

**ANALISIS KEMAMPUAN PENYERAPAN ENERGI MATERIAL
ALUMINIUM FOAM SEBAGAI PENGISI KOMPONEN FENDER KAPAL
LAUT**

***ANALYSIS OF THE ENERGY ABSORPTION ABILITY OF ALUMINUM
FOAM MATERIAL AS A FILLER OF MARINE SHIP FENDER
COMPONENTS***



ZULFHIS SHARA FIRSTYAWATY

D022192001

**PROGRAM PASCASARJANA
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

GOWA

2022

Analisis Kemampuan Penyerapan Energi Material Aluminium Foam
Sebagai Pengisi Komponen Fender Kapal Laut

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Mesin / Konstruksi Mesin

Disusun dan diajukan oleh

Zulfhis Shara Firstiawaty D022192001

Kepada

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK SEKOLAH

PASCASARJANA UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

LEMBAR PENGESAHAN

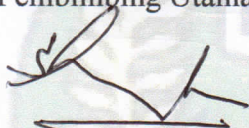
ANALISIS KEMAMPUAN PENYERAPAN ENERGI MATERIAL ALUMINIUM FOAM SEBAGAI PENGISI KOMPONEN FENDER KAPAL LAUT

Disusun dan diajukan oleh
ZULFHIS SHARA FIRSTIAWATY
D022192001

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
pada tanggal 11 Januari 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama


Prof. Ir. H. Ilyas Renreng, M.T
NIP. 195709141987031001

Pembimbing Pendamping


Fauzan, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197701032008011009


Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin


Dr. Hairul Arsyad, ST., MT.
NIP. 197503222002121001


Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin


Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT.
NIP. 196012311986091001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Zulfhis Shara Firstiawaty

Nomor Induk Mahasiswa : D022192001

Program Studi : Teknik Mesin/Konstruksi Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Januari 2022

Yang menyatakan,



(Zulfhis Shara Firstiawaty)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kepada kehadiran Allah SWT atas anugerah, taufik, hidayah dan inayah-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga skripsi dengan judul **“Analisis Kemampuan Penyerapan Energi Material Aluminium Foam Sebagai Pengisi Komponen Fender Kapal Laut”** ini dapat diselesaikan pada tepat waktunya. Shalawat serta salam atas junjungan Nabiullah Muhammad SAW, panutan yang telah membawa kita dari zaman kuda berkaki empat hingga kuda beroda empat. Thesis ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Semoga adanya Thesis ini dapat memberikan manfaat bagi khazanah pengetahuan ilmu teknik mesin untuk pengembangan keilmuan di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak selama menyelesaikan skripsi ini, thesis ini tidak akan mungkin dapat penulis selesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan rasa hormat dan terimakasih sedalam-dalamnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Irvan Hamka dan Anita Rahman serta saudara(i), Zaldy Ali Akbar dan Zalsha Aisyah Yuniar yang selalu mendampingi dan mendoakan.
2. Prof.Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, M.A. selaku rektor Universitas Hasanuddin.

3. Dr.Eng. Jalaluddin, S.T., M.T selaku Ketua Departemen Teknik Mesin.
4. Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T selaku Ketua Program Studi S-2 Teknik Mesin.
5. Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT., selaku Dosen Pembimbing I yang juga telah memberikan waktu, arahan, dan masukan selama proses pengerjaan thesis ini.
6. Fauzan, ST., MT., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu, arahan, dan masukan ditengah kesibukannya untuk proses pengerjaan thesis ini.
7. Bapak/Ibu Dosen Fakultas Teknik Departemen Teknik Mesin atas bimbingan dan arahan, didikan, serta motivasi yang telah diberikan selama 2 tahun terakhir ini.
8. Seluruh staf dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuannya selama penulis menempuh perkuliahan terutama kepada staf Departemen Teknik Mesin Ibu Sita, Pak Iwan, dan Pak Mansur.
9. Ketua dan Anggota Bawaslu Kota Palopo, Koordinator Sekretariat dan Jajaran Staf Bawaslu Kota Palopo yang telah memberikan dukungan selama penulis menempuh perkuliahan.
10. Teman-teman seperjuangan Magister Mesin '192 yang telah menjadi saudara selama di bangku perkuliahan.

11. Dan kepada sahabat 911-Emergency Call, Mekatronik PNUP '14 dan berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, penulis ucapkan terimakasih atas kehangatan, bantuan, dan doa yang diberikan.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan ini masih belum sempurna. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan thesis ini. Semoga thesis ini bermanfaat bagi semua pihak.

Gowa, Januari 2022

Penulis,

Zulfhis Shara Firstiawaty

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	6
BAB I	15
PENDAHULUAN.....	15
1.1 Latar Belakang	15
1.2 Rumusan Masalah	17
1.3 Tujuan Penelitian.....	18
1.4 Batasan Penelitian	18
1.5 Manfaat Penelitian.....	19
BAB II	20
TINJAUAN PUSTAKA	20
2.1 Keselamatan Pelayaran	20
2.2 Fender	22
2.4 Uji Impak.....	28
2.5 Crashworthiness.....	29
2.7 Tegangan Von Misses	37
2.8 Optimasi Menggunakan Metode Taguchi.....	38
BAB III	42
METODE PENELITIAN	42
1.1 Metodologi Penelitian.....	42
1.2 Alat dan Bahan.....	44
1.3 Software Abaqus.....	47
1.4 Software Minitab	65
1.5 Waktu dan Tempat Penelitian	71
BAB IV.....	73
HASIL PEMBAHASAN	73
4.1 Hasil Uji Tarik	73
4.2 Hasil Uji Tekan	75

4.3	Hasil Simulasi Pembebanan Aksial	76
4.4	Hasil Pengujian Eksperimen	95
4.5	Optimasi menggunakan Metode Taguchi.....	101
BAB V		108
PENUTUP		108
5.1	Kesimpulan.....	108
5.2	Saran	109
DAFTAR PUSTAKA.....		110
Lampiran I		113
Design Model Fender		113
Lampiran II		114
Hasil Uji Tarik 1.....		114
Lampiran III		119
Hasil Uji Tekan Spesimen Fender Foam		119
Lampiran IV.....		127
Tabel perbandingan Gaya terhadap Perpindahan		127

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Struktur fender sebagai komponen keselamatan pada kapal laut (sumber : Z.Jiang M.Gu/Materials and Design 31,2010).....	16
Gambar 2. 1 Foam rongga tertutup dan Foam rongga terbuka (sumber : Chun Huo, 2013)	26
Gambar 2. 2 Grafik distribusi penggunaan Logam Foam (Sumber : survey national physical laboratory UK)	27
Gambar 3. 1 Spesimen Almunium Foam	45
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	43
Gambar 3. 3 Spesimen Uji Tarik	46
Gambar 3. 4 Model dengan Variasi Penampang	47
Gambar 3. 5 Tampilan part pada Abaqus CAE	50
Gambar 3. 6 Spesifikasi part Lower plate (kiri), dan Top plate (kanan)...	51
Gambar 3. 7 Tampilan global seeds pada Abaqus CAE Kemudian klik apply dan selanjutnya konfigurasi sesuai Gambar 3.8.....	53
Gambar 3. 8 Tampilan mesh control pada Abaqus CAE Kemudian kembali pada module: mesh dan mesh part.....	54
Gambar 3. 9 Tampilan panel interaction pada Abaqus CAE.....	55
Gambar 3. 10 Tampilan panel Create interaction pada Abaqus CAE.....	55
Gambar 3. 11 Tampilan panel Edit interaction pada Abaqus CAE	56
Gambar 3. 12 Tampilan panel Contact property pada Abaqus CAE	57

Gambar 3. 13	Tampilan panel boundary condition-1 pada Abaqus CAE	57
Gambar 3. 14	Tampilan panel boundary condition-2 pada Abaqus CAE	58
Gambar 3. 15	Tampilan panel predefined fields pada Abaqus CAE.....	59
Gambar 3. 16	Tampilan panel field output request (stresses) pada Abaqus CAE	60
Gambar 3. 17	Tampilan panel field output request (strain) pada Abaqus CAE	60
Gambar 3. 18	Tampilan panel field output request (displacement) pada Abaqus CAE	61
Gambar 3. 19	Tampilan panel field output request (forces) pada Abaqus CAE	61
Gambar 3. 20	Tampilan panel field output request (contact) pada Abaqus CAE	62
Gambar 3. 21	Tampilan panel field output request (volume) pada Abaqus CAE	62
Gambar 3. 22	Tampilan panel history output request (energy) pada Abaqus CAE	63
Gambar 3. 23	Tampilan panel step pada Abaqus CAE.....	64
Gambar 3. 24	Tampilan panel job pada Abaqus CAE.....	64
Gambar 3. 25	Tampilan panel job manager pada Abaqus CAE	65
Gambar 4. 1	Perbandingan spesimen (bahan uji).....	75
Gambar 4. 2	Hasil simulasi pembebanan aksial impactor 50 Kg	78
Gambar 4. 3	Hasil simulasi pembebanan aksial impactor 75 Kg	79
Gambar 4. 4	Hasil simulasi pembebanan aksial impactor 100 Kg	81

Gambar 4. 5 Hasil simulasi pembebanan aksial impaktor 125 Kg	82
Gambar 4. 6 Hasil simulasi pembebanan aksial impaktor 150 Kg	84
Gambar 4. 7 Kurva Jarak Penekanan terhadap Waktu dengan impaktor 50 Kg	86
Gambar 4. 8 Gaya Puncak pada Grafik Gaya terhadap Perpindahan dengan Impaktor 50Kg	87
Gambar 4. 9 Kurva Gaya terhadap Perpindahan variasi FDF dengan Impaktor 50 Kg.....	88
Gambar 4. 10 Persentase Serapan Energi Spesifik	94
Gambar 4. 11 (a) Proses CNC Foam (b) Foam yang sudah terbentuk ...	97
Gambar 4. 12 (a) Spesimen Fender sebelum pengujian tekan (b) Spesimen sementara proses pengujian (c) Spesimen setelah pengujian tekan	98
Gambar 4. 13 Grafik Hasil Pengujian Eksperimen	99
Gambar 4. 14 Hasil simulasi dengan menggunakan abaqus (kiri), hasil Eskperimen (kanan).....	99
Gambar 4. 15 Grafik respon SNR Larger is better.....	106

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik aluminium foam	24
Tabel 2. 2 Standar orthogonal array	40
Tabel 3. 1 Spesifikasi spesimen uji tarik aluminium.....	46
Tabel 4. 1 Hasil uji tarik.....	73
Tabel 4. 2 Hasil Analisa uji tarik.....	74
Tabel 4. 3 Hasil Analisa Uji Tekan	75
Tabel 4. 4 Massa tiap-tiap variasi Fender	85
Tabel 4. 5 Nilai TEA variasi Fender dengan Impaktor 50 Kg.....	88
Tabel 4. 6 Nilai SEA dengan Impaktor 50 Kg.....	89
Tabel 4. 7 Nilai Fmean dengan Impaktor 50 Kg.....	89
Tabel 4. 8 Nilai CFE dengan Impaktor 50 Kg.....	90
Tabel 4. 9 Parameter Penyerapan energi pada fender dengan variasi impaktor 50 kg	91
Tabel 4. 10 Parameter Penyerapan Energi pada Fender dengan Variasi Impaktor 75 kg	91
Tabel 4. 11 Parameter Penyerapan Energi pada Fender dengan Variasi Impaktor 100 kg	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 12 Parameter Penyerapan Energi pada Fender dengan Variasi Impaktor 125 kg	92
Tabel 4. 13 Parameter Penyerapan Energi pada Fender dengan Variasi Impaktor 150 kg	92
Tabel 4. 14 (a) Proses Pelelehan Almunium (b) Proses Pencetakan (c) Proses Facing (d) Spesimen Fender	96
Tabel 4. 15 Perbandingan antara pengujian sebelumnya dengan simulasi Abaqus	101
Tabel 4. 16 Orthogonal Array L25(5 ²)	102
Tabel 4. 17 Nilai faktor dan level rancangan percobaan.....	103
Tabel 4. 18 Nilai respon sesuai pengujian variasi faktor dan level.....	104

Tabel 4. 19 Hasil Analisa dengan Metode Taguchi.....	105
---	-----

ABSTRAK

Zulfhis Shara Firstiawaty, Analisis kemampuan penyerapan energi material Aluminium Foam sebagai pengisi Komponen Fender Kapal Laut, dibimbing oleh **Ilyas Renreng** dan **Fauzan**.

Dalam dunia pelayaran, fender adalah bumper yang digunakan untuk mengurangi benturan yang terjadi pada saat kapal hendak sandar atau pada saat kapal ditambatkan oleh gelombang atau arus yang terjadi di pelabuhan. Untuk dapat meredam, fender harus memiliki daya serap energi yang tinggi dan gaya reaksi yang rendah. Oleh karena itu, Fender umumnya terbuat dari karet, busa elastomer, atau plastik. Dalam penelitian ini, kami bertujuan untuk menguji pengaruh Aluminium Foam sebagai salah satu Komponen Fender Kapal dan untuk mengukur apakah busa benar-benar berfungsi untuk dumping dan membantu fender untuk mengurangi gaya. Seolah-olah aluminium berfungsi, itu bisa menjadi inovasi baru untuk desain Fender karena menggunakan bahan aluminium dapat memperpanjang umur fender, mengurangi biaya penggantian dan perawatan. Penelitian ini mengkaji 6 variasi penampang fender yang telah ditambahkan busa. Pengujian fender dilakukan dengan menguji crashworthiness dan impact dari masing-masing model fender menggunakan software Abaqus. Berdasarkan hasil simulasi, Aluminium Foam berperan dalam mengurangi tekanan yang ditimbulkan oleh beban. Sebagai karakteristik Aluminium foam memiliki daya serap energi yang tinggi dengan berat jenis yang rendah menggunakan analisis elemen hingga. Kesimpulannya, Fender berisi busa menunjukkan tegangan konstan yang dapat menyerap tingkat energi yang lebih tinggi daripada Fender kosong.

ABSTRACT

Zulfhis Shara Firstiawaty, Analysis of the Energy Absorption ability of Aluminum Foam material as a filler for Marine Fender Components, supervised by **Ilyas Renreng** and **Fauzan**.

In shipping, a fender is a bumper that is used to reduce collisions that occur when the ship is about to dock or when the ship is moored by waves or currents that occur in the port. To be able to damp, fenders should have high energy absorption and low reaction force. Therefore, Fenders are generally made of rubber, elastomeric foam, or plastic. In This research, we aimed to examine the effect of Aluminium Foam as one of Fender Ship's Components and to measure if foam actually works for dumping and help fender to reduce force. As if aluminium works, it can be new innovation for Fender's design because using aluminium means can Extends fender life, reduces replacement and maintenance costs. This research examines 6 variations of the cross-section of the fenders to which foam have been added. Fenders testing is done by testing the crashworthiness and impact of each fender model using Abaqus software. Based on the simulation result, Aluminium Foam plays a role in reducing the pressure generated by the load. As the characteristic of Aluminium foam has high energy absorption with low specific gravity using finite element analysis. In conclusion, Foam filled fenders exhibit constant stress which can absorb higher energy levels than an empty fender.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tuntutan masyarakat untuk transportasi laut yang aman semakin meningkat yang bertujuan untuk mengurangi risiko kehilangan nyawa manusia dengan meminimalkan kerusakan yang disebabkan oleh tabrakan kapal lain atau tabrakan pada dermaga (Tornqvist, 2003). Upaya pencegahan dan antisipasi tabrakan untuk mencegah kerusakan atau kebocoran pada kapal dengan mendesain struktur yang aman. Pada saat kapal tertabrak kapal lain atau menabrak dermaga, berupa deformasi yang besar pada struktur kapal yang menyebabkan kerusakan atau pecah pada sisi lambung kapal. Dengan demikian penting untuk mendesain komponen keamanan yang handal dengan mengevaluasi respon struktur lambung dengan menggunakan metode *crashworthiness* pada struktur kapal. Oleh karena itu, dalam mendesain konstruksi kapal laut seharusnya dilengkapi komponen keselamatan seperti fender. Fender berfungsi sebagai peredam benturan dimana material yang digunakan adalah kayu, karet, baja dan pneumatik. Salah satu material yang memiliki daya serap energi tinggi akibat benturan atau impak adalah komposit dari bahan aluminium foam (*foam*).



Gambar 1. 1 Struktur fender pada kapal laut (sumber : Z.Jiang
M.Gu/Materials and Design 31,2010)

Penambatan kapal ke dermaga merupakan tahapan terakhir dari proses navigasi pelayaran laut. Selama berlabuh kapal dapat terjadi benturan pada sandar dan akibatnya timbulnya energi pada perangkat fender kapal - sistem sandar. Nilai energi yang terlampaui dapat menyebabkan kerusakan salah satu elemen ini dan menyebabkan kecelakaan. Kecelakaan tersebut dapat terjadi sebagai kejadian yang tidak diinginkan dengan konsekuensi negatif seperti kerusakan kapal dan struktur pelabuhan. Fender adalah alat untuk melindungi struktur pelabuhan dan kapal dari kerusakan dengan cara menyerap energi kinetik kapal saat sandar kapal ke dermaga atau dermaga. Untuk penelitian ini performansi sistem fender dianalisis dengan menggunakan model analisis taguchi. Metode taguchi digunakan untuk menganalisis kinerja dan menemukan nilai optimum sistem fender saat mengalami beban benturan akibat tabrakan kapal. Pemilihan sistem fender yang paling efisien didasarkan pada prinsip penyerapan energi sistem terhadap beban impak, tegangan dan analisis defleksi. (Muhammad Zikra dkk, 2016).

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (Ordinary Differential Equation) maupun persamaan diferensial parsial (Partial Differential Equation). Karna persamaan differensial seringkali digunakan sebagai model permasalahan keteknikan maka penting bagi para insinyur untuk dapat memahami dan mampu menerapkan MEH. Saat ini MEH merupakan salah satu metode numerik paling serbaguna untuk memecahkan masalah dalam domain yang berkesinambungan.

Pada penelitian ini menganalisis kemampuan penyerapan energi material Aluminium Foam sebagai komponen Fender Kapal Laut menggunakan metode elemen hingga dan optimasi dengan metode Taguchi.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini ialah:

1. Menganalisis kemampuan menyerap energi pada fender terisi foam secara simulasi dengan variasi bentuk penampang.
2. Memvalidasikan hasil simulasi Abaqus dengan membandingkan hasil eksperimen.
3. Menentukan nilai optimum penyerapan energi dari fender dengan menggunakan Metode Taguchi.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini ialah:

1. Untuk menganalisis kemampuan menyerap energi pada fender terisi foam secara simulasi dibawah pembebanan aksial dengan variasi bentuk penampang.
2. Untuk memvalidasikan hasil simulasi dengan membandingkan hasil simulasi Abaqus dengan hasil eksperimen.
3. Untuk menentukan nilai optimum penyerapan energi dari fender dengan menggunakan Metode Taguchi.

1.4 Batasan Penelitian

Pada penelitian ini penulis membatasi hal-hal berikut :

1. Perhitungan Penyerapan Energi masing-masing model fender dengan penambahan Almunium Foam
2. Memvalidasi hasil simulasi fender berisi almunium foam
3. Optimasi model fender menggunakan Metode Taguchi
4. Jenis almunium paduan pada dinding fender adalah AL-6061
5. Jenis foam yang digunakan adalah close sell foam dengan diameter sekitar 50mm
6. Standar pengujian tekan fender uji tekan dengan kecepatan 5mm/min

1.5 Manfaat Penelitian

Diharapkan dari hasil penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai nilai penyerapan energi dan optimasi dari variasi bentuk penampang material aluminum foam sebagai komponen fender kapal laut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Keselamatan Pelayaran

Keselamatan pelayaran Peraturan *Safety Of Life At Sea* (SOLAS) adalah peraturan yang mengatur keselamatan maritim paling utama dengan tujuan untuk meningkatkan jaminan keselamatan hidup di laut yang dimulai sejak 1914, mengingat, saat itu, di mana-mana banyak terjadi kecelakaan kapal yang menelan banyak korban jiwa. Pada tahap permulaan, dimulai dengan fokus pada peraturan kelengkapan navigasi, kekedapan dinding penyekat kapal serta peralatan berkomunikasi, kemudian berkembang pada konstruksi dan peralatan lainnya. Modernisasi peraturan SOLAS sejak 1960, adalah menggantikan Konvensi 1918 dengan SOLAS 1960. Sejak saat itu, peraturan mengenai desain untuk meningkatkan faktor keselamatan kapal mulai dimasukkan seperti: Desain konstruksi kapal, Permesinan dan instalasi listrik, Pencegah kebakaran, Alat-alat keselamatan, Alat komunikasi dan keselamatan navigasi. Adapun, usaha penyempurnaan peraturan tersebut dengan cara mengeluarkan peraturan tambahan (amandement) hasil konvensi IMO, yang dilakukan secara berturut-turut pada 1966, 1967, 1971 dan 1973. Namun, usaha untuk memberlakukan peraturan-peraturan tersebut secara internasional kurang berjalan sesuai dengan yang diharapkan, terutama karena hambatan prosedural, yaitu: diperlukannya persetujuan 2/3 dari jumlah negara anggota untuk meratifikasi peraturan dimaksud, ternyata sulit dicapai pada

waktu yang diharapkan. Selanjutnya, pada rentang 1974, dibuat konvensi baru SOLAS 1974, yakni pada setiap amandemen diberlakukan sesuai target waktu yang sudah ditentukan, kecuali ada penolakan dari 1/3 jumlah negara anggota atau 50 % dari pemilik tonnage yang ada di dunia. (Suryani, Pratiwi, Sunarji, & Hendrawan, 2018)

Dalam pengoperasian kapal ditemukan banyak sekali pekerjaan-pekerjaan baik yang ringan maupun berat yang memiliki tingkat resiko kecelakaan kerja yang cukup tinggi. Dalam penelitian ini penulis mengamati sering terjadinya kecelakaan kerja awak kapal, Dengan mengungkapkan faktor-faktor yang menjadi penyebab terjadinya kecelakaan pada awak kapal sewaktu bekerja, dan akibat yang timbul karena kecelakaan tersebut, serta upaya yang harus dilakukan untuk mengurangi resiko kecelakaan kerja bagi awak kapal. (Tjahjanto & Aziz, 2016)

Perangkat keselamatan pada kapal terbagi menjadi dua yaitu *active safety*, dan *passive safety*. Perkembangan seperti kebijakan keselamatan pelayaran sangat penting saat ini. Kebanyakan perkembangan tersebut mengacu kepada *passive safety*, yaitu, perangkat yang dapat meminimalisir kerusakan yang terjadi pada kapal saat terjadi kecelakaan, sebagai kebalikan dari *active safety*, yang merupakan, perangkat pendukung yang dapat membuat kapal terhindar dari kecelakaan. (Harilaos, 2002)

2.2 Fender

Fender adalah bumper yang digunakan untuk meredam benturan yang terjadi pada saat kapal akan merapat ke dermaga atau pada saat kapal yang sedang ditambatkan tergoyang oleh gelombang atau arus yang terjadi di pelabuhan. (Derry, 2016)

Untuk mampu melakukan peredaman, fender biasanya memiliki daya serap energi yang tinggi dan gaya reaksi yang rendah. Fender umumnya terbuat dari karet, foam elastomer, atau plastik. Jenis fender yang digunakan tergantung pada banyak variabel, antara lain ukuran dan berat kapal, stand-off maksimum yang diizinkan, struktur kapal, variasi pasang-surut, dan kondisi tempat tertentu lainnya. Ukuran fender didasarkan pada energi kapal saat berlabuh yang berhubungan dengan ketepatan kecepatan berlabuh. (www.sispro.co.id, 2017)

Fender pada kapal biasanya terbuat dari kayu, karet pejal, ban bekas, pipa baja setengah lingkaran, ataupun juga steel H Beam. Fender kayu bisa berupa batang kayu yang dipasang di depan muka dermaga atau tiang kayu yang dipancang. Saat ini fender kayu sudah tidak banyak digunakan, mengingat harga kayu tidak lagi murah dan masalah lingkungan yang muncul dengan penebangan pohon. Kecuali untuk pelabuhan kecil di daerah Sumatera, Kalimantan, dan Papua dimana masih tersedia cukup banyak kayu. Fender karet yang merupakan produk pabrik semakin banyak digunakan karena kualitasnya lebih baik dan banyak tersedia di pasaran dengan berbagai tipe. Sesuai dengan penjelasan di atas, maka perlu diperhatikan bahwa:

- Marine fender / fender kapal ini memiliki fungsi dan kegunaan yang sangat tinggi.
- Sistem dan pemakaian marine fender ini harus memiliki fungsi dan kemampuan untuk menghentikan pergerakan atau tumbukan kapal ke dermaga atau mungkin ke kapal lain dengan lembut tanpa menyebabkan kerusakan pada kapal dan struktur bangunan pada dermaga.
- Marine fender / fender kapal harus tetap kuat untuk bisa mengamankan kapal-kapal yang berlabuh, dermaga, dan area bangunan di sekitarnya. Dermaga dan bangunan harus tetap dalam kondisi baik dan tidak sampai mengalami kerusakan lanjutan yang mungkin disebabkan oleh adanya gelombang, gerakan angin, pasang surut air laut, perubahan arus, proses pembongkaran dan pengisian barang pada kapal.
- Dengan teknik pemasangan yang tepat diharapkan fender kapal tersebut tetap dalam kondisi yang bagus dan bisa bertahan lama.

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 (foam). (Shaik, 2010)

Aluminium foam Material ini 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 12 terowongan dan sebagai bahan pelindung kebakaran dan sistem perlindungan struktur terhadap ledakan.

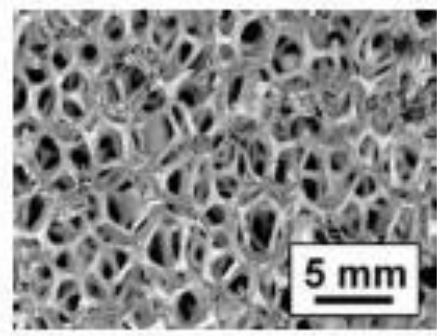
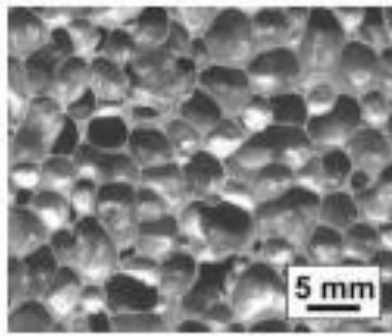
Tabel 2. 1 Karakteristik aluminium foam (sumber : simancik dkk, 1997)

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

Resistivitas Massal	2.84 x 10 ⁻⁵ ohm - in	(7.2 x 10 ⁻⁵ ohm-cm)
Titik Lebur	1220°F	(660°C)

Porositas didefinisikan sebagai persentase ruang kosong dalam padatan (Ashby et al., 2000). Bahan berpori juga sering disebut sebagai padatan seluler (cellular solid), yang berarti gabungan sel/kompartemen/rongga dengan tepi padat atau sisi permukaan tertutup atau terbuka. Bahan-bahan ini sangat umum di alam, contoh : kayu, gabus, spons dan karang. 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, metallic foam dapat diklasifikasikan menjadi dua 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.

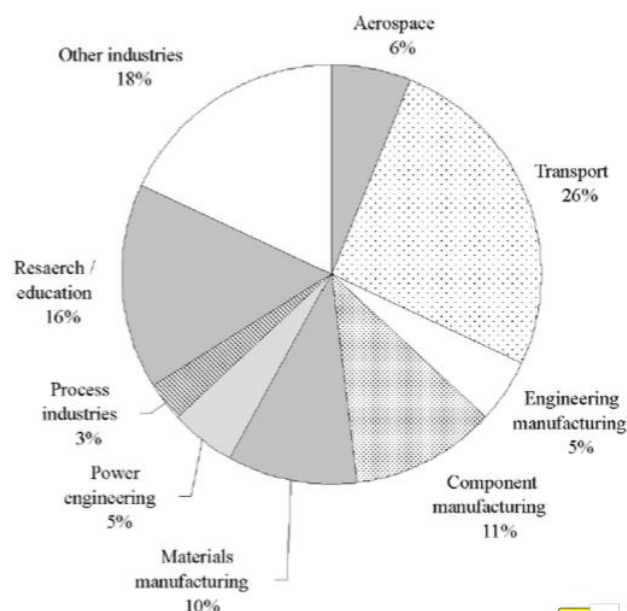


Gambar 2. 1 Foam rongga tertutup dan Foam rongga terbuka (sumber :
Chun Huo, 2013)

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). 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 modus 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).

Sektor industri telah banyak menggunakan logam foam ini karena kebutuhan dan ditunjang beberapa faktor seperti tersedianya biaya manufaktur dan lingkungan yang cocok. Prediksi di masa mendatang akan mengalami krisis bahan bakar, berbagai industri yang memproduksi kendaraan penumpang mengembangkan penemuan guna meningkatkan efisiensi bahan bakar yang tidak mengesampingkan keselamatan penumpang dan salah satu yang sedang trend sekarang ini yakni penggunaan material konstruksi yang sangat ringan yang mengacu pada penggunaan logam foam. Berikut adalah ilustrsi distribusi penggunaan logam foam berdasarkan survey national physical laboratory (UK).



Gambar 2. 2 Grafik distribusi penggunaan Logam Foam (Sumber : survey national physical laboratory UK)

2.4 Uji Impak

Uji impak adalah pengujian dengan menggunakan pembebanan yang cepat (rapid loading). Pada uji impak terjadi proses penyerapan energi yang besar ketika beban menumbuk spesimen. Energi yang diserap material ini dapat dihitung dengan menggunakan prinsip perbedaan energi potensial. Prinsip pengujian impak ini adalah menghitung energi diserap oleh spesimen. Pada saat beban dinaikkan pada ketinggian tertentu, beban memiliki energi potensial maksimum, kemudian saat akan menumbuk spesimen, energi kinetik mencapai maksimum. Energi kinetik maksimum tersebut akan diserap sebagian oleh spesimen hingga spesimen tersebut patah. (Yunus M. dkk, 2016)

Menurut Dieter (1988) uji impak digunakan dalam menentukan kecenderungan material untuk rapuh atau ulet berdasarkan sifat ketangguhannya. Uji ini akan mendeteksi perbedaan yang tidak diperoleh dari pengujian tegangan regangan. Hasil uji impak juga tidak dapat membaca secara langsung kondisi perpatahan batang uji, sebab tidak dapat mengukur komponen gaya-gaya tegangan tiga dimensi yang terjadi pada batang uji. Hasil yang diperoleh dari pengujian impak ini, juga tidak ada persetujuan secara umum mengenai interpretasi atau pemanfaatannya.

Kepekaan terhadap patah getas adalah masalah besar pada konstruksi baja. Bila patah getas ini terjadi pada baja dengan daya tahan rendah, patahan tersebut dapat merambat dengan kecepatan sampai 2000

mm/detik, yang dapat menyebabkan kerusakan dalam waktu yang sangat singkat. Untuk menilai ketahanan material terhadap patah getas perlu adanya pengujian yang juga mempertimbangkan faktor-faktor dinamis yang dapat mempengaruhi patah getas antara lain kecepatan regang, takik, tebal pelat, tegangan sisa dan lain-lain. Ketangguhan (impak) merupakan ketahanan bahan terhadap beban kejut. Inilah yang membedakan pengujian dampak dengan pengujian tarik dan kekerasan dimana pembebanan dilakukan secara perlahan-lahan. (Jumadi dkk, 2017)

2.5 Crashworthiness

Crashworthiness adalah kemampuan kendaraan untuk menyerap energi benturan dan melindungi penumpang kendaraan pada saat terjadi kecelakaan. Dirancang dengan beberapa sistem pelindung yang bertujuan untuk meningkatkan kelayakan kendaraan. (Xiong dkk, 2015).

Crashworthiness merupakan kemampuan struktur pada kendaraan yang digunakan untuk mengurangi cedera pada penumpang saat terjadi kecelakaan. Crashworthiness mempunyai kriteria antara lain gaya tumbukan puncak (F_{max}), penyerapan energi spesifik (SEA), dan efisiensi gaya tumbukan (CFE). (Dionisius dkk, 2018)

2.5.1 Parameter *Crashworthiness*

Beberapa indikator kinerja telah dikembangkan untuk mengevaluasi efektivitas komponen perangkat penyerap energi yang diberikan untuk

aplikasi *crush*. Penyerap energi yang ideal akan mampu mencapai beban maksimum dengan segera dan mempertahankannya untuk seluruh panjang komponen. Tujuan untuk merancang perangkat penyerap energi yang efisien adalah untuk memaksimalkan langkahnya, untuk memiliki beban rata-rata yang setara dengan beban puncak, dan untuk memiliki kemampuan penyerapan energi spesifik yang tinggi. Berdasarkan (Pei, Nadiah, Aishah, & Nadiah, 2017), parameter-parameter ini didefinisikan sebagai berikut:

- Beban Maksimum (F_{maks})

Beban maksimum adalah beban tertinggi yang diperlukan untuk menyebabkan deformasi dan distorsi permanen yang signifikan pada suatu komponen. Penting untuk parameter *crashworthiness* karena dua alasan. Pertama, selama dampak kecepatan rendah dan energi rendah, diinginkan bahwa tidak ada deformasi permanen terjadi, karena ini akan dianggap kerusakan pada struktur. Kedua, beban puncak seringkali merupakan beban maksimum yang diamati pada langkah berguna perangkat penyerap energi karena memiliki pengaruh langsung pada struktur fender kapal.

- *Specific Energy Absorption (SEA)*

SEA atau penyerapan energi spesifik menunjukkan energi total yang diserap dalam tumbukan (*Total Energy Absorption, TEA*), dalam menghancurkan struktur sama dengan area di bawah kurva perpindahan beban. Dimana,

$$TEA = \int_0^{\delta} F \cdot \delta \quad (1)$$

Oleh karena itu, penyerapan energi spesifik didefinisikan sebagai energi yang diserap persatuan massa material seperti yang diberikan dalam persamaan 2.

$$SEA = \frac{TEA}{m} \quad (2)$$

Keterangan:

TEA : Total energy serap (Joule)

F : Energi serap (N)

δ : Jarak tempuh tekan (mm)

SEA : Energi serap spesifik (kJ/kg)

m : Berat tabung (kg)

- *Average Crush Load*

Average crush load juga dikenal sebagai beban rata-rata. Mean crush load (F_{mean}) didefinisikan sebagai energi yang diserap dibagi dengan jarak tempuh (ΔL).

$$F_{mean} = \frac{TEA}{\Delta L} \quad (3)$$

Ini adalah rasio energi yang diserap pada jarak tekan pada tabung yang diuji secara ditekan.

Keterangan:

F_{mean} : Gaya rata-rata (kN)

TEA : Total energy serap (Joule)

ΔL : Jarak tempuh tekan (mm)

- *Crush Force Efficiency (CFE)*

Rata-rata dan beban puncak adalah parameter penting yang harus ditentukan karena berkaitan langsung dengan perlambatan yang akan dialami oleh penghuni dalam kendaraan. Cara terbaik untuk mengukur ini adalah dengan menentukan rasio antara beban rata-rata dengan beban puncak. Dan rasio ini adalah efisiensi gaya tekan. Dalam penyerapan energi yang ideal ialah yang memiliki nilai crush force efficiency (CFE) sama atau hampir sama dengan 100% (Vinayagar & Senthil Kumar, 2017).

$$CFE = \frac{F_{mean}}{F_{peak}} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

CFE : Gaya tekan efisiensi (%)

F_{mean} : Gaya rata-rata (kN)

F_{maks} : Gaya maksimum (kN)

2.6 Metode Elemen Hingga (MEH)

Menurut Sharma (2018) , Metode elemen hingga adalah metode numerik yang memecah sistem kontinu menjadi sistem diskrit yang disebut elemen. MEH adalah metode yang kuat untuk memecahkan masalah rekayasa yang menantang karena memungkinkan penerapan kondisi batas untuk membuat model yang akurat yang memungkinkan studi dampak tabrakan. MEH digunakan untuk mensimulasikan tabrakan kendaraan

karena kerangka waktu peristiwa tersebut sangat kecil. Ini melibatkan perilaku nonlinier dan deformasi yang terjadi secara umum dalam skenario tabrakan

Susatio (2004) menyatakan bahwa metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis. Tipe masalah teknis dan matematika yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisis struktur dan kelompok masalah non-struktur. Masalah analisis struktur, meliputi analisis tegangan, buckling, dan analisis getaran. Sedangkan masalah non-struktur antara lain adalah perpindahan panas dan massa, mekanika fluida, serta distribusi dari potensial listrik. Menurut Purba dan Tarigan (2012), persoalan yang menyangkut geometri yang rumit terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini. Akibat adanya beban pada balok, akan mengakibatkan lendutan. Permasalahan ini dapat ditinjau dan diselesaikan dengan menghitungnya secara elemen hingga. Konsep yang mendasari metode elemen hingga menurut Bargess dkk (2009) adalah prinsip discretization. Discretization atau diskritisasi adalah membagi sesuatu menjadi bentuk yang lebih kecil dan penyatuan secara keseluruhan yang dapat menstimulir keadaan tersebut secara menyeluruh.

Katili (2008) menyebutkan bahwa struktur diskrit terbentuk dari gabungan elemen yang perilakunya diharapkan mewakili perilaku struktur

kontinu. Perilaku tiap elemen digambarkan dengan fungsi pendekatan yang mewakili peralihan dan tegangan yang akhirnya dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matrik.

Dikritisasi (discretization) merupakan proses pemodelan dari suatu objek dengan membagi kedalam elemen-elemen kecil (finite elemen) yang dihubungkan oleh titik-titik (nodes) yang digunakan oleh elemen-elemen tersebut dan juga sebagai batasan dari objek tersebut. Didalam metode elemen hingga persamaan yang diperoleh dari seluruh sistem kemudian dibentuk dari penggabungan persamaan elemen-elemennya. Misalnya, untuk masalah struktur penyelesaian yang diperoleh digunakan untuk mencari besarnya deformasi (displacement) pada tiap titik (nodes) pada suatu objek, kemudian digunakan untuk memperoleh nilai besar tegangan (stress) dan regangan (strain). Untuk masalah bukan struktur. (etsworlds.id, 2018)

Model elemen hingga dikembangkan dengan mempertimbangkan pendekatan yang disarankan oleh (Ellis, E., & Springman, S. 2001.) dari pengujian lapangan pengaturan oleh (Rollins, K. M., & Cole, R. T. 2006.), yang menyelidiki siklus perilaku beban lateral tiang, pile cap dan backfill. Model yang menggunakan paket OASYS SAFE dikembangkan untuk mereplikasi pengujian lapangan ini dilaporkan. Secara umum efisiensi komputasi elemen hingga adalah dipengaruhi oleh jumlah elemen yang dipertimbangkan. (Thevaneyan K. David)

Analisis elemen hingga dan desain optimasi yang dilakukan untuk menganalisa respons kuasi statis. Dalam investigasi kemampuan

crashworthiness, beberapa aspek dipertimbangkan untuk variasi parameter geometri tabung dan kondisi pembebanan untuk menyelidiki kemampuan crashworthiness. (Fauzan, 2016)

Menurut (Genikomsou,2015) dalam penelitian modern dalam rekayasa struktural, analisis elemen hingga (FEA) sangat penting untuk melengkapi eksperimental penelitian dalam memberikan wawasan perilaku struktural, dan, dalam kasus yang disajikan di sini, pada mekanisme transfer geser meninju. FEA nonlinier dapat menunjukkan pembentukan dan perambatan retak, defleksi, kemungkinan mekanisme kegagalan dan melengkapi pengamatan eksperimental, di mana pengukuran uji tidak diketahui. Namun, kompleksitas model elemen hingga nonlinier melekat karena berbagai teori yang digunakan dalam pemodelan material, pemilihan elemen dan prosedur solusi yang termasuk dalam model ini. Banyak model konstitutif yang berbeda telah digunakan dalam simulasi elemen hingga, antara lain yang paling dikenal adalah: elastisitas nonlinier, plastisitas, mekanik kerusakan dan model kerusakan dan plastisitas berpasangan.

Disis lain, (Ginar. E. Sukumar) mengembangkan *extended finite element method* dalam simulasi komputasi dengan software abaqus. Dibandingkan dengan metode elemen hingga klasik, X-FEM memberikan manfaat yang signifikan dalam pemodelan numerik dari perambatan retak. Dalam formulasi tradisional FEM, keberadaan retakan dimodelkan dengan mengharuskan retakan mengikuti tepi elemen. Sebaliknya, geometri retak pada X-FEM tidak perlu disejajarkan dengan tepi elemen, yang

memberikan fleksibilitas dan keserbagunaan dalam pemodelan. Metode ini didasarkan pada pengayaan model FE dengan tambahan derajat kebebasan (DOFs) yang diikat ke node elemen yang berpotongan dengan retak. Dengan cara ini, diskontinuitas dimasukkan dalam model numerik tanpa memodifikasi diskritisasi, karena mesh dihasilkan tanpa memperhitungkan adanya retakan. Oleh karena itu, hanya diperlukan satu mata jaring untuk setiap panjang dan orientasi retakan. Selain itu, node di sekitar ujung retak diperkaya dengan DOF yang terkait dengan fungsi yang mereproduksi bidang LEFM asimtotik. Hal ini memungkinkan pemodelan diskontinuitas retak dalam elemen ujung retak dan secara substansial meningkatkan akurasi dalam perhitungan faktor intensitas tegangan (SIF).

Pengembangan pengujian simulasi numerik ini menggunakan Impact Transferability yang berfungsi untuk meneruskan gaya aksial dinamik yang terjadi saat tabrakan dimana mengoptimalkan hasil crashworthiness dengan pengujian eksperimental. Impact Transferability ini juga dapat dimodelkan sebagai ruang penumpang yang mempunyai kekakuan yang cukup tinggi dan dapat melindungi penumpang saat tabrakan. Dionisius, F. Istiyanto, J. , Suliono., & Rohmat, Y.N. (2016).

Cara kerja Impact Transferability adalah meneruskan gaya yang diberikan impaktor dimana mengakibatkan terjadinya deformasi pada specimen. Dari penjelasan sebelumnya dimana Impact Transferability mempunyai 2 bagian, maka permodelan elemen hingga hanya menyangkut impaktor, aktuator dan spesimen yang diberikan fix support. Untuk masalah struktur penyelesaian yang didapat adalah deformasi

(displacement) pada setiap nodes yang selanjutnya dapat digunakan untuk mendapatkan besaran teganga (strain) dan regangan (stress)

Notasi matriks gaya dinyatakan dalam $\{F\} = \underline{F}$ dan matriks displacement dalam $\{d\} = \underline{d}$

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{1z} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ . \\ . \\ . \\ F_{nx} \\ F_{ny} \\ F_{nz} \end{Bmatrix}; \quad \{d\} = \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{1z} \\ d_{2x} \\ d_{2y} \\ . \\ . \\ . \\ d_{nx} \\ d_{ny} \\ d_{nz} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Matriks kekakuan dinyatakan dalam $[k]$ dan matriks kekauan global sistem struktur diyantakan dalam $[K]$

$$[k] = \underline{k} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}; \quad [K] = \underline{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Sehingga, persamaan dalam sistem struktur dinyatakan dalam;

$$\underline{F} = \underline{K} \underline{d} \quad (7)$$

2.7Tegangan Von Misses

Teori atau tegangan von mises adalah teori kegagalan yang diperkenalkan oleh Huber pada tahun 1904 dan disempurnakan oleh von mises dan heckly. Teori tersebut menyatakan bahwa “sebuah kegagalan terjadi pada keadaan multiaksial apabila energy distorsi per unit volume

sama atau lebih besar dari energy distorsi per unit volume pada saat terjadinya kegagalan dalam pengujian unaksial sederhana terhadap specimen dari material yang sama". Kriteria luluh von mises mengisyaratkan bahwa luluh tergantung dari fungsi harga tegangan utama. Sehingga menghasilkan persamaan von mises sebagai berikut.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

Akan tetapi tegangan von mises juga dapat diisyaratkan bahwa distorsi energy dapat terjadi karena tegangan normal dan tegangan geser yang terjadi jika melihat dari komponen pembentukan nilai ketiga tegangan utama tersebut, maka didapat persamaan sebagai berikut.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}{2}} \quad (2)$$

Sehingga pada teori kegagalan von mises mengatakan lebih besar atau sama dengan kekuatan luluh (S_y) dari material. Maka material dinyatakan memiliki kekuatan struktur yang baik.

$$\sigma_{ms} \geq S_y \quad (3)$$

2.8 Optimasi Menggunakan Metode Taguchi

Metode Taguchi diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taghuchi (1940), merupakan metode statistik yang banyak diterapkan dalam bidang teknik dengan tujuan meningkatkan kualitas produk, proses dan menekan biaya serta sumber daya minimal. Sasaran metode Taguchi adalah menjadikan produk *robust* terhadap *noise*, sehingga sering disebut sebagai *Robust Design*.

Taguchi membedakan tiga desain proses selama proses produksi berupa desain sistem, desain parameter dan desain toleransi. Tahapan desain sistem membutuhkan pengetahuan mendalam mengenai sistem yang akan dirancang, desain parameter menentukan nilai nominal parameter produk atau proses optimal, desain toleransi menentukan nilai nominal yang telah ditentukan dalam desain parameter, toleransi merupakan variasi nilai nominal yang diperbolehkan dan dipengaruhi oleh taguchi *loss function* (Butler, 1992).

Desain Eksperimen Taguchi merupakan evaluasi sistematis dua atau lebih parameter terhadap kemampuan mempengaruhi rata-rata variabel hasil dengan tahapan identifikasi masalah, menentukan tujuan, menentukan metode pengukuran, identifikasi faktor, identifikasi faktor kontrol dan *noise*, menentukan level tiap faktor, pengukuran hasil. Dalam menentukan level jumlah derajat kebebasan menggunakan *orthogonal array* (matriks orthogonal). *Orthogonal array* merupakan matriks faktor dan level dimana elemen-elemen matriks disusun menurut baris dan kolom. Notasi *orthogonal array* adalah :

$$L_n(l^f) \quad (1)$$

dimana :

f = banyak factor kolom

l = banyak level

n = banyak pengamatan (baris)

L = rancangan orthogonal

Interaksi terjadi jika suatu faktor dipengaruhi oleh level dari faktor lain atau kumpulan pengaruh dari dua atau lebih faktor berbeda dari jumlah masing-masing faktor secara individu. Interaksi juga dipengaruhi oleh jumlah derajat kebebasan. Taguchi menentukan beberapa linear graph untuk mempermudah mengatur faktor-faktor dan interaksi yang terjadi dalam satu kolom, penggambaran linear graph berguna menentukan penempatan faktor-faktor serta interaksi pada kolom *orthogonal array*.

Pemilihan *orthogonal array* sesuai nilai faktor dan interaksi yang diharapkan serta nilai level masing-masing faktor, sehingga mempengaruhi total jumlah derajat kebebasan, untuk memasukkan faktor dan interaksi dalam *orthogonal array* menggunakan *linear graph* atau *triangular table*. *Linear graph* menunjukkan variasi kolom dimana faktor dapat dimasukkan dan evaluasi interaksi faktor sedangkan *triangular table* berisi semua kemungkinan interaksi antara faktor dan kolom.

Tabel 2. 2 Standar orthogonal array

2 Level	3 Level	4 Level	5 Level	Mixed-Level
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{16}(4^5)$	$L_4(5^6)$	$L_{18}(2^6 \times 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$		$L_{32}(2^6 \times 4^9)$
$L_{12}(2^{11})$	$L_{81}(3^{40})$			$L_{36}(2^6 \times 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$				$L_{36}(2^6 \times 3^{13})$

$L_{32}(2^{31})$	$L_{54}(2^6 \times 3^{25})$
$L_{64}(2^{63})$	$L_{50}(2^6 \times 5^{11})$

BAB III

METODE PENELITIAN

1.1 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan membuat simulasi beban aksial dengan tujuan untuk mendapatkan penampang terbaik dalam menyerap energi impact. Software yang digunakan dalam menganalisa spesimen ialah ABAQUS. Input data berupa sifat-sifat mekanik diperoleh dari uji tekan dan uji Tarik. Beban yang diberikan ialah beban aksial. Material spesimen yang digunakan ialah aluminium alloy 6061. Hasil yang didapatkan pada tahap pertama ini ialah diketahuinya penampang bentuk yang mana memiliki penyerapan energi terbaik.

Selanjutnya dilakukan simulasi pembebanan aksial model fender hasil penelitian lain dengan metode komputasi yang akan dibandingkan dengan metode simulasi model fender dengan variasi penampang. Hasil simulasi pada Abaqus akan dibandingkan dengan data hasil simulasi pada software LS DYNA. Material specimen yang digunakan fender pada hasil penelitian lain ini adalah *mild-steel*.

Data yang dihasilkan oleh simulasi model variasi fender akan dianalisa dan dioptimalkan. Selain itu grafik perbandingan total energy serap dan *displacement* yang dihasilkan akan ditampilkan untuk melihat perbandingan setiap variasi penampang. Data dari simulasi akan diolah melalui pengoptimasian menggunakan Metode Taguchi dan Analisis *One-Way Anova*. Software yang digunakan dalam optimasi nilai yang didapatkan