengaruh dari variasi ketebalan inti *foam* terhadap nilai kekakuan lentur pada *sandwich aluminium foam* berdasarkan hasil permodelan menggunakan *software* Abaqus CAE?
3. Apakah hasil simulasi pada Abaqus CAE sesuai dengan hasil eksperimen?

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 lentur pada *sandwich aluminium foam* berdasarkan hasil permodelan menggunakan *software* Abaqus CAE.

2. Menganalisis pengaruh dari variasi ketebalan inti *foam* terhadap nilai kekakuan lentur pada *sandwich aluminium foam* berdasarkan hasil permodelan menggunakan *software* Abaqus CAE.
3. Menganalisis perbandingan antara hasil uji simulasi dan hasil uji eksperimen pada *sandwich aluminium foam*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain :

1. Penelitian hanya dilakukan menggunakan *software* Abaqus CAE.
2. Menggunakan material *sandwich* berupa pelat *aluminium alloy 7072* dan *aluminium foam* dengan variasi ketebalan *foam*.
3. Benda uji dianggap isotropik.
4. Simulasi berupa pengujian lentur dengan tiga titik dan empat titik.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Bagi penulis, sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar Sarjana Teknik, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
2. Bagi pembaca, dapat mengetahui pengaruh perilaku lentur struktur panel *sandwich aluminium foam* berdasarkan hasil permodelan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) menggunakan *software* Abaqus CAE.
3. Bagi universitas, dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium Foam

Metal foam adalah material seluler yang terdiri dari fase padat dan fase gas yang terdispersi di dalamnya. Sebagai hasil dari strukturnya, mereka menunjukkan kombinasi sifat-sifat seperti kerapatan yang rendah, rasio kekakuan terhadap massa yang menguntungkan dan sifat penyerapan energi yang baik. Desain sandwich yang didasarkan pada *face sheets* yang padat dapat menghasilkan sifat kompresi, tegangan, torsi, atau tekukan di luar dari *metal foam* itu sendiri. *Face sheets* melindungi inti foam (*core*) dari kerusakan permukaan dan korosi, dan memungkinkan struktur menahan beban tarik, di mana *metal foam* berkinerja buruk dalam hal tersebut. Optimalisasi seperti ini juga dapat dilakukan untuk material lain dan menghasilkan struktur seperti panel sarang lebah (*honeycomb panels*), struktur yang dikakukan dengan tali atau pelat wafel. Namun, struktur yang lebih kaku seperti itu cenderung lebih rentan terhadap kegagalan di bawah tegangan geser tertentu karena sifat anisotropik yang direkayasa dari bahan-bahan ini. *Metal foam* memiliki perilaku yang lebih isotropik karena strukturnya yang lebih irasional (Neu et al., 2020)

Aluminium foam adalah salah satu *metal foam* yang paling sering dijumpai. Dimana 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 (Mahadev et al., 2018).

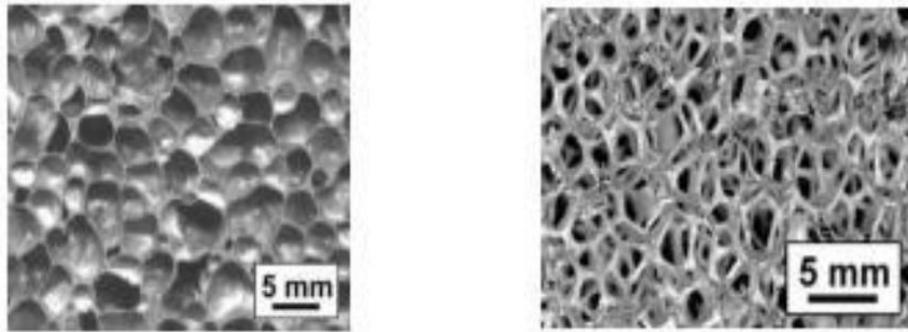
Aluminium foam material memiliki sifat dengan daya serap energi yang tinggi dengan berat jenis yang rendah, sehingga material ini telah diterapkan dalam industri otomotif (akustik dan peredam getaran), industri kedirgantaraan sebagai komponen struktural pada turbin, dalam industri angkatan laut sebagai peredam getaran frekuensi rendah, dan di industri konstruksi sebagai hambatan suara dalam 12 terowongan dan sebagai bahan pelindung kebakaran dan juga sistem perlindungan struktur terhadap ledakan (Firstyawaty, 2021). Berikut ini merupakan karakteristik *aluminium foam*.

Tabel 1. Karakteristik *aluminium foam*.

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	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: Firstyawaty (2021)

Foam dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan bentuk dari rongganya, yaitu *Foam* rongga tertutup dan *Foam* rongga terbuka. Perbedaan antara rongga tertutup dan rongga terbuka dapat terlihat dengan jelas pada pori-porinya. *Foam* dengan rongga terbuka memungkinkan terjadinya aliran berupa cairan atau gas untuk pengaplikasian yang berbeda mulai dari penyaringan hingga pertukaran panas. Pada rongga tertutup memiliki konfigurasi yang optimal untuk penyerapan energi dan diaplikasikan pada struktural seperti di bumper mobil, jembatan dan bangunan. Media cair tidak dapat melewati *foam* dengan rongga tertutup sehingga dapat di aplikasikan pada konstruksi karena kekakuan yang tinggi dengan kepadatan rendah (Dawood, 2010).



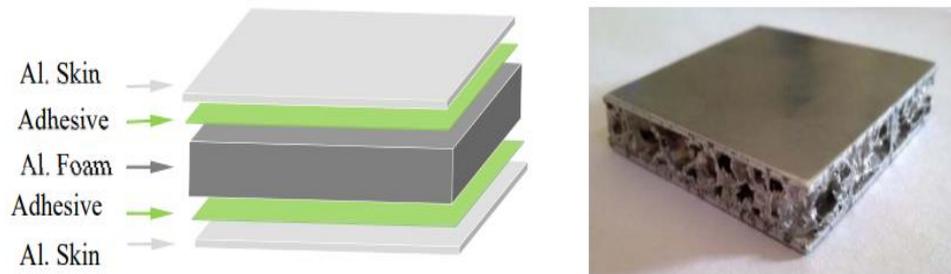
Gambar 1. *Foam* rongga tertutup dan *foam* rongga terbuka.
Sumber: Firstyawaty (2021)

Aluminium foam sering digunakan sebagai bahan pengisi dalam struktur ringan yang akan mengalami benturan dan impak pada kecepatan tinggi atau sebagai alat isolasi termal atau akustik. *Foam* rongga tertutup, khususnya pada *foam aluminium alloy*, menunjukkan tegangan yang konstan dimana dapat menyerap energi yang memiliki tingkat lebih tinggi daripada Aluminium padat. (Degischer et al., 2002). Sektor industri kini banyak memanfaatkan logam busa ini karena kebutuhan, didukung oleh beberapa faktor seperti ketersediaan biaya manufaktur dan kondisi lingkungan yang sesuai. Diperkirakan bahwa di masa depan akan terjadi krisis bahan bakar, sehingga berbagai industri yang memproduksi kendaraan penumpang sedang mengembangkan inovasi untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar, tanpa mengabaikan keselamatan penumpang. Salah satu tren saat ini adalah penggunaan material konstruksi yang sangat ringan, dengan fokus pada pemanfaatan logam busa. (Firstyawaty, 2021).

2.1.1 Sandwich Aluminium Foam

Sandwich aluminium foam adalah produk yang terdiri dari inti busa padat tinggi dari paduan aluminium dan dua lembaran pelat paduan aluminium. Lapisan-lapisan ini melekat erat satu sama lain melalui ikatan logam. Penggunaan panel sandwich seperti ini telah diusulkan untuk banyak sektor industri termasuk otomotif, pembuatan kapal, kereta api, dan industri pesawat terbang. Panel sandwich dibandingkan dengan material padat atau busa tanpa lapisan memiliki berbagai keunggulan. Mereka lebih kaku dibandingkan dengan lembaran padat dengan massa yang sama. Dibandingkan dengan busa tanpa lapisan, keuntungan utamanya adalah bahwa kulit luar memungkinkan sandwich menahan beban tarik

yang terjadi, misalnya, ketika panel dibengkokkan. Dibandingkan dengan busa logam tanpa lapisan, busa aluminium sendiri memiliki kinerja buruk dalam tegangan dan panel cepat retak di sisi luar (Banhart, 2012)



Gambar 2. Struktur *sandwich aluminium foam*.
Sumber: Sadek (2016)

Berbagai teknologi telah diajukan untuk membuat suatu panel sandwich dengan menggabungkan *aluminium foam* dan dua lembar logam dengan menggunakan ikatan perekat (*adhesive bonding*). Perekat berguna untuk pengguna menambah kapasitas redaman yang tinggi dan juga dapat memotivasi untuk penggunaan jenis ikatan alternatif selain dari *adhesive bonding* tersebut. Disamping itu juga perlu memperhatikan jenis perekat yang digunakan karena dapat mempengaruhi kekakuan, massa dan juga biaya dari panel sandwich. Material komposit tiga lapis yang terdiri dari *aluminium-alloy foam* (mengandung TiH₂ sebagai bahan peniup) yang berfungsi sebagai lapisan inti (*core*) dan dua lembar *face sheets* pada kedua sisinya (umumnya paduan aluminium, namun baja dan titanium juga telah digunakan) (Banhart, 2008).

2.2 Aluminium

Aluminium merupakan sebuah logam yang bijih utamanya berasal dari bauksit, unsur ini tidak ditemukan secara bebas di sekitar kita. Secara umum, penggunaan aluminium melibatkan aplikasi sehari-hari seperti dalam konstruksi transportasi, pembuatan kabel, dan sebagai bahan dalam produk rumah tangga. Hans Christian O adalah orang pertama yang menemukan aluminium pada tahun 1825, dan penemuan tersebut diakui oleh F. Wohler pada tahun 1827 (Surdia dan Saito, 1992).

Aluminium merupakan logam berjenis *non-ferrous* yang ringan dan memiliki ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat lainnya. Pada umumnya, aluminium dicampur dengan logam lainnya sehingga membentuk material berupa aluminium paduan. Material ini bukan hanya dimanfaatkan untuk peralatan rumah tangga, tetapi juga dipakai untuk keperluan industri, konstruksi, dan lain sebagainya (Suryo, 2018).

Tabel 2. Sifat-sifat fisik aluminium

Sifat-Sifat	Kemurnian Aluminium (%)	
	99,996	>99,0
Massa jenis (20° C)	2,6968	2,71
Titik cair	660,2	653-657
Panas jenis (cal/g . °C) (100° C)	0,2226	0,229
Tahanan listrik (%)	64,94	59
Hantaran listrik koefisien temperature ($^{\circ}C$)	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 kX	<i>fcc</i> ,a=4,04 Kx

Sumber: Setyaji (2012)

Tabel 3. Sifat mekanik aluminium

Sifat-sifat	Kemurnian Aluminium (%)			
	99,996		>99.0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm ²)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekutan 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: Setyaji (2012)

Tabel 2 menunjukkan sifat-sifat fisik Aluminium dan Tabel 3 menunjukkan sifat-sifat mekaniknya. Ketahanan terhadap korosi berubah berdasarkan kemurnian, pada umumnya untuk kemurnian <99,0 % yang dipergunakan di udara dapat bertahan hingga bertahun-tahun. Hantaran listrik

pada Al, sekitar 65 % dari hantaran listrik tembaga, tetapi massa jenisnya kira-kira sepertiganya sehingga penampangnya memungkinkan untuk diperluas. Oleh karena itu dapat dipergunakan untuk kabel tenaga dan dalam berbagai bentuk umpamanya sebagai lembaran tipis (*foil*). Dalam hal ini dipergunakan Al dengan kemurnian 99,0%. Untuk reflektor yang memerlukan reflektifitas yang tinggi juga untuk kondensor elektronik dipergunakan aluminium dengan kemurnian 99,99% (Setyaji, 2012).

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 dipergunakan. 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 et al., 2010).

Aluminium jenis *alloy* yang terdiri dari paduan utama unsur berupa Si dan Mg pada perbandingan tertentu akan terbentuk magnesium silica. Hasil paduan aluminium ini mampu untuk dilakukan proses heat treatment, tetapi ketangguhan akan berkurang jika dibandingkan dengan paduan Aluminium Cu dan Zn. Silikon memiliki sifat yang getas dan dapat dengan mudah mengalami kegagalan berupa retak, seperti *fatigue* yang terjadi didalam *Alloy* Al-Si terutama dengan pengintian dan pertumbuhan retakan secara halus atau biasa disebut *microcrack* pada sekeliling fasa magnesium atau di dalam matriks aluminium. Namun, hal ini tidak menjadikan aluminium paduan dapat ditempa menggunakan media panas dengan mudah karena korosi akan terjadi pada suhu di atas 60°C (Kurniawan, 2016).

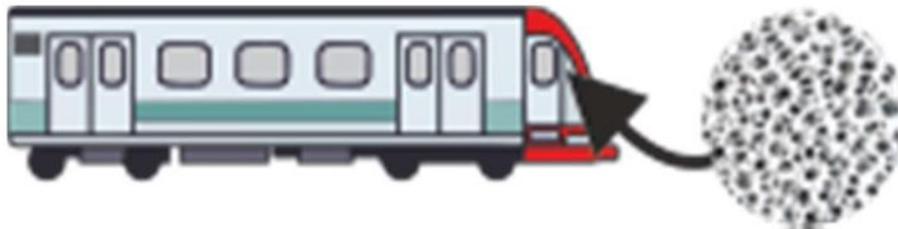
2.3 Aplikasi *Sandwich Aluminium Foam*

Sandwich aluminium foam dapat diterapkan di beberapa industri seperti industri kereta api dan industri otomotif dengan tujuan untuk memenuhi kebutuhan material yang ringan tetapi kuat dan meningkatkan keselamatan penumpang.

2.3.1 Industri Kereta Api

Industri kereta api memegang peranan penting dalam gagasan mobilitas masa depan. Sejumlah prototipe menjanjikan telah muncul dalam beberapa tahun terakhir sebagai kemungkinan implementasi reguler di masa mendatang. Panel *sandwich aluminium foam* dari IWU (Chemnitz, Jerman) telah digunakan di lantai kereta metro di Beijing sejak tahun 2008 tanpa masalah berkelanjutan. Salah satu keuntungan yang mereka miliki, bersama dengan aplikasi lainnya, adalah sifat yang tidak menyerap kelembaban dan sifat akustik yang mirip dengan kayu (Banhart, 2017).

Penggunaan material aluminium foam pada kereta api seperti pada Gambar 3 dapat memberikan keuntungan karena berupa terpenuhinya kebutuhan akan bahan yang ringan tetapi kuat sehingga daya angkut dapat ditingkatkan. *Foam* dimaksudkan untuk mengoptimalkan penyerapan energi pada saat terjadi tabrakan (Musyafriadi, 2021).

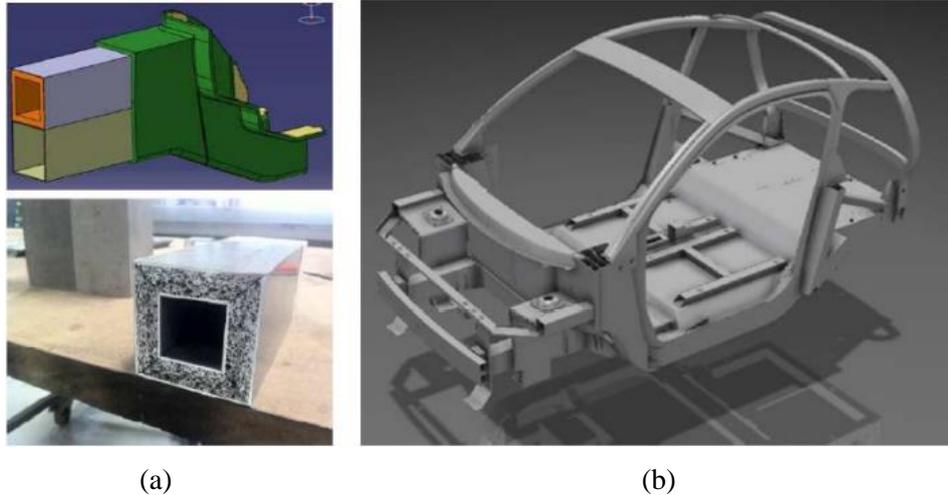


Gambar 3. Aplikasi *aluminium foam* pada industri kereta api
Sumber: Musyafriadi (2021)

2.3.2 Industri Otomotif

Keselamatan penumpang adalah faktor penting lainnya, di mana sistem perlindungan tabrakan yang ringan dengan sangat efektif sangat diperlukan karena ruang tabrakan yang tersedia berkurang akibat sudah tidak adanya mesin depan tradisional. Contohnya ditunjukkan pada Gambar 4. Bagian *metal foam* yang

dikembangkan oleh Technical University Berlin dan Pohltec Metalfoam dikembangkan dalam bentuk prototipe kendaraan listrik *ultra* ringan (Banhart et al., 2017).



Gambar 4. (a) *Prototype Crash absorber box* menggunakan *aluminium foam*.
 (b) *Design CAD* penggunaan *aluminium foam* pada mobil
 Sumber: Banhart et al. (2017)

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/mm²)

F = Gaya yang bekerja (N)

A= Luas Penampang (mm²)

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 luluh.

Regangan juga dapat di artikan sebagai kondisi material yang mengalami deformasi. Regangan dapat di notasikan dengan persamaan berikut ini.

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

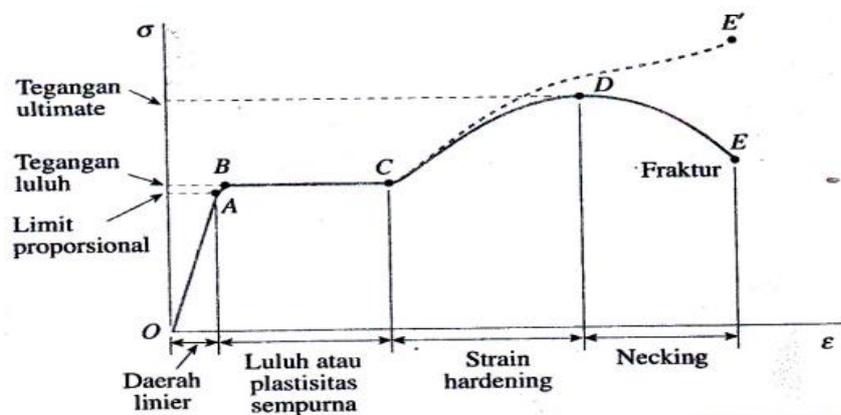
dimana,

ε = Regangan

l = Panjang mula mula benda (mm)

δ = Pertambahan panjang benda (mm)

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



Gambar 5. 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 pertambahan 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 pertambahan beban. Setelah mengalami regangan besar yang terjadi selama peluluhan di daerah

BC, spesimen mulai mengalami pengerasan regang atau biasa disebut *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 *ultimate*. Penarikan batang lebih lanjut akan disertai dengan pengurangan beban dan akhirnya terjadi putus/patah di suatu titik yaitu pada titik E (Mulyati, 2019).

2.5 Uji *Bending*

Uji *bending* adalah suatu proses pengujian material dengan cara di tekan pada titik-titik tertentu untuk mendapatkan hasil berupa data tentang kekuatan lengkung (*bending*) dari material yang di uji. Alat uji *bending* berfungsi sebagai alat yang memberikan gaya tekan pada benda uji pada saat melakukan pengujian. Alat penekan harus memiliki kekuatan lebih besar dari benda yang di uji (ditekan). *Point bending* berfungsi sebagai tumpuan benda uji dan juga sebagai penerus gaya tekan yang dikeluarkan oleh alat tekan. Panjang-pendek tumpuan *point bending* dapat berpengaruh terhadap hasil pengujian. Proses pengujian *bending* memiliki 2 jenis pengujian, yaitu *three-point bending* dan *four-point bending* (Ainulmakhrus, 2015).

Sabuin et al. (2015) mengungkapkan bahwa kuat lentur atau sering disebut sebagai kekuatan *bending* adalah tegangan maksimal yang dapat ditangani oleh suatu material saat terkena beban luar tanpa mengalami deformasi yang signifikan atau kegagalan. Kekuatan *bending* di permukaan atas material setara dengan kekuatan *bending* di permukaan bawahnya. Menurut Naufal et al. (2016), pengujian *bending* dilakukan pada sebuah bahan untuk mengevaluasi sifat-sifat ulet (*ductility*) dan getas secara keseluruhan.

2.5.1 *Three-Point Bending*

Three-point bending adalah metode pengujian yang menggunakan dua tumpuan dan satu penekan. Pada bagian bawah terdapat dua tumpuan (*point*) dan satu tumpuan nya terletak pada bagian atas yang berfungsi sebagai penekan. *Three-point bending* dapat di notasikan dengan persamaan berikut.

$$\sigma_{TPB} = \frac{P_1 L_1}{2t(d+c)b} \quad (3)$$

$$D_{TPB} = \frac{E(d^3 - c^3)b}{12} \quad (4)$$

dimana,

σ_{TPB} = Tegangan *three-point bending* permukaan *sandwich* (MPa)

D_{TPB} = Kekakuan *three-point bending* panel (N-mm²)

P_1 = Beban pada *three-point bending* (N)

L_1 = Jarak antar *support point* pada *three-point bending* (mm)

t = Tebal *skin* (mm)

d = Tebal *sandwich* (mm)

c = Tebal *core* (mm)

b = Lebar *sandwich* (mm)

2.5.2 *Four-Point Bending*

Four-point bending merupakan suatu metode pengujian yang menggunakan dua tumpuan dan dua penekan. Pada bagian bawah terdapat dua *point* yang berfungsi sebagai tumpuan dan dua *point* penekan pada bagian atas yang berfungsi sebagai penekan. *Four-point bending* dapat di notasikan dengan persamaan berikut.

$$\sigma_{FPB} = \frac{P_2 L_2}{4t(d+c)b} \quad (5)$$

$$D_{FPB} = \frac{P_1 L_1^3 [1 - (11L_2^2 / 8L_1^2)]}{48\Delta_1 [1 - (2P_1 L_1 \Delta_2 / P_2 L_2 \Delta_1)]} \quad (6)$$

dimana,

σ_{FPB} = Tegangan *four-point bending* permukaan *sandwich* (MPa)

D_{FPB} = Kekakuan *four-point bending* panel (N-mm²)

P_2 = Beban pada *four-point bending* (N)

L_2 = Jarak antar *support point* pada *four-point bending* (mm)

Δ_1 = Defleksi pada *three-point bending* (mm)

Δ_2 = Defleksi pada *four-point bending* (mm)

Tabel 4. Kelebihan dan kekurangan metode uji *three-point bending* dan *four-point bending*

<i>Three-point Bending</i>	<i>Four-point Bending</i>
Kelebihan	
1. Kemudahan persiapan spesimen dan pengujian	1. Penggunaan rumus perhitungan lebih mudah
2. Pembuatan point lebih mudah	2. Lebih akurat hasil pengujiannya
Kekurangan	
1. Kesulitan menentukan titik tengah persis, karena jika posisi tidak di tengah persis penggunaan rumus berubah	1. Pembuatan point lebih rumit
2. 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>Two-point</i> atas harus bersamaan menekan benda uji. Jika salah satu point lebih dulu menekan benda uji maka terjadi <i>three point bending</i> , sehingga rumus yang digunakan berbeda

Sumber: Ainulmakhrus (2015)

2.6 Metode Elemen Hingga

Menurut Susatio (2004), metode elemen hingga adalah suatu teknik numerik yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan masalah matematis. Terdapat dua kategori utama masalah teknis dan matematis yang dapat dipecahkan menggunakan metode elemen hingga, yaitu kelompok analisis struktur dan kelompok masalah non-struktur. Masalah analisis struktur mencakup

analisis tegangan, *buckling*, dan analisis getaran, sementara masalah non-struktur mencakup perpindahan panas dan massa, mekanika fluida, serta distribusi potensial listrik. Purba et al. (2012) menyatakan bahwa ketika berkaitan dengan geometri yang kompleks pada struktur yang rumit, seringkali sulit untuk memecahkan masalah tersebut menggunakan metode analisis matematika konvensional. Metode elemen hingga, menurut formulasi mereka, dapat digunakan untuk menangani kendala semacam ini. Saat beban diterapkan pada balok, hal ini akan menyebabkan lendutan, dan masalah ini dapat dianalisis dan dipecahkan menggunakan pendekatan elemen hingga. Konsep dasar dari metode elemen hingga, menurut Bargess et al. (2009), adalah prinsip diskritisasi, yang melibatkan pembagian sesuatu menjadi bentuk yang lebih kecil dan penggabungan keseluruhan untuk secara menyeluruh memodelkan situasi tersebut.

Menurut Katili (2008), struktur diskrit terbentuk melalui kombinasi elemen yang dimaksudkan untuk mencerminkan perilaku struktur kontinu. Setiap elemen tersebut memiliki perilaku yang dijelaskan melalui fungsi pendekatan yang merepresentasikan transisi dan tegangan, yang pada akhirnya dapat diekspresikan dalam bentuk persamaan matriks.

Discretization, adalah langkah dalam pemodelan suatu objek dengan membaginya menjadi elemen-elemen kecil (*finite element*) yang dihubungkan melalui titik-titik (*nodes*) yang berfungsi sebagai koneksi dan juga sebagai batasan bagi objek tersebut. Dalam metode elemen hingga, persamaan sistem secara keseluruhan kemudian disusun dengan menggabungkan persamaan dari elemen-elemen tersebut. Sebagai contoh, dalam penyelesaian masalah struktural, hasil dari analisis digunakan untuk menghitung deformasi (*displacement*) pada setiap titik (*nodes*) pada objek, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Untuk masalah yang bukan struktur, pendekatan serupa diterapkan (etsworlds.id, 2018).

Menurut Susatio (2004), terdapat beberapa kelebihan dalam penerapan metode elemen hingga, diantaranya:

1. Kemampuan untuk menganalisis dengan mudah benda yang memiliki bentuk yang tidak teratur.

2. Tidak adanya kesulitan dalam menganalisis beban pada struktur tertentu.
3. Pemodelan objek dengan komposisi materi yang berbeda dapat dilakukan dengan mudah karena setiap elemen dapat ditinjau secara individu.
4. Kemampuan untuk menangani berbagai jenis syarat batas dalam jumlah yang tidak terbatas.
5. Adanya variasi dalam ukuran elemen memungkinkan untuk mendapatkan analisis detail sesuai kebutuhan.

2.7 Tegangan Von Mises

Teori von Mises membantu kita memahami kapan bahan bisa rusak. Konsep ini diciptakan oleh Huber pada tahun 1904 dan diperbaiki oleh von Mises serta Hencky. Teori tersebut menjelaskan bahwa suatu bahan akan rusak ketika kita memberikan tekanan dari banyak arah sekaligus. Persamaan von Mises yang dihasilkan mengindikasikan bahwa kegagalan tergantung pada hubungan antara tegangan utama. Jadi, teori ini membantu kita memahami dan mencegah kerusakan pada bahan saat dikenakan tekanan dari berbagai arah.

$$\sigma_v = \sqrt{\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] + 6 \left[\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 \right]} \quad (7)$$

Tegangan von Mises menunjukkan kemampuan bahan menyerap energi distorsi akibat tegangan normal dan geser dari tiga arah tegangan utama. Dalam teori kegagalan von Mises, jika nilai tegangan von Mises lebih besar atau sama dengan kekuatan luluh (S_y) bahan, itu berarti bahan tersebut memiliki kekuatan struktural yang baik (Iremonger, 1990).

2.8 Software Abaqus CAE

Software Abaqus merupakan aplikasi perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan analisis metode elemen hingga atau *Finite Element Analysis* (FEA). Perangkat lunak ini dapat melakukan program simulasi linear mulai dari yang paling sederhana sampai dengan analisis non-linear yang cukup kompleks dan rumit. Dalam *software* ini kita dapat menentukan berbagai kondisi yang dialami oleh material maupun indenter sehingga nantinya reaksi yang dihasilkan dari

simulasi permodelan yang telah dibuat tersebut sesuai dengan reaksi yang terjadi pada keadaan aslinya (Fauzan, 2022).

Terdapat beberapa perangkat lunak yang umumnya berada di pasaran saat ini digunakan untuk simulasi dinamis pada kendaraan. Abaqus adalah salah satu dari beberapa perangkat lunak besar dengan kode FE (*Finite Element*) yang berada di pasaran saat ini untuk memecahkan berbagai masalah dalam *multiphysics*, baik itu berupa cairan (fluida), termal, mekanik, kopling listrik dan sebagainya (Ukhrawi, 2021). Dassault menjelaskan, terdapat empat rangkaian produk inti dari Abaqus yaitu:

1. Abaqus / *Standard* adalah pemecah tujuan umum yang menggunakan skema integrasi mutlak (tradisional) untuk menyelesaikan analisis elemen hingga.
2. Abaqus / Eksplisit, menggunakan skema integrasi eksplisit untuk menyelesaikan analisis dinamis transien nonlinier yang sangat tinggi.
3. Abaqus / CAE, menyediakan lingkungan pemodelan terpadu (preprocessing) dan visualisasi (pasca-pemrosesan) untuk produk analisis.
4. Abaqus / *Multiphysics*, menyediakan kemampuan yang signifikan dalam menganalisis dan memecahkan masalah-masalah multifisika.

2.8.1 Tahapan-Tahapan Menjalankan Program Abaqus

Dalam Abaqus “*Getting Started with Abaqus, Interactive Edition*”, dijelaskan bahwa untuk menganalisis sampai selesai dengan program Abaqus biasanya melalui tiga tahap yang berbeda yaitu proses awal, simulasi dan proses akhir.

1. Proses Awal (*Preprocessing*)

Pada bagian ini kita mulai menentukan model awal yang akan dianalisis. Pemodelan part dilakukan dalam *software* Abaqus dengan memasukkan geometri yang telah kita ketahui sebelumnya. Dalam menggambarkan model, kita bisa menentukan koordinat sistem yang akan dibuat. Sebelum dilakukan simulasi kita perlu memeriksa semua *keyword* dan parameter yang digunakan sehingga tidak terjadi kesalahan. Selain itu urutan dalam memasukkan data harus kita perhatikan dengan benar.

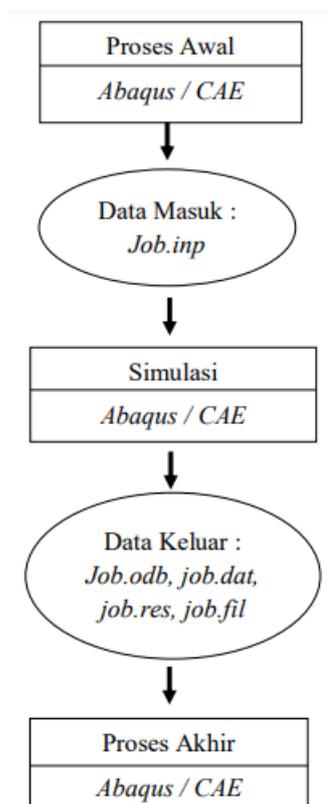
2. Simulasi (*Simulation*)

Simulasi yang biasanya dijalankan sebagai pengantar proses adalah tahap dimana program Abaqus memulai proses untuk memecahkan masalah numerik yang diidentifikasi dalam model. Sebagai contoh, keluaran dari *stress* analisis termasuk perpindahan dan tekanan yang disimpan dalam berkas biner untuk proses akhir.

3. Proses Akhir (*Post Processing*)

Pada proses akhir kita dapat mengambil kesimpulan dari hasil simulasi yang sudah selesai pada perpindahan, gaya atau variable lainnya yang sudah dilakukan perhitungan. Hasil akhir biasanya dibuat dalam suatu laporan atau sebuah catatan.

Kemudian dari ketiga tahap tersebut dihubungkan sehingga menjadi seperti Gambar 6.



Gambar 6. Tahapan menjalankan program Abaqus
Sumber: Fauzan (2022)

2.8.2 Komponen pada Windows Utama Abaqus

1. *Title Bar*

Title bar menunjukkan versi Abaqus yang sedang kita gunakan dan juga menunjukkan judul dari file yang kita buat atau kita gunakan.

2. *Menu Bar*

Menu bar berisi semua menu yang tersedia, menu ini memberikan akses ke semua fungsi dalam produk.

3. *Toolbars*

Tools ini memberikan akses cepat yang tersedia pada *menu*.

4. *Context Bar*

Dalam *context bar* memungkinkan kita untuk berpindah antar modul serta mengambil bagian yang sudah ada ketika membuat geometri model.

5. *Model Tree / Result Tree*

Model Tree menyediakan grafik sebagai Review dari model objek dari masing-masing bagian, material, langkah, pembebanan. *Results Tree* memberikan grafik dari output *database* dan spesifik data hasil plot x-y.

6. *Toolbox Area*

Memungkinkan akses cepat ke banyak fungsi modul yang tersedia.

7. *Canvas dan Drawing Area*

Merupakan tempat atau lokasi untuk area gambar.

8. *Viewport*

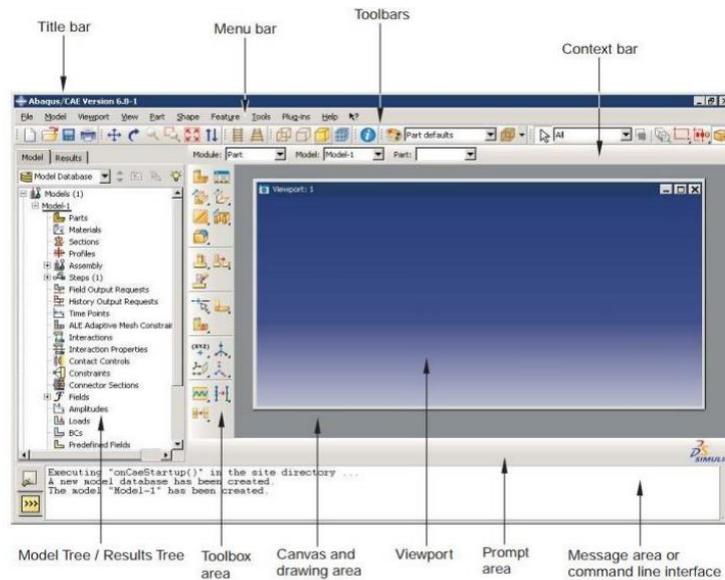
Merupakan jendela pada area gambar di mana Abaqus menampilkan model yang telah dibuat.

9. *Prompt Area*

Berfungsi untuk menampilkan petunjuk atau panduan yang telah kita lakukan pada *software* Abaqus.

10. Message Area or Command Line Interface

Pada bagian ini Abaqus akan memunculkan informasi dan peringatan yang terjadi ketika ada informasi atau kesalahan.



Gambar 7. Komponen pada windows utama program Abaqus
Sumber: Ukhrawi (2021)