

SKRIPSI

**ANALISIS PENYERAPAN ENERGI *ABSORBER MODULE*
TERHADAP *FRONTAL CRASH* DENGAN MATERIAL
ALUMINIUM *FOAM* MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

OLEH:

MUH. HISHAM MULSY

D211 15 512



DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

SKRIPSI

**ANALISIS PENYERAPAN ENERGI *ABSORBER MODULE*
TERHADAP *FRONTAL CRASH* DENGAN MATERIAL
ALUMINIUM *FOAM* MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

Disusun dan diajukan oleh:

MUH. HISHAM MULSY

D211 15 512

Merupakan Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti ujian akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Pada tanggal 1 Maret 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

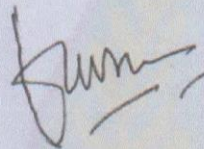
JUDUL:

ANALISIS PENYERAPAN ENERGI *ABSORBER MODULE* TERHADAP *FRONTAL CRASH* DENGAN MATERIAL ALUMINIUM FOAM MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

MUH. HISHAM MULSY
D211 15 512

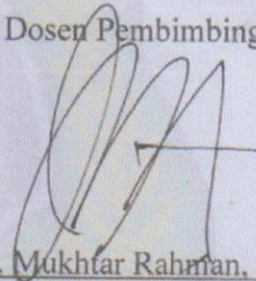
Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I



Fauzan, ST., MT., Ph.D
NIP. 19770103 200801 1 009

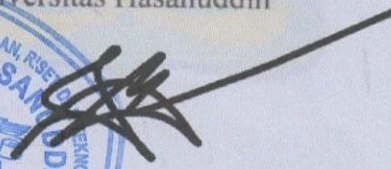
Dosen Pembimbing II



Ir. Mukhtar Rahman, MT.
NIP. 19571013 198703 1 001

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin




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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : MUH. HISHAM MULSY
NIM : D211 15 512
Program Studi : Teknik Mesin
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISIS PENYERAPAN ENERGI ABSORBER MODULE TERHADAP FRONTAL CRASH DENGAN MATERIAL ALUMINIUM FOAM MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

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

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

Gowa, 1 Maret 2022

Yang Menyatakan



MUH. HISHAM MULSY

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : MUH. HISHAM MULSY

Tempat Tanggal Lahir : UJUNG PANDANG, 29 MEI 1997

Alamat : GRIYA FAJAR MAS BLOK D NO.4

Jenis Kelamin : LAKI-LAKI

Agama : ISLAM

Telepon : 0895 3333 59982

E-mail : MUHHISHAMMULSY@GMAIL.COM

Riwayat Pendidikan : SD NEGERI MANNURUKI
SMP ISLAM ATHIRAH BUKIT BARUGA
SMA NEGERI 17 MAKASSAR

Riwayat Organisasi : HMM FT-UH
OKFT-UH

Pengalaman Magang (Internship) : PT INDUSTRI KAPAL INDONESIA

ABSTRAK

Muh. Hisham Mulsy (D21115512), Dibimbing oleh bapak Fauzan, ST.,MT.,Ph.D dan bapak Ir.Mukhtar Rahman, MT . Energi *Absorber module* adalah salah satu sistem keamanan pasif yang merupakan salah satu komponen yang penting pada aplikasi teknologi dengan prinsip *crashworthiness* untuk meningkatkan keamanan dari fasilitas transportasi terutama pada struktur kereta. Mekanisme efektif untuk menyerap energi tumbukan adalah melalui deformasi dari struktur modul.

Penelitian kali ini, adalah dengan mendesain struktur modul peredam energi menggunakan material aluminium foam sebagai pengisi dari silinder aluminium modul. Model peredam energi dibuat dengan 3 model yang berbeda yaitu *Single Wall*, *Single Wall foam filled* dan *double wall foam filled*. Pada model *double wall foam filled* divariasikan pada 10 model yang berbeda dengan perbedaan pada diameter dalam aluminium.. Modul absorber didesain dan dilakukan pengujian tabrakan dengan kecepatan 36 km/jam, 56 km/jam dan 76 km/jam. *Energy Absorption (EA)* atau penyerapan energy adalah parameter yang digunakan untuk mengetahui kemampuan struktur menyerap energy kinetic akibat tabrakan.

Hasil analisa didapatkan, besar energy kinetik yang dapat diserap struktur mengalami peningkatan signifikan ketika *absorber module* ditambahkan material aluminium foam sebagai pengisi silinder modul, nilai EA tertinggi berkisar pada 62-64 kJ. Sedangkan *absorber module* yang tidak menggunakan aluminium foam memiliki besar EA pada nilai 30.74 kJ. Modul yang memiliki nilai EA yang tertinggi adalah pada model DWFF-6 dengan diameter silinder 110 mm dan diameter dalam 46 mm. sedangkan module yang memiliki EA terendah adalah pada module *Single Wall* dengan diameter silinder 110 mm.

Kata kunci : *System Keamanan Pasif , Module Absorber , Crashworthiness , Aluminium Foam, Energy Absorption (EA)*

ABSTRACT

Muh. Hisham Mulsy (D2115512), Supervised by Mr. Fauzan, ST.,MT.,Ph.D and Mr. Ir.Mukhtar Rahman, MT. The Energy *Absorber module* is a passive safety system which is an important component in the application of technology with the principle of crashworthiness to improve the safety of transportation facilities, especially on train structures. The effective mechanism for absorbing impact energy is through deformation of the module structure.

This research is to design the structure of the energy *absorber module* using aluminum foam material as a filler from the aluminum module cylinder. The energy absorber model is made with 3 different models, namely single wall, single wall foam filled and *double wall foam filled*. In the *double wall foam filled* model, 10 different models differed in the aluminum inner diameter. The *absorber module* was designed and tested for collisions at speeds of 36 km/hour, 56 km/hour and 76 km/hour. *Energy Absorption* (EA) is a parameter used to determine the ability of a structure to absorb kinetic energy due to collisions.

The results of the analysis show that the amount of kinetic energy that can be absorbed by the structure has increased significantly when the *absorber module* is added with aluminum foam material as a filler for the module cylinder, the highest EA value is in the range of 62-64 kJ. While the *absorber module* that does not use aluminum foam has a large EA value of 30.74 kJ. The module that has the highest EA value is the DWFF-6 model with a cylinder diameter of 110 mm and an inner diameter of 46 mm. while the module that has the lowest EA is the single wall module with a cylinder diameter of 110 mm.

Keywords: *Passive Safety System, Absorber module, Crashworthiness, Aluminum Foam, Energy Absorption (EA).*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta Salam dan shalawat kepada Nabi Muhammad SAW sosok manusia terbaik yg membawa manusia ke zaman yang aman dan tentram saat sekarang ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“ANALISIS PENYERAPAN ENERGI ABSORBER MODULE TERHADAP FRONTAL CRASH DENGAN MATERIAL ALUMINIUM FOAM MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA”**. Dengan pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis bisa belajar lebih banyak untuk memperdalam dan meningkatkan apa segala ilmu yang telah didapatkan penulis selama menempuh perkuliahan kampus perjuangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin jurusan S1 Teknik Mesin. Dengan Tugas Akhir ini penulis juga dapat menghasilkan suatu implementasi dari apa yang telah penulis pelajari.

Selesainya Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan beberapa pihak. Sehingga pada kesempatan ini penulis mengucapkan syukur dan terima kasih kepada:

1. Allah SWT dan Nabi Muhammad SAW.
2. Mama penulis, Mulia Masyita yang senantiasa mendoakan penulis setiap harinya, untuk kelancaran dan kesuksesan penulis, terimakasih banyak Mom.
3. Ayah penulis, Alm. Syahid yang telah membesarkan, menyayangi, mensupport kegiatan pendidikan putra-putranya baik moral maupun material, terimakasih Dad.
4. Kakak penulis, Hizbullah Mulsy, ST. & Sibghatullah Mulsy, ST. yang telah mensupport kegiatan pendidikan dan memberikan nasihat kepada penulis.
5. Adik penulis, Ausa Farhan Mulsy & Aulia Mufidah Mulsy yang selalu mendukung dan membantu penulis dan menjadi penyemangat penulis.
6. Seluruh keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan, motivasi, nasihat, dan do'a kepada penulis.
7. Bapak Dr. Eng. Jalaluddin, ST, MT, selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Bapak Fauzan, ST., MT.,Ph.D selaku pembimbing yang telah membantu, membimbing, dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini hingga selesai.
9. Bapak Ir. Mukhtar Rahman, MT. selaku pembimbing kedua yang telah membantu, membimbing, dan meluangkan waktunya kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini hingga selesai.
10. Bapak Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman., MT, selaku dosen penguji yang memberi masukan dan motifasi untuk menjadi penulis sebagai sosok yang lebih baik lagi.

11. Dr. Ir. Zulkifli Djafar, MT ,selaku dosen penguji yang memberi masukan dan motifasi untuk menjadi penulis sebagai sosok yang lebih baik lagi.
12. Dan segenap dosen serta staff Departemen Teknik Mesin yang telah memberikan ilmunya.
13. Akbar ali, Siddiq Prawira, Bolang, Agung, Wahyudi, Al-Ashry, Muhammad Nur, Dirwandi, Jajab, Sarman, Wahyu sebagai partner tugas akhir penulis yang berjuang bersama untuk menyelesaikan tugas akhir.
14. Teman-teman seperjuangan, HYDRAULIC'15 yang telah menjadi saudara selama di bangku perkuliahan.
15. Teman-teman KKN PPM-DIKTI Pulau Kodingareng yang telah memberikan cerita baru di kehidupan peneliti.
16. Kepada seluruh saudara – saudari serta kanda kanda senior di OKFT-UH terkhusus HMM FT-UH yang telah menjadi tempat belajar dan mecoba banyak hal di kampus tercinta.
17. Lab. Getaran Mekanik Teknik Mesin, Lab. Robotik & kontrol yang mengizinkan penulis untuk dapat menggunakan fasilitasnya dalam pengerjaan tugas akhir ini.
18. Serta semua pihak yang yang telah turut membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Sehingga dengan kerendahan hati, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan ke depannya.

Gowa, 1 Maret 2022

Penulis,

Muh. Hisham Mulsy

DAFTAR ISI

SKRIPSI	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	iv
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II.....	6
TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Energy Absorber module</i>	6
2.1.1 Penelitian Terdahulu	7
2.2 Crashworthiness.....	10
2.3 Aluminium Foam	11
2.4 Metode Elemen Hingga.....	16
2.4.1 Istilah Dalam Metode Elemen Hingga.....	20
2.4.2 Software metode elemen hingga.....	23
2.4.3 Tahapan Menjalankan Program Metode Elemen Hingga	24
2.4.4 Komponen pada Windows Utama Abaqus CAE	26
BAB III.....	28
METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1 Prosedur Penelitian.....	28

3.2	Diagram Alir Penelitian	29
3.3	Mekanisme Pengujian	30
3.4	Diagram Alir Permodelan	31
3.5	Tahap permodelan metode elemen hingga	32
BAB IV.....		44
HASIL DAN PEMBAHASAN.....		44
4.1	ANALISIS HASIL SIMULASI	44
4.1.1	Single wall (SW)	44
4.1.2	Single Wall Foam Filled (SWFF).....	48
4.1.3	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 1.....	51
4.1.4	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 2.....	54
4.1.5	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 3.....	57
4.1.6	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 4.....	60
4.1.7	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 5.....	63
4.1.8	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 6.....	66
4.1.9	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 7.....	69
4.1.10	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 8.....	72
4.1.11	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 9.....	75
4.1.12	<i>Double wall foam filled</i> (DWFF) 10.....	78
4.2	Hasil Simulasi Setiap Model	82
4.1.1	<i>Energy Absorption</i> semua model pada kecepatan 10 m/s	82
4.1.2	Deformasi semua model pada kecepatan 10 m/s	84
4.1.3	<i>Energy Absorption</i> semua model pada kecepatan 15.6 m/s	85
4.1.4	Deformasi semua model pada kecepatan 15.6 m/s	87
4.1.5	<i>Energy Absorption</i> semua model pada kecepatan 21.1 m/s	88
4.1.6	Deformasi semua model pada kecepatan 21.1 m/s	90
KESIMPULAN.....		91
5.1	Kesimpulan	91
5.1	Saran	91
DAFTAR PUSTAKA		92
LAMPIRAN		95
Lampiran A. Hasil Pengolahan Data.....		95
Lampiran B. Rata-rata Energi Absorption Setiap Model.....		107

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1: Tabel Dimensi Penelitian Sebelumnya.....	8
Tabel 2. 2: Karakteristik aluminium foam.....	12
Tabel 3. 1: Geometris secara rinci.....	33
Tabel 3. 2: Ukuran single walled (SW)	35
Tabel 3. 3: Ukuran Single-walled foam-filled (SWFF).....	35
Tabel 4. 1: Deformasi yang terjadi pada model <i>Single Wall</i> setelah dilakukan simulasi	45
Tabel 4. 2: Deformasi yang terjadi pada model <i>single wall foam filled</i> setelah dilakukan simulasi.....	49
Tabel 4. 3: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 1</i> setelah dilakukan simulasi.	52
Tabel 4. 4: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 2</i> setelah dilakukan simulasi	55
Tabel 4. 5: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 3</i> setelah dilakukan simulasi	58
Tabel 4. 6: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 4</i> setelah dilakukan simulasi	61
Tabel 4. 7: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 5</i> setelah dilakukan simulasi	64
Tabel 4. 8: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 6</i> setelah dilakukan simulasi	67
Tabel 4. 9: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 7</i> setelah dilakukan simulasi	70
Tabel 4. 10: Deformasi yang terjadi pada model <i>single wall foam filled 8</i> setelah dilakukan simulasi	73
Tabel 4. 11: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 9</i> setelah dilakukan simulasi	76
Tabel 4. 12: Deformasi yang terjadi pada model <i>double wall foam filled 10</i> setelah dilakukan simulasi	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1: Tabrakan antar kereta api di Indonesia	2
Gambar 1. 2: Penggunaan energy <i>absorber module</i> pada struktur kereta	2
Gambar 2. 1: Module Absorber Pembuat Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd.	6
Gambar 2. 2: Spesimen pengujian <i>Single Wall, Single Wall foam filled</i> dan <i>double wall foam filled</i> Penelitian sebelumnya.....	7
Gambar 2. 3: Hasil eksperimen Pengujian Pembebanan quasi-static penelitian sebelumnya	9
Gambar 2. 4: Kurva penyerapan energi, hubungan antara gaya dan deformasi	10
Gambar 2. 5: Foam rongga tertutup dan foam rongga terbuka	13
Gambar 2. 6: Skema Regangan	18
Gambar 2. 7: Diagram Tegangan-Regangan	18
Gambar 2. 8: Tahapan menjalankan program Abaqus CAE.....	25
Gambar 2. 9: Komponen pada windows utama program Abaqus CAE (Sumber: Abaqus handout).....	26
Gambar 3. 1: Skema metode <i>frontal crash</i> yang akan diuji.....	30
Gambar 3. 2: Tampilan pembuatan part aluminium dan aluminium foam pada modul part.....	32
Gambar 3. 3 Tampilan pembuatan part impactor pada modul part	33
Gambar 3. 4: Tampilan Penginputan material aluminium dan aluminium foam pada modul property.....	36
Gambar 3. 5: Tampilan section assignment aluminium.....	37
Gambar 3. 6: Tampilan section assignment aluminium foam.....	37
Gambar 3. 7: Hasil assembly pada modul assembly	38
Gambar 3. 8: Tampilan tipe mesh yang digunakan pada simulasi pada modul mesh	39
Gambar 3. 9: Hasil meshing energy <i>absorber module</i> pada modul mesh	39
Gambar 3. 10: Tampilan (a) Pembuatan step dan (b) Properties interaksi pada modul step.....	40
Gambar 3. 11: Proses pemberian boundary condition (a)lower dan (b) impactor pada modul load	41
Gambar 3. 12: Penginputan kecepatan awal pada impactor pada modul load	42
Gambar 3. 13: Tampilan pemberian job dan pada saat simulasi selesai pada modul job	42
Gambar 3. 14: Tampilan (a) data field output variables dan (b) history output setelah proses simulasi.....	43
Gambar 4. 1: Hubungan force reaction <i>Single Wall</i> dan displacement impactor	44
Gambar 4. 2: Model <i>Single Wall</i> , (a) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	45
Gambar 4. 3: Hubungan penyerapan energy <i>Single Wall</i> dan waktu simulasi	46

Gambar 4. 4: Hubungan force reaction energy <i>absorber module</i> single wall foam filled dan displacement impactor.....	48
Gambar 4. 5: Model double walled foam filled 2, (a) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	49
Gambar 4. 6: Hubungan penyerapan energy single wall foam filled dan waktu simulasi	50
Gambar 4. 7: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 1 dan displacement impactor.....	51
Gambar 4. 8: Model double walled foam filled 1, (a) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	52
Gambar 4. 9: Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 1 dan waktu simulasi	53
Gambar 4. 10: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 2 dan displacement impactor.....	54
Gambar 4. 11: Model double walled foam filled 2, (a) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	55
Gambar 4. 12: Hubungan penyerapan double walled foam filled 2 dan waktu simulasi	56
Gambar 4. 13: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 3 dan displacement impactor.....	57
Gambar 4. 14: Model double alled foam filled 3, (a) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	58
Gambar 4. 15: Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 3 dan waktu simulasi	59
Gambar 4. 16: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 4 dan displacement impactor.....	60
Gambar 4. 17: Model double walled foam filled 4, (a)Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	61
Gambar 4. 18: Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 4 dan waktu simulasi	62
Gambar 4. 19: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 5 dan displacement impactor.....	63
Gambar 4. 20 Model double walled foam filled 5, (a) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah	

terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	64
Gambar 4. 21: Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 5 dan waktu simulasi	65
Gambar 4. 22: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 6 dan displacement impactor	66
Gambar 4. 23: Model double walled foam filled 6, (a) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	67
Gambar 4. 24: Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 6 dan waktu simulasi	68
Gambar 4. 25: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 7 dan displacement impactor	69
Gambar 4. 26: Model double walled foam filled 7, (a)Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	70
Gambar 4. 27: Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 7 dan waktu simulasi	71
Gambar 4. 28: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 8 dan displacement impactor	72
Gambar 4. 29: Model double walled foam filled 8, (a) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b)Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	73
Gambar 4. 30: Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 8 dan waktu simulasi	74
Gambar 4. 31: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 9 dan displacement impactor	75
Gambar 4. 32: Model double walled foam filled 9, (a) energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	76
Gambar 4. 33: Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 9 dan waktu simulasi	77
Gambar 4. 34: Hubungan force reaction energy <i>absorber module double wall foam filled</i> 10 dan displacement impactor	78
Gambar 4. 35: Model double walled foam filled 10, (a) energy <i>absorber module</i> sebelum terjadi <i>frontal crash</i> , (b) Tampak dalam energy <i>absorber module</i> setelah terjadi <i>frontal crash</i> [(b.1) kecepatan 10 m/s, (b.2) kecepatan 15.6 m/s, (b.3) kecepatan 21.1 m/s]	79
Gambar 4. 36 Hubungan penyerapan energy <i>double wall foam filled</i> 10 dan waktu simulasi	80

Gambar 4. 37: Tampilan Grafik <i>Energy Absorption</i> (EA) tiap model energy absorber module pada kecepatan 10 m/s.....	82
Gambar 4. 38: Tampilan Besaran penyerapan energi tiap model energy absorber module pada kecepatan 10 m/s	83
Gambar 4. 39: Tampilan Grafik deformasi dan angka deformasi pada kecepatan 10 m/s	84
Gambar 4. 40: Tampilan Grafik <i>Energy Absorption</i> (EA) tiap model energy absorber module pada kecepatan 15.6 m/s.....	85
Gambar 4. 41: Tampilan Besaran penyerapan energi tiap model energy absorber module pada kecepatan 10 m/s	86
Gambar 4. 42: Tampilan Grafik deformasi dan angka deformasi pada kecepatan 15.6 m/s	87
Gambar 4. 43: Tampilan Grafik <i>Energy Absorption</i> (EA) tiap model energy absorber module pada kecepatan 21.1 m/s.....	88
Gambar 4. 44: Tampilan Besaran penyerapan energi tiap model energy absorber module pada kecepatan 21.1 m/s	89
Gambar 4. 45: Tampilan Grafik deformasi dan angka deformasi pada kecepatan 21.1 m/s	90

DAFTAR SIMBOL

Notasi	Keterangan	Satuan
L	Panjang Model	m
D	Diameter Model	m
H	Ketebalan Model	m
ρ	Densitas	Kg/m ²
E	Modulus Elastisitas	MPa
σ	Tegangan	MPa
ϵ	Regangan	MPa
V	Kecepatan	m/s
I	Momen Inersia	Kg. m ²
EA	Penyerapan Energi	Joule
F	Gaya	kN
δ	Deformasi	m
T	Waktu	s
K _E	Konstanta Elastisitas	
K _{RP}	Konstanta Rasio Plastis	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta api merupakan moda transportasi darat berbasis jalan rel yang efisien dan efektif. Hal ini dibuktikan dengan daya angkutnya baik berupa manusia ataupun barang yang lebih besar dari moda transportasi lainnya. Seiring dengan penggunaannya, moda transportasi kereta api tidak terlepas dari tingkat resiko akan kecelakaan. Komite Nasional Keselamatan Transportasi memperlihatkan data hasil investigasi pada tahun 2012 sampai dengan tahun 2017 telah terjadi 31 total kecelakaan pada moda transportasi kereta api. Dari kecelakaan tersebut, 7 kecelakaan terjadi akibat tabrakan antar kereta api yang mengakibatkan 6 korban meninggal dunia dan 95 orang mengalami luka.

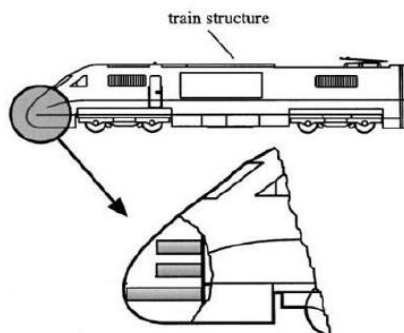
Jumlah korban kecelakaan ini sebenarnya bisa dikurangi dengan menerapkan dua sistem keselamatan yaitu, sistem keselamatan aktif untuk menghindari kemungkinan terjadinya kecelakaan seperti ATP (Automatic Train Protection) dan sistem keselamatan pasif untuk mengurangi dampak kecelakaan jika kecelakaan tetap terjadi salah satunya yang berbasis teknologi crashworthiness. Penerapan teknologi crashworthiness dapat mengurangi atau meminimumkan efek tabrakan dan sangat berpotensi untuk diterapkan pada kereta-kereta penumpang di Indonesia.

Secara definisi crashworthiness adalah kemampuan suatu struktur atau kendaraan untuk melindungi penumpang atau argonya ketika terjadi dampak tabrakan (Johnson dan Mamalis, 1978). Sedangkan Struktur yang crashworthy adalah struktur yang mampu menyerap sebagian energi tabrakan, menyelamatkan bagian berpenumpang, mencegah benturan dengan objek luar, mencegah terlemparnya penumpang dan membatasi perlambatan (Setiawan dan Fajrianto, 2006).



Gambar 1. 1: Tabrakan antar kereta api di Indonesia

Perangkat system keamanan dalam perkembangannya telah banyak diterapkan, salah satunya adalah *energy absorber module*. *Energy absorber module* adalah system keamanan pasif yang berperan untuk menyerap energi kinetik ketika kereta mengalami benturan baik dari arah depan maupun dari arah belakang. Penggunaan *energy absorber module* yang banyak digunakan adalah dengan penampang lingkaran, persegi dan persegi panjang, namun dari dari banyak hasil penelitian jenis penampang lingkaran menyerap energy yang paling besar (Velmurungan, 2009).



Gambar 1. 2: Penggunaan *energy absorber module* pada struktur kereta

Pada umumnya, material yang digunakan dalam pembuatan energy *absorber module* adalah aluminium, dari berbagai penelitian yang dilakukan pada kecepatan tumbukan terjadi adanya deformasi plastis. Hal ini menunjukkan penyerapan energy pada energy *absorber module*. Akan tetapi diperoleh bahwa, makin cepat deformasi plastis pada energy *absorber module*, maka sisa kecepatan akibat tumbukan masih tersisa tinggi yang dapat membahayakan rangka utama kendaraan, sehingga keamanan bagi pengemudi dianggap masih rendah (Jatmiko, 2014)

Secara umum, cara yang paling sederhana untuk meningkatkan ketahanan terhadap tumbukan dengan gaya aksial adalah dengan mengatur ketebalan dinding rangka struktur, namun akan menambah massa struktur menjadi lebih berat. Salah satu solusi efektif untuk mengurangi gaya dorong pada interaksi pertama pada sebuah tabrakan, cara mengatasinya adalah dengan menerapkan struktur dinding tipis. Struktur benda uji berdinding tipis dikenal sebagai cara yang menjanjikan dan efisien dalam menyerap energi dari gaya tumbukan pada struktur pada rangka mobil konsep, struktur kereta api dan rangka helicopter (Hayashi, 2005). Dengan ditemukannya material baru sebagai alternatif modifikasi bagian-bagian struktur dengan menambahkan material yang memiliki massa jenis ringan dapat menjadi solusi dalam meningkatkan ketahanan terhadap tumbukan yang terjadi dengan gaya aksial dan sebaliknya material tersebut ringan sehingga dapat mengefektifkan bobot dan mengatasi gaya dorong ekstrim pada interaksi pertama pada tabrakan. Cara alternatif adalah dengan mengisi busa *polyurethane* untuk memperkuat komponen dinding tipis yang direkomendasikan oleh Thornton (Thornton,1980).

Berdasarkan uraian diatas, penulis tertarik akan menganalisa energy absorpsi struktur energy *absorber module* dengan penampang tipis berbahan aluminium dan berisikan foam sebagai alternative system keamanan pasif yang diharapkan efektif mampu menyerap energy tumbuk yang datang secara tiba-tiba, guna mengurangi resiko kecelakaan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah penulis uraikan diatas, maka permasalahan yang dapat dirumuskan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penyerapan energi *absorber module* menggunakan material aluminium foam terhadap *frontal crash*?
2. Bagaimana pengaruh penyerapan energi *absorber module* menggunakan material aluminium foam dengan variasi model penampang terhadap *frontal crash*?

1.3 Tujuan Penelitian

Dengan berlandaskan pada perumusan masalah, maka tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besar energy yang dapat diserap energy *absorber module* menggunakan material aluminium foam terhadap *frontal crash*.
2. Mengetahui model penampang *absorber module* yang memiliki kemampuan penyerapan energy yang paling tinggi dan yang paling rendah terhadap *frontal crash*.

1.4 Manfaat Penelitian

Dalam penyusunan tugas akhir ini, mahasiswa diharapkan mampu, kreatif, serta inovatif dalam menyusun tugas akhir. Agar Penyusunan tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa, fakultas, serta instansi terkait. Dari penyusunan tugas akhir ini manfaat yang dapat diambil

1. Untuk dijadikan sebagai proyek akhir yang menjadi syarat kelulusan dari Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin
2. Mahasiswa mendapat ilmu tambahan dibidang teknik, khususnya mengenai struktur material dan software metode elemen hingga.

1.5 Batasan Masalah

1. Material *Absorber module* menggunakan Aluminium paduan 6063 T6 (AA6063 T6) sebagai dinding luar dan dinding dalam.

2. Material pengisi *Absorber module* menggunakan material aluminium Foam.
3. Kecepatan awal tumbukan pada Impactor pada kecepatan 10 m/s, 15.6m/s dan 21.1 m/s.
4. Pelat penyanggah (lower) pada *absorber module* dan *impactor* dianggap material *discrete rigid* yang tidak mengalami deformasi selama proses *frontal crash*.
5. Permodelan dan pembangunan simulasi *frontal crash* dilakukan menggunakan software metode elemen hingga yaitu ABAQUS CAE 2020.
6. Parameter crashworthiness yang dihitung adalah besar *Energy Absorption* (EA)

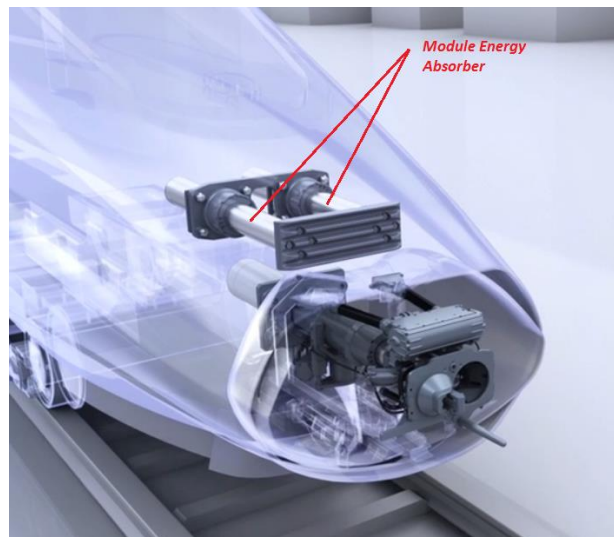
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Energy Absorber module*

Energy absorber module merupakan salah satu system keamanan pasif yang berfungsi sebagai penyerap energi impact akibat tabrakan pada bagian depan, pada saat terjadi tabrakan depan (*frontal crash*).

Gambar dibawah merupakan salah satu pengaplikasian Module Absorber yang digunakan pada kereta, digunakan pada jenis kereta cepat di china.



Gambar 2. 1: Module Absorber Pembuat Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd.
(<https://www.crrgc.cc/sfsen>)

Velmurugan and Muralikannan (2009) meneliti karakteristik penyerapan energi pada *absorber module* dengan melakukan pengujian statik dan dinamik dari beberapa macam bentuk penampang diantaranya lingkaran, persegi, dan persegi panjang dengan masing-masing *absorber module* memiliki keliling, ketebalan, dan tinggi yang sama, penelitian tersebut menunjukkan bahwa penyerapan energi spesifik pada penampang lingkaran lebih tinggi dari penampang persegi dan persegi panjang sedangkan penampang persegi lebih baik dari persegi panjang. Berbagai bentuk crash

absorber (peredam kejut) diketahui dari penemuan sebelumnya, yang pada umumnya berguna untuk menyerap energi tumbukan pada saat terjadi tumbukan, istilah crash absorber digunakan sebagai istilah umum baik untuk perangkat untuk menyerap dampak atau tabrakan yang kecil juga dipahami untuk perangkat yang menyerap energi dalam jumlah yang besar jika terjadi kecelakaan.

Material yang biasa digunakan secara umum dalam pembuatan perangkat energy *absorber module* adalah material berjenis aluminium dimana memiliki karakteristik yang ringan, tahan korosi dan memiliki nilai keuletan yang tinggi serta dengan kemampuan permesinan yang bagus. (Wiryosumanto, 1994)

Struktur berdinding tipis dikenal sebagai sesuatu yang menjanjikan dan efisien dalam menyerap energi dari suatu gaya impak pada struktur di bagian rangka dari konsep mobil, struktur kereta dan rangka helikopter (Hayashi, 2005).

2.1.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai aluminium foam telah dilakukan oleh Zhibin li dan kawan-kawan yaitu, Penelitian untuk mengukur penyerapan energi tabung kosong dan tabung berisi foam di bawah pembebanan miring dengan sudut pembebanan dan parameter geometri yang berbeda telah dilakukan.



Gbr. 5. Tampilan bagian dari struktur kosong dan berisi busa.

Gambar 2. 2: Spesimen pengujian *Single Wall*, *Single Wall foam filled* dan *double wall foam filled* Penelitian sebelumnya (Zhibin Li, 2012)

Tabel 2. 1: Tabel Dimensi Penelitian Sebelumnya

Table 2
Dimensions of cylindrical tubes.

	Outer tube		Inner tube	
	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)
1	38	1.2	-	-
2	38	1.6	22	1.6
3	38	2.0	24	1.2

(Zhibin Li, 2012)

Model spesimen yang diuji adalah model silinder dengan spesifikasi geometri seperti pada tabel diatas. Silinder yang diuji adalah terbuat dari material aluminium paduan AA6063. Terdapat silinder satu dinding (*Single Wall*), silinder satu dinding dan diisi dengan material aluminium foam (*Single Wall foam filled*) dan juga silinder dengan dua dinding outer dan inner yang diisi material aluminium foam didalamnya (*Double wall foam filled*).

Hasil eksperimen pada specimen didapatkan bahwa Ketika struktur tersebut diberikan pembebanan quasi-statis terjadi deformasi baru, seperti mode pelipatan spiral mode pelipatan ekstensi tidak beraturan dan mode deformasi sumbu simetris atau berlian tidak beraturan, diidentifikasi dan dianggap berasal dari pembengkokan silinder dan pengisi busa, serta interaksi antara silinder dan foam.

Untuk semua sudut pembebanan yang diuji, gaya tekan tabung berisi foam jauh lebih tinggi daripada silinder kosong. Selain itu, gaya tekan tabung ganda yang diisi foam lebih besar daripada tabung tunggal yang diisi foam. Di sisi lain, struktur berisi busa menjadi kurang kompresibel. Oleh karena itu, efisiensi stroke struktur yang diisi foam lebih kecil daripada silinder kosong.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2. 3: Hasil eksperimen Pengujian Pembebanan quasi-static penelitian sebelumnya (Zhibin Li, 2012)

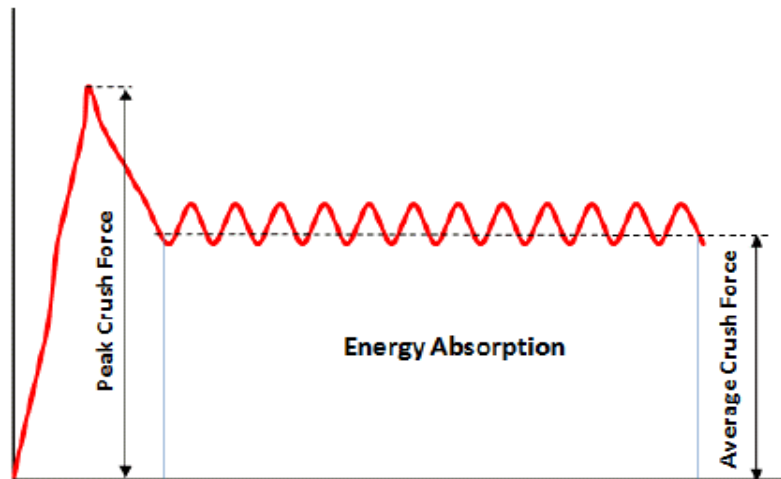
Karakteristik penyerapan energi dari struktur tabung tunggal dan ganda yang kosong dan berisi busa sehubungan dengan sudut beban dan ketebalan dinding ditentukan. Ditemukan bahwa faktor efektivitas penyerapan energi dari struktur silinder tabung dengan aluminium foam secara signifikan lebih tinggi daripada silender tanpa aluminium foam dan kapasitas penyerapan energi dari silinder dengan dua dinding yang diisi foam lebih baik daripada silinder satu dinding yang diisi dengan aluminium foam.

TINJAUAN PUSTAKA

2.2 Crashworthiness

Crashworthiness adalah kemampuan kendaraan untuk menyerap energi benturan dan melindungi penumpang kendaraan pada saat terjadi kecelakaan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi crashworthiness pada *absorber module* terhadap energi dari gaya impak kecelakaan, diantaranya yaitu:

1. Penyerapan energi



Gambar 2. 4: Kurva penyerapan energi, hubungan antara gaya dan deformasi

Pada saat impactor menghantam *energy absorber module*, energi impak dari impactor akan dikonversikan menjadi energi regangan yang mengakibatkan perubahan bentuk pada *energy absorber module*. Penyerapan energi (*Energy Absorption*) didapatkan melalui luas daerah di bawah kurva pada Gambar 2.1, sebagai usaha yang dilakukan impactor sehingga energi regangan diasumsikan hasil konversi energi kinetik dari impactor. Persamaan penyerapan yang digunakan yaitu:

$$EA = \int_0^{\delta} F(x)D^{\delta} \quad (2.1)$$

2. Pola deformasi

Absorber module atau tabung yang berdinding tipis mempunyai kemungkinan tiga pola deformasi yang dapat dialami apabila dikenai pembebanan quasi- static, yaitu concertina (axisymmetric), diamond (non-axisymmetric), dan mixed mode (axisymmetric-diamond). Pola deformasi dan proses terjadinya dari masing-masing model energy *absorber module* berbeda.

3. Force reaction

Force reaction adalah gaya yang diberikan oleh energy *absorber module* sebagai reaksi untuk menahan beban oleh impactor. Force reaction pada energy *absorber module* terjadi setelah mendapat pembebanan quasi-static. Ketika terjadi force reaction maka terjadi pula hubungan antara beban (load) dengan deformasi pada masing-masing sambungan *absorber module*. Secara umum dapat dilihat bahwa, folding pada *absorber module* terjadi terlebih dahulu dialami oleh *absorber module* yang salah satu segmennya lebih panjang dari *absorber module* lainnya. Hal ini disebabkan oleh panjang kolom yang berbeda oleh masing- masing jenis sambungan *absorber module*. Dimana, kolom yang semakin panjang semakin mudah untuk mengalami buckling (euler).

2.3 Aluminium Foam

Pembuatan aluminium foam pertama kali dilakukan oleh benjamin sosnick pada tahun 1943. Dia mencoba mendispersikan gas kedalam aluminium padat dengan bantuan unsur merkuri (Hg) menggunakan bejana bertekanan tinggi. Dengan bantuan tekanan tinggi. Penguapan Hg terjadi bersamaan saat temperatur leleh aluminium sehingga menyebabkan pembentukan foam (Shaik dkk, 2010). Karakteristik material ini sesuai Tabel 2.2. Aluminium foam memiliki daya serap energi yang tinggi dengan berat

jenis rendah dan sangat baik sehingga material ini telah diterapkan dalam industri otomotif (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 terowongan dan sebagai bahan pelindung kebakaran dan sistem perlindungan struktur terhadap ledakan.

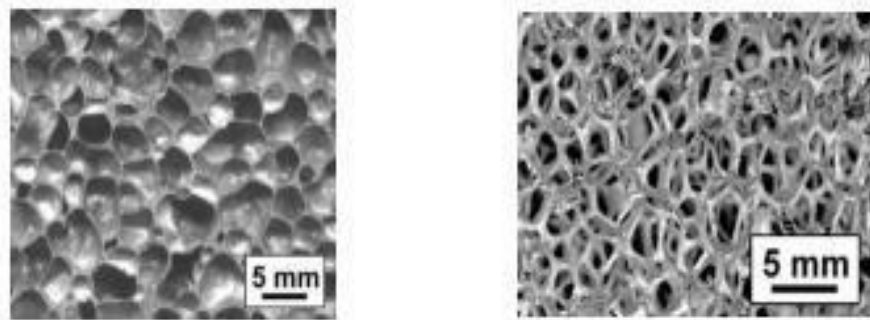
Tabel 2. 2: Karakteristik Aluminium *Foam*

Tensile Strength	1,24 MPa
Shear Strength	1,31 MPa
Density	0.45 gram/cm ³
Modulus Of Elasticity	625 Mpa
Shear Modulus	199,95 MPa
Vickers Pyramid Number	35 HV
Specific Heat	0,895 J/g-c
Bulk Thermal Conductivity	5,8 W/m-c
Coefficient of Thermal Expansion	23,58 x 10 ⁻⁶ m/m-c
Bulk Resistivity	7,2 x 10 ⁻⁵ ohm - cm
Melting Point	660° c

(Degischer, 2002).

Aluminium foam dengan struktur seluler terkenal kombinasi yang menarik yang sifat fisik dan mekanik, seperti konduktivitas panas yang tinggi, berat jenis yang rendah dan permeabilitas tinggi. Berdasarkan bentuk rongganya, metal foam dapat diklasifikasikan menjadi dua sesuai dengan Gambar 2.5, yaitu:

1. Foam rongga tertutup (closed cell), yaitu rongga-rongga yang terbentuk terisolasi dan antar rongga tidak saling berhubungan.
2. Foam rongga terbuka (open cell), yaitu rongga-rongga yang terbentuk saling berhubungan dan kontinu.



Gambar 2. 5: Foam rongga tertutup dan foam rongga terbuka (Degischer, 2002).

Aluminium foam sering digunakan sebagai bahan pengisi dalam struktur ringan yang mengalami benturan dan dampak kecepatan tinggi atau sebagai alat isolasi termal atau akustik. Foam rongga tertutup, khususnya foam Al-alloy, menunjukkan tegangan konstan dimana dapat menyerap tingkat energi yang lebih tinggi daripada 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 lain dari aluminium foam (Degischer, 2002).

Dengan ditemukannya material baru, aluminium foam sebagai alternatif, yang menjadi sebuah modifikasi dari bagian pada struktur dengan menambahkan material yang memiliki densitas yang ringan dapat menjadi solusi dalam meningkatkan ketahanan terhadap tabrakan yang terjadi dengan gaya aksial dan disisi lain material ini ringan sehingga dapat mengefisiensikan berat dan mengatasi gaya dorongan ekstrim pada interaksi pertama pada tabrakan. Polyurethane foam diisi untuk memperkuat komponen dinding tipis yang merupakan rekomendasi dari Thornton (1980).

Perilaku *crashworthiness* yang dimiliki oleh aluminium *foam* memiliki kepentingan mendasar dalam desain keselamatan kendaraan karena keruntuhan plastik mereka adalah mekanisme yang digunakan untuk menghilangkan energi kinetik kendaraan dengan cara yang dapat dikendalikan. Mekanisme keruntuhan plastik harus dapat diandalkan dan

evolusinya selama arah yang menyebabkan penyerap energi berubah bentuk sebagai kombinasi dari kedua modulus keruntuhan lentur aksial dan global. Mode ini umumnya tidak stabil dengan pengurangan terkait kapasitas penyerapan energi dari struktur tubular. Kehadiran bahan foam dalam struktur ini tampaknya meningkatkan stabilitas dari dampak tabrakan (Li, 2012).

Dengan menggunakan metal foam sebagai material pengisi diharapkan keuletan dari bagian dinding tipis dapat dioptimalkan tanpa harus meningkatkan berat perangkat secara signifikan. Ketika sebuah struktur dengan dinding tipis yang kemudian diisi penuh dengan metal foam sebagai inti, maka sebuah interaksi antara material pengisi dan struktur dengan dinding tipis struktur diharapkan akan menghasilkan beberapa karakteristik yang bermanfaat untuk permasalahan pada tabrakan dan sifat pada penyerapan energi, karena secara harfiah penekanan dan lipatan pada material pada kondisi ini selama tabrakan gaya aksial menjadi terbatas. Dalam beberapa dekade terakhir, metal foam seperti aluminium foam telah banyak dikembangkan sebagai rekayasa material yang sangat ringan. Material ini memiliki sifat mekanikal yang unik, dimana dapat menahan tegangan deformasi yang besar sementara material ini hanya memiliki tegangan konstan yang kecil. Salah satu aplikasi dari material ini adalah sebagai suatu struktur yang menyerap energi. Pengisian struktur dengan metal foam berbahan aluminium dapat meningkatkan sifat penyerapan energi dan menstabilkan proses lekukan pada struktur. Sebuah efisiensi yang begitu besar pada berat telah diperoleh dari pengkombinasian antara struktur dengan dinding yang tipis dan diisi dengan metal foam sebagai inti, seperti yang dipelajari secara perhitungan oleh Santosa dkk (2000).

Pada penelitian yang lain, diungkapkan mengenai analisa tentang struktur yang telah diisi dengan metal foam dan diberikan interaksi gaya dorongan aksial. Rata-rata kemampuan menahan gaya tabrakan yang dihasilkan dari struktur yang telah diisi metal foam lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata kemampuan menahan gaya tabrakan yang dihasilkan dari

masing-masing yang hanya metal foam ataupun struktur berdinding tipis saja, yang mana dikondirmasi oleh Kavi dkk (2006.).

Dalam memaksimalkan potensi dari pengimplementasian metal foam sebagai material pengisi yang ringan di bagian inti struktur, sebuah konsep alternatif yang dapat dilakukan yaitu menggandakan bagian struktur dengan dinding yang tersisi metal foam, dimana metal foam ini diletakkan diantara struktur dengan dinding bagian dalam dan struktur dengan dinding bagian luar, solusi ini terbukti dapat meningkatkan efisiensi pada berat dari struktur yang cocok menurut Santosa dan Wierzbicki (1999), tetapi sejauh ini tidak begitu banyak informasi yang tersedia terkait sifat dari bagian struktur dengan dinding ganda ini yang diberikan tabrakan dengan arah gaya aksial secara umum. Salah satu yang mempublikasikan terkait sifat dari bagian ganda struktur struktur adalah Santosa dan Wierzbicki menggunakan pendekatan analisa elemen hingga dynamic non-linear. Pada publikasinya, tingkat ketahanan terhadap dorongan pada tabrakan dari struktur dengan bagian struktur dengan dinding ganda yang terisi metal foam diantaranya terbukti lebih tinggi secara signifikan, dibandingkan dengan struktur yang hanya dilapisi sebuah dinding yang terisi metal foam yang mana mendapatkan pembebanan yang sama.

Sebuah investigasi pada percobaan dengan pembebanan quasi-static mengenai struktur dengan dinding ganda yang terisi dengan metal foam dengan material, dimensi dan bentuk struktur yang berbeda-beda, pernah diteliti oleh Seitzberger dkk (2000). Hasil dari percobaan tersebut menampilkan bahwa struktur dengan dinding ganda yang terisi dengan metal foam adalah sebuah perangkat yang efisien dalam menyerap energi.

Sebuah investigasi pada percobaan pembebanan quasi-static dengan penekanan aksial juga pernah diteliti oleh Zhibin Li dkk (2018) dimana dengan dua tipe yang berbeda, yaitu struktur bundar dan kotak serta dengan variasi struktur yang terisi aluminium foam, diantaranya adalah struktur

bundar yang terisi metal foam dan tabung kotak yang terisi metal foam, struktur bundar berdinding ganda yang terisi metal foam dan struktur kotak berdinding ganda yang terisi oleh metal foam, dan struktur kotak yang terisi metal foam di bagian sudut. Hasilnya menunjukkan bahwa dimensi dari bagian struktur dengan dinding pada jenis struktur yang berdinding ganda dan terisi oleh metal foam diantaranya, dapat memberikan efek yang sangat signifikan dalam merespon tabrakan.

Pada penelitian Niknejad dkk (2015), mempublikasikan beberapa teori turunan yang tervalidasi dari percobaan yang memprediksi respon terhadap tabrakan dari struktur segi empat yang terisi dengan metal foam (polyurethane) selama pembentukan lipatan awal dibawah pembebanan tabrakan gaya aksial. Analisis tersebut mempertimbangkan efek interaksi antara metal foam dengan dinding bagian dalam dari struktur. Hasilnya menampilkan bahwa terdapat pengaruh dari interaksi untuk sifat tabrakan.

Attia dkk (2012), membandingkan sifat penyerapan energi dari struktur tunggal yang terisi metal foam dengan densitas yang berkualitas dan memperhatikan efek dari distribusi densitas untuk kapasitas penyerapan energi yang spesifik. Hasilnya menampilkan bahwa 12% lebih baik dalam kapasitas penyerapan energi yang spesifik oleh struktur tunggal yang terisi metal foam dengan densitas yang berkualitas dibandingkan dengan penggunaan material dengan densitas biasa dimana diberikan pembebanan yang sama.

2.4 Metode Elemen Hingga

Menurut Ir. Yerri (2004), Metode Elemen Hingga (MEH) merupakan prosedur numeris yang digunakan untuk menyelesaikan masalah di bidang engineering. MEH dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan seperti analisis tegangan pada struktur, perpindahan panas, elektromagnetis, dan fluida. Inti dari MEH adalah membagi suatu objek yang akan dianalisa menjadi beberapa bagian dengan jumlah finite (diskretisasi elemen). Tiap-tiap

Bagian yang telah dibagi-bagi tersebut kemudian dihubungkan dengan node, setelah itu dibangun persamaan matematika yang merepresentasikan objek tersebut, kemudian dapat dilakukan perhitungan untuk menyelesaikan masalah pada objek tersebut.

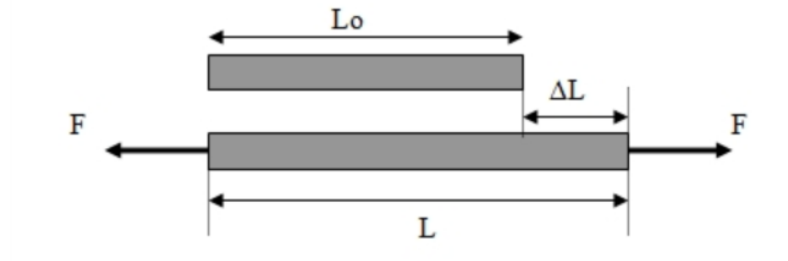
Tujuan menggunakan MEH adalah menyelesaikan analisis dari suatu persamaan diferensial geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, dan tidak mudah diperoleh dengan perhitungan manual karena perhitungan manual membutuhkan besaran yang harus diketahui pada setiap titik pada objek yang dikaji sedangkan geometri yang rumit memiliki banyak besaran yang tidak diketahui. Selain itu, MEH juga dapat menyelesaikan permasalahan dinamik atau berbasis perubahan waktu. beberapa software yang berbasis elemen hingga antara lain ANSYS, ABAQUS, SOLIDWORKS, CATIA, dll.

MEH menggunakan konsep dasar hubungan tegangan, regangan, dan deformasi dalam menyelesaikan suatu permasalahan. Menurut Jack Hu, et al (2002) Tegangan sebenarnya (true stress) merupakan gaya yang timbul tiap satuan luas. Tegangan dapat dirumuskan sebagai:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

dimana F merupakan tegangan sebenarnya dan A merupakan luasan permukaan. Sedangkan regangan merupakan perubahan ukuran material dari panjang awal akibat gaya tarik atau gaya tekan yang dialaminya, skema dapat dilihat pada gambar 2.21. Jack Hu, et al (2002) dalam bukunya menyatakan terdapat dua macam regangan (strain) yaitu engineering strain dan true strain. Engineering strain dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\epsilon_{eng} = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (2.2)$$

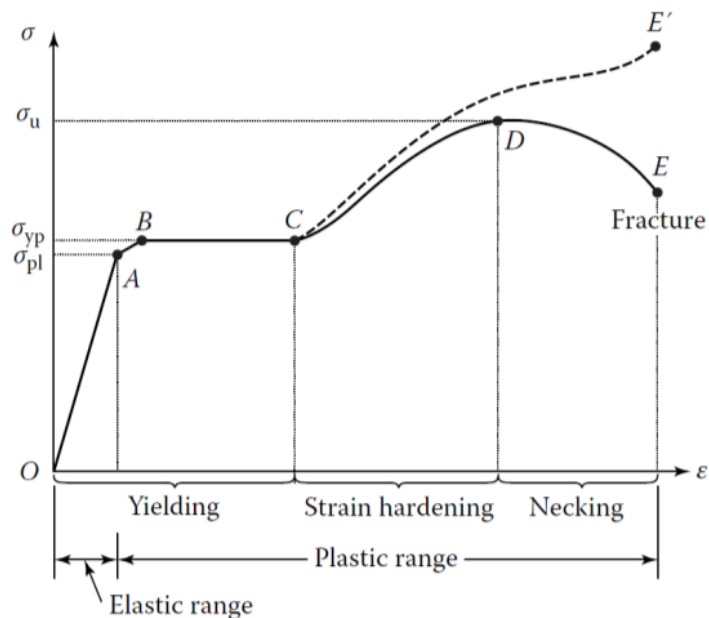


Gambar 2. 6: Skema Regangan
(Jack hu, 2002)

Dimana L merupakan perubahan panjang setelah terpengaruh gaya, L_0 merupakan panjang mula, dan ΔL merupakan perubahan panjang. Sedangkan engineering strain merupakan perhitungan regangan pada kondisi dimensi benda saat itu dan dirumuskan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{dl}{l} = \int_0^1 \ln \frac{1}{l_0} \quad (2.3)$$

Hubungan antar tegangan dan regangan pada suatu baja struktur dapat dilihat pada gambar



Gambar 2. 7: Diagram Tegangan-Regangan
(Ugural, 2009)

Sedangkan deformasi merupakan perubahan bentuk pada objek apabila dikenai suatu pembebanan. Deformasi tidak bisa lepas dari persamaan modulus elastisitas. Modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tegangan dengan regangan yang dialami bahan. Sehingga dengan menghubungkan persamaan modulus elastisitas dengan persamaan tegangan dan regangan didapatkan:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{P}{A}}{\frac{\delta}{L}} \quad (2.4)$$

Sehingga untuk mencari deformasi (δ) dapat menggunakan persamaan:

$$\delta = \frac{P \times L}{A \times E} \quad (2.5)$$

Dimana:

P = Beban (N),

L = panjang awal, (mm)

E = modulus elastisitas

A = luasan yang terpengaruh beban (mm²)

Dari berbagai macam persamaan dasar tersebut dikembangkan menjadi suatu persamaan umum yang sering digunakan dalam analisis struktur menggunakan metode elemen hingga yaitu:

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (2.6)$$

Dimana:

{F} = matriks gaya yang bekerja pada node tiap elemen

[K] = matriks kekakuan elemen lokal

{d} = displacement pada elemen.

Nilai matriks kekakuan global dapat dicari dengan menggabungkan matriks-matriks lokal dan merubahnya menjadi koordinat global, sehingga

dapat mencari nilai displacement atau perubahannya menggunakan aturan penyelesaian matriks.

2.4.1 Istilah Dalam Metode Elemen Hingga

Beberapa istilah-istilah yang digunakan dalam analisis struktur yang digunakan dalam metode elemen hingga yang dijelaskan oleh Katili (2008) adalah sebagai berikut.

1. Beban

Beban adalah semua gaya yang menimbulkan tegangan dan regangan dalam suatu struktur. Beban nodal (BN) adalah beban terpusat yang langsung bekerja pada nodal. Beban nodal ekuivalen (BNE) adalah beban terpusat atau beban merata yang bekerja di antara nodal dan ditransmisikan menjadi beban nodal.

2. Gaya Nodal Struktur

Gaya nodal struktur adalah resultan atau hasil penggabungan beban nodal atau reaksi perletakan. Gaya tersebut akan didistribusikan ke seluruh elemen struktur dan menimbulkan gaya internal geser, aksial, momen torsi, dan momen lentur sampai akhirnya disalurkan ke perletakan. Gaya nodal struktur juga berperan dalam menjaga keseimbangan struktur bebas (free-body structure) bila perletakan dilepas.

3. Gaya Nodal Elemen

Gaya nodal elemen adalah gaya yang muncul pada nodal elemen dengan peran untuk menjaga keseimbangan elemen bila elemen dilepas dari struktur sebagai free-body. Gaya nodal elemen ini akan menghilang bila elemen-elemen dirangkai menjadi satu kesatuan dengan struktur dan bergabung menjadi gaya nodal struktur.

4. Peralihan Nodal

Peralihan nodal adalah terjadinya perpindahan derajat kebebasan nodal pada elemen struktur yang dapat berupa rotasi atau translasi

dalam arah horisontal maupun vertikal akibat pembebanan.

5. Nodal Struktur

Nodal struktur adalah titik pertemuan elemen-elemen yang merupakan acuan dalam merangkai elemen-elemen pembentuk struktur. Pada nodal struktur gaya nodal struktur dan derajat kebebasan struktur didefinisikan untuk kemudian dibentuk relasi persamaan kekakuan struktur.

6. Nodal Elemen

Nodal elemen adalah titik-titik pada elemen dimana gaya nodal elemen dan derajat kebebasan elemen didefinisikan untuk kemudian dibentuk suatu persamaan kekakuan elemen.

7. Elemen Struktur

Elemen struktur adalah komponen-komponen pembentuk struktur yang dibatasi oleh minimal dua nodal.

Tujuan utama analisis dengan metode elemen hingga adalah untuk memperoleh nilai pendekatan (bukan eksak) tegangan dan peralihan pada suatu struktur. Karena pendekatan berdasarkan fungsi peralihan merupakan teknik yang seringkali dipakai, maka langkah-langkah berikut ini dapat digunakan sebagai pedoman bila menggunakan pendekatan berdasarkan asumsi tersebut:

1. Pembagian kontinum menjadi sejumlah elemen (sub-region) yang berhingga dengan geometri yang sederhana (segitiga, segiempat, dan lain sebagainya).
2. Pada titik-titik elemen yang diperlakukan sebagai titik nodal, dimana syarat keseimbangan dan kompatibilitas dipenuhi.
3. Asumsi fungsi peralihan pada setiap elemen dibuat sedemikian rupa sehingga peralihan pada setiap titik sembarang dipengaruhi oleh nilai-nilai titik nodalnya.
4. Pada setiap elemen khusus yang dipilih terkait harus memenuhi

syarat hubungan regangan peralihannya dan hubungan tegangan-regangannya.

5. Penentuan kekakuan dan beban titik nodal ekivalen untuk setiap elemen dengan menggunakan prinsip usaha atau energi.
6. Turunan persamaan keseimbangan untuk mencari peralihan titik nodal.
7. Persamaan keseimbangan untuk mencari peralihan titik nodal.
8. Hitungan tegangan pada titik tertentu pada elemen terkait.
9. Penentuan reaksi letak pada titik nodal yang tertahan bila diperlukan.

Beberapa kelebihan dalam penggunaa metode elemen hingga menurut Susatio (2004), antara lain adalah:

1. Benda dengan bentuk yang tidak teratur dapat dengan mudah dianalisis.
2. Tidak terdapat kesulitan dalam menganalisis beban pada suatu struktur.
3. Pemodelan dari suatu benda dengan komposisi materi yang berlainan dapat dilakukan karena tinjauan yang dilakukan secara individu untuk setiap elemen.
4. Dapat menangani berbagai macam syarat batas dalam jumlah yang tak terbatas.
5. Variasi dalam ukuran elemen memungkinkan untuk memperoleh detail analisis yang diinginkan.

Adapun dasar dari metode elemen hingga adalah membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil yang jumlahnya berhingga sehingga dapat menghitung reaksi akibat beban pada kondisi batas yang diberikan. Dari elemen-elemen tersebut dapat disusun persamaan-persamaan matriks yang biasa diselesaikan secara numerik

dan hasilnya menjadi jawaban dari kondisi beban yang diberikan pada benda kerja tersebut. Metode elemen hingga (MEH) dapat mengubah suatu masalah yang memiliki jumlah derajat kebebasan tidak berhingga menjadi suatu masalah dengan jumlah derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya lebih sederhana. Metode ini merupakan metode computer oriented yang harus dilengkapi dengan program-program komputer digital yang tepat dalam penelitian ini penulis menggunakan program Abaqus CAE untuk perhitungan numerik.

2.4.2 Software metode elemen hingga

Software metode elemen hingga yang digunakan yaitu Abaqus CAE. Software ini adalah paket program simulasi rekayasa yang kuat, didasarkan pada metode elemen hingga, yang dapat memecahkan masalah mulai dari analisis linier relative sederhana sampai simulasi nonlinier yang paling menantang. Program Abaqus CAE berisi perpustakaan yang luas dari unsur-unsur yang dapat memodelkan hampir semua geometri apapun. Program ini memiliki daftar yang sangat luas dari model material yang dapat mensimulasikan perilaku sebagian besar bahan rekayasa, termasuk logam, karet, polimer, komposit, beton bertulang, foam yang lentur dan kuat, dan bahan geoteknik seperti tanah dan batuan.

Abaqus CAE menawarkan berbagai kemampuan untuk simulasi aplikasi linier dan non-linier. Permasalahan dengan beberapa komponen dimodelkan dengan mengaitkan geometri masing-masing komponen dengan model bahan yang sesuai dan menentukan interaksi komponen. Dalam analisis non-linier, Abaqus CAE otomatis memilih penambahan beban yang tepat dan toleransi konvergensi dan terus menyesuaikan mereka selama analisis untuk memastikan bahwa solusi yang akurat dan efisiensi diperoleh (Simulia, 2011).

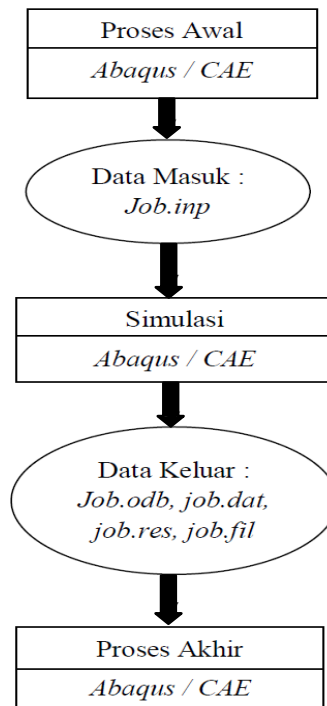
Ada beberapa perangkat lunak umum di pasaran saat ini digunakan untuk simulasi dinamis kendaraan. Abaqus CAE adalah salah satu dari beberapa perangkat lunak besar kode MEH di pasaran saat ini untuk memecahkan masalah dalam multiphysics, yang termasuk cairan, termal, mekanik, kopling listrik dan sebagainya. Dassault menjelaskan, terdapat tiga rangkaian produk inti dari Abaqus CAE yaitu:

1. Abaqus CAE / Standard adalah pemecah tujuan umum yang menggunakan skema integrasi implisit tradisional untuk menyelesaikan analisis elemen terbatas.
2. Abaqus CAE / 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.

2.4.3 Tahapan Menjalankan Program Metode Elemen Hingga

Dalam Abaqus CAE “Getting Strateed with Abaqus CAE, Interactive Edition”, dijelaskan bahwa untuk menganalisis sampai selesai dengan program Abaqus CAE biasanya melalui tiga tahap yang berbeda yaitu proses awal, simulasi dan proses akhir. Dimana diantara tahapan proses awal dan simulasi dimasukkan data dan diantara tahapan simulasi dan proses akhir terdapat luaran data. Sehingga secara keseluruhan, semua tahapan yang dilalui yaitu proses awal (Preprocessing) menggunakan software Abaqus CAE, data masuk dengan format job.inp, simulasi menggunakan software Abaqus CAE, data keluar (format job.odb, job.dat, job.res, job.fil) dan proses akhir menggunakan software Abaqus CAE. Kemudian dari ketiga tahap tersebut dihubungkan sehingga menjadi seperti

Gambar 2.3



Gambar 2. 8: Tahapan menjalankan program Abaqus CAE

a. Proses Awal (Preprocessing)

Pada bagian ini kita mulai menentukan model awal yang akan dilakukan analisis. Pemodelan part dilakukan dalam software Abaqus CAE dengan memasukkan geometri yang telah kita ketahui sebelumnya. Dalam menggambarkan model, kita menentukan koordinat sistem yang akan dibuat. Parameter dan satuan yang digunakan harus sama.

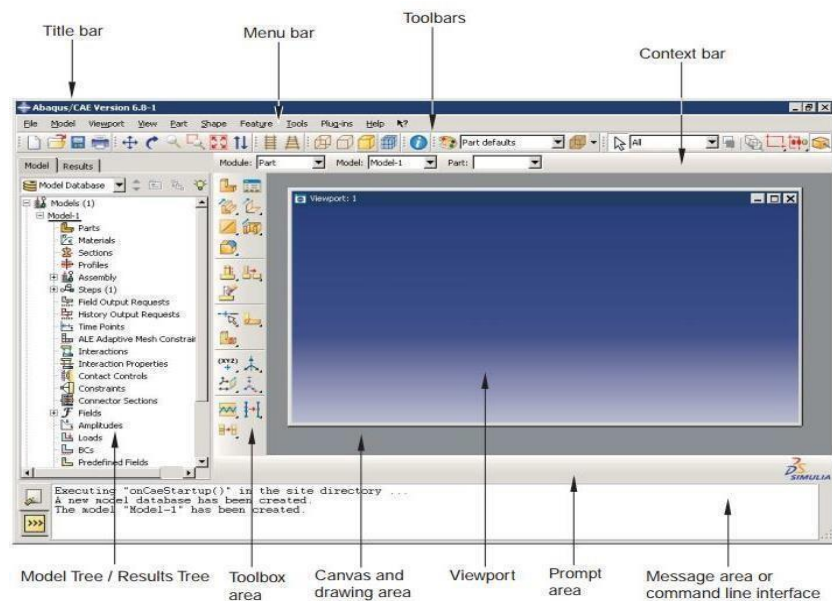
b. Simulasi (Simulation)

Simulasi yang dijalankan adalah program Abaqus CAE dengan pemecahan masalah numerik yang diidentifikasi dalam model. Luaran dari simulasi yang diinginkan yaitu stress analisis termasuk perpindahan dan tekanan yang disimpan dalam berkas biner untuk proses akhir.

c. Proses Akhir (Post Processing)

Pada proses akhir dilakukan pengambilan kesimpulan dari hasil simulasi yang telah melalui proses simulasi. Hasil akhir dituliskan dalam suatu laporan atau sebuah catatan.

2.4.4 Komponen pada Windows Utama Abaqus CAE



Gambar 2. 9: Komponen pada windows utama program Abaqus CAE (Sumber: Abaqus handout)

Komponen utama pada software Abaqus CAE dapat dilihat sesuai dengan Gambar 2.4.

a. Title Bar

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

b. Menu Bar

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

c. Toolbars Tools

Toolbars Tools ini memberikan akses cepat yang tersedia pada menu

d. Context bar

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

e. 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 data base dan Spesifik data hasil plot x-y.

f. Toolbox area

Toolbox area ini Memungkin akses cepat ke banyak fungsi modul yang tersedia.

g. Canvas and drawing area

Canvas and drawing area adalah tempat atau lokasi untuk area gambar

h. Viewport

Viewport adalah jendela di area gambar dimana Abaqus CAE menampilkan model yang telah dibuat.

i. Prompt area

Prompt area berfungsi untuk menampilkan petunjuk atau panduan yang telah kita lakukan pada software Abaqus CAE.

j. Message Area or command line interface

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