

**ANALISIS KELELAHAN RAMP DOOR
KAPAL FERRY RO-RO**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Menempuh Ujian Sarjana
Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknik
Universitas Hasanudin



Disusun Oleh :

INDAH PRIAYU OKTAJIYANTI

D311 16 020

DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2021

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam mengikuti seminar dan ujian akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Perkapalan Program Studi Strata Satu (S1) pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar

Judul Skripsi :

“ANALISIS KELELAHAN RAMP DOOR KAPAL FERRY RO-RO”

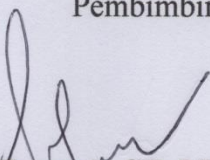
Disusun Oleh :

**INDAH PRIAYU OKTAJIYANTI
D311 16 020**

Gowa, Juli 2021

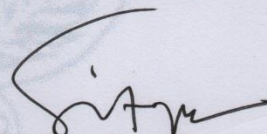
Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Pembimbing I



Hamzah, ST., MT
Nip. 19800618 200501 1 004

Pembimbing II



Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dip-Ing
Nip. 19600425 198811 1 001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin


Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT.
Nip. 19730206 200012 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : INDAH PRIAYU OKTAJIYANTI

NIM : D311 16 020

Program Studi : TEKNIK PERKAPALAN

Jenjang : S1 (STRATA SATU)

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

“ANALISIS KELELAHAN RAMPDOOR KAPAL FERRY RO-RO”

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

Gowa, 13 Juli 2021



Yang menyatakan

Indah Priayu Oktajiyanti

ABSTRAK

Oktajiyanti, Indah Priayu. 2021. “*Analisis Kelelahan Ramp Door Kapal Ferry Ro-Ro*” (dibimbing oleh **Hamzah** dan **Ganding Sitepu**)

Konstruksi *ramp door* akan menerima beban baik itu beban statis maupun dinamis selama masa pengoperasiannya dimana beban statis yang diterima akan menimbulkan masalah seperti deformasi dan keretakan, sedangkan beban dinamis yang terjadi secara terus menerus akan mengakibatkan kelelahan (*fatigue*). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan *rampdoor* serta titik paling rawan terjadi kelelahan dan mengetahui *fatigue life* konstruksi *rampdoor*. Analisa ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* ANSYS *Workbench*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tegangan cenderung mengalami penurunan setiap perubahan variasi sudut kemiringan *rampdoor*. Diperoleh tegangan maksimal sebesar 146,510 N/mm² akibat beban roda depan, 142,230 N/mm² akibat beban roda belakang, dan 133, 970 akibat beban mobil sedan. Tegangan maksimal terjadi pada bagian saat beban roda kendaraan berada di tengah *rampdoor*. Perkiraan umur kelelahan struktur pada variasi sudut 0° adalah 50 tahun, variasi sudut 5° adalah 51 tahun, variasi sudut 10° adalah 221 tahun dan variasi sudut 15° adalah 169 tahun.

Kata Kunci : *Rampdoor*, Kelelahan (*Fatigue*), Metode Elemen Hingga, ANSYS *Workbench*

ABSTRACT

Oktajiyanti, Indah Priayu. 2021. *“Fatigue Analysis Of Rampdoor Ferry Ro-Ro”*
(supervised by **Hamzah and Ganding Sitepu**)

Ramp door construction will accept loads both static and dynamic loads during the operating period where the static load received will cause problems such as deformation and cracks, while dynamic loads that occur continuously will result in fatigue (fatigue). This study aims to find out the power of rampdoor as well as the most prone point of fatigue and know the fatigue life of rampdoor construction. This analysis using finite element method with the help of ANSYSTM Workbench software. The results of this study show that the voltage tends to decrease with each change in rampdoor slope angle variation. Obtained a maximum stress is 146,510 N/mm² due to front wheel load, 142,230 N/mm² due to rear wheel load, and 133,970 due to sedan car load. Maximum stress occurs in the part when the wheel load of the vehicle is in the middle of the rampdoor. The estimated age of structural fatigue at the 0° is 50 years, the 5° is 51 years, the 10° is 221 years and the 15° is 169 years.

Keywords : Rampdoor, Fatigue, Finite Element Method, ANSYS Workbench.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh

Syukur alhamdulillah penulis ucapkan atas berkat rahmat dan karunia Allah *subhanahu wa ta'ala* serta salam dan shalawat kepada Rasulullah *shallallahu 'alaihi wasallam*. Dengan segala ikhtiar yang dilakukan dan dengan digerakkannya hati dan pikiran penulis oleh Allah *subhanahu wa ta'ala* sehingga mampu menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “**Analisis Kelelahan Ramp Door Kapal Ferry Roro**”. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan kelulusan pada jenjang strata satu Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini terdapat berbagai macam hambatan dan tantangan, namun semuanya dapat teratasi dengan penuh kesabaran dan keikhlasan serta bantuan, bimbingan, kritikan dan saran dari berbagai pihak. Penulis juga menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna dan masih banyak kekurangan di dalamnya baik dari segi kualitas maupun kuantitas materi penelitian yang dikerjakan. Sehingga penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang membangun demi kesempurnaan tulisan ini.

Terselesainya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, dorongan dan dukungan moril berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih dan memberikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Ayahanda (**Ponijo**) dan Ibunda (**Hasanah**), orang tua tercinta yang senantiasa mencurahkan kasih sayang, do'a dan dukungan serta motivasi yang tiada hentinya kepada penulis. Semoga beliau selalu dalam lindungan Allah dan diberikan umur panjang hingga penulis mampu membanggakan mereka.
2. Bapak **Hamzah, ST., MT**, selaku pembimbing I dan Bapak **Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl-Ing**, selaku pembimbing II yang senantiasa membimbing dan mengarahkan penulis dengan penuh kesabaran dan keikhlasan meluangkan waktu untuk berkonsultasi demi kesempurnaan tugas akhir ini sehingga dalam proses pengerjaan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

3. Bapak **Dr. Ir. Syamsul Asri, MT**, selaku penasehat akademik penulis yang senantiasa memberikan arahan serta motivasi selama kuliah dan selaku penguji yang memberikan masukan dan arahan yang terbaik guna kesempurnaan skripsi penulis untuk memperoleh gelar akademik pada Departemen Teknik Perkapalan.
4. Ibu **Dr. Eng. A. Ardianti, ST., MT**, selaku dosen laboratorium struktur sekaligus dosen penguji yang telah memberikan masukan dan saran sehingga penulis dapat memperoleh gelar akademik di Departemen Teknik Perkapalan.
5. Bapak **Dr.Eng. Suandar Baso, ST., MT**, selaku Ketua Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu dan memberikan arahan dalam penyelesaian tugas ini.
6. Bapak/Ibu Dosen Fakultas Teknik Departemen Teknik Perkapalan atas bimbingan, arahan, didikan, dan motivasi yang telah diberikan selama kurang lebih lima tahun berkarir di pendidikan strata satu.
7. Seluruh staff Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang selalu membantu segala administrasi selama kuliah.
8. Teman seperjuangan laboratorium struktur Annisa Fitrah Ramadhani, Nurul Fadilah Nur, Dwi Restu Afdillah, Wa Ode Melda, Ronaldo Pakadang, Ihza Mahendra, Novrizal Tri Sandy, Muh. Fadhyal Akbar, Tandi, Muh. Idhil Adha, Syahrul Irmansyah yang telah memberi dukungan dan teman berbagi selama berada dilaboratorium struktur kapal
9. Teman-teman Teknik Perkapalan 2016 yang telah memberikan semangat selama berkuliah dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
10. Senior laboratorium struktur atas kesediannya dalam berdiskusi mengenai tugas akhir ini.
11. Teman-teman pejuang dakwah di Teknik yang disatukan dalam naungan GKM LD Al-Muhandis ukhti Asse, Tyan, dan Mila yang bersama-sama saling membersamai, menyemangati dalam perjuangan dakwah dan akademik hingga disemester akhir ini, serta adik-adik di GKM LD Al-Muhandis yang telah memberikan semangat kepada penulis.

12. Teman-teman CREW FAMILY yang telah memberikan semangat dan motivasi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini
Semoga pihak yang membantu dalam penulisan tugas akhir mendapatkan pahala oleh Allah. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi semua pihak yang berkenan membacanya dan mempelajarinya.

Gowa, Juli 2021

Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR NOTASI.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Kapal Ferry Ro-Ro.....	4
2.2 <i>Ramp Door</i> (Pintu Rampa)	5
2.3 Pembebanan Pada Struktur Kapal	7
2.3.1 Beban Statis	7
2.3.2 Beban Dinamis.....	7
2.4 Analisis Tegangan, Regangan, dan Elastisitas.....	8
2.4.1 Tegangan.....	8
2.4.2 Regangan	11
2.4.3 Elastisitas	11
2.4.4 Hubungan Tegangan dan Regangan	12

2.5	Tegangan Izin.....	13
2.6	Analisa Umur Kelelahan (<i>Fatigue Life</i>).....	14
2.6.1	Kurva S-N.....	15
2.6.2	Umur Struktur.....	17
2.7	Metode Elemen Hingga.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		22
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	22
3.2	Teknik Pengumpulan Data Penelitian.....	22
3.2.1	Teknik Pengambilan Data.....	22
3.2.2	Jenis Data dan Sumber Data	22
3.3	Prosedur Penelitian.....	23
3.3.1	Studi Lapangan dan Studi Literatur	23
3.3.2	Pengolahan Data	23
3.3.3	Prosedur Penyelesaian dengan <i>Software</i> Elemen Hingga.....	24
3.4	Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		33
4.1	Pembebanan Struktur	33
4.1.1	Beban Kendaraan	33
4.1.2	Variasi Kemiringan Sudut <i>Rampdoor</i>	35
4.2	Analisis Respon Struktur Kapal	35
4.2.1	Tegangan Normal	35
4.2.2	Deformasi Total	38
4.3	Fatigue Analisis.....	41
4.3.1	S-N Curve	41
4.3.2	Umur Kelelahan (<i>Fatigue Life</i>) <i>rampdoor</i>	44
4.3.3	Variasi Sudut Terhadap Umur Struktur (<i>Fatigue Life</i>).....	45
BAB V PENUTUP.....		47
5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA		48
LAMPIRAN.....		50

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Material Properties (Mild Steel BKI).....	24
Tabel 4.1 Berat masing-masing kendaraan	33
Tabel 4.2 Nilai Tegangan Normal Maksimum semua variasi.....	37
Tabel 4.3 Nilai Deformasi Total Maksimum semua variasi	40
Tabel 4.4 <i>Stress-Cycle</i> (S-N) untuk mobil truk dengan beban ban bagian depan.	42
Tabel 4.5 <i>Stress-Cycle</i> (S-N) untuk mobil truk dengan beban ban belakang	43
Tabel 4.6 <i>Stress-Cycle</i> (S-N) untuk mobil sedan	44
Tabel 4.7 Umur Kelelahan (<i>Fatigue Life</i>) Variasi Sudut.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kapal Ferry Ro-Ro	4
Gambar 2.2 Dimensi Daerah Kontak Ban.....	8
Gambar 2.3 Tegangan sebuah benda	10
Gambar 2.4 Grafik hubungan antara tegangan-regangan.	12
Gambar 2.5 Distribusi mode kegagalan	14
Gambar 2.6 Kurva S-N	16
Gambar 3.1 3D geometri <i>rampdoor</i>	25
Gambar 3.2 Sketsa geometri untuk setiap variasi	25
Gambar 3.3 Material Properties (Mild Steel BKI).....	26
Gambar 3.4 <i>Meshing</i> pada <i>rampdoor</i> kapal.....	27
Gambar 3.5 Jenis Tumpuan bagian <i>rampdoor</i> yang terhubung ke kapal	28
Gambar 3.6 Jenis Tumpuan ujung <i>rampdoor</i>	28
Gambar 3.7 Pembebanan akibat beban mobil sedan.....	29
Gambar 3.8 Pembebanan akibat beban roda depan truk	29
Gambar 3.9 Pembebanan akibat beban roda belakang truk	30
Gambar 3.10 Detail pembebanan pada mobil sedan.....	30
Gambar 3.11 Detail pembebanan pada mobil truk.....	30
Gambar 3.12 Model yang telah di <i>running</i> dengan tanda centang	31
Gambar 3.13 Alur Pikir Penelitian.....	32
Gambar 4.1 Tegangan Normal akibat beban roda depan truk	36
Gambar 4.2 Tegangan normal akibat beban roda belakang truk	36
Gambar 4.3 Tegangan Normal akibat beban mobil sedan	37
Gambar 4.4 Kurva tegangan normal maksimum terhadap variasi sudut	38
Gambar 4.5 Deformasi total akibat beban roda depan truk	39
Gambar 4.6 Deformasi total akibat beban roda belakang truk.....	39
Gambar 4.7 Deformasi total akibat beban mobil sedan	40
Gambar 4.8 Kurva Variasi Sudut Terhadap Umur Struktur	45

DAFTAR NOTASI

Q	= Beban Merata (N/mm ²)
F	= Gaya Berat atau Beban (N)
A	= Luas Penampang <i>rampdoor</i> (mm ²)
m	= Berat Truk (kg)
g	= Percepatan gravitasi (m/s ²)
σ	= Tegangan (N/mm ²)
τ	= tegangan geser (N/mm ²)
V	= gaya sejajar bidang elemen (N)
St	= statis momen (mm ³)
I	= Inersia (mm ⁴)
b	= tebal (mm)
ϵ	= Regangan
Δ	= Pertambahan Panjang (mm)
L	= Panjang mula-mula (mm)
σ_Y	= <i>Yield Stress</i>
σ_P	= <i>Proportional Limit</i>
l	= Panjang Batang (m)
N	= Jumlah siklus kegagalan untuk tegangan kisaran $\Delta\sigma$
$\Delta\sigma$	= Tegangan kisaran [N/mm ²]
m	= kemiringan <i>invers</i> negatif dari kurva S-N

- $\text{Log } K_2$ = *intercept of Log N by S-N curve*
 K_1 = *Konstanta rata-rata kurva S-N (50% probability)*
 K_2 = *Konstanta design kurva S-N (97,5% probability)*
 2δ = *Standar deviasi Log N;*
 D = *Accumulated fatigue damage*
 m, K_2 = *S-N fatigue parameters*
 n_{tot} = *Number of stress blocks*
 n_i = *Number of stress cycles in stress block i*
 N_i = *Number of cycles to failure at constant stress range $\Delta\sigma_i$*
 η = *Maximum acceptable usage factor*
 $\{F\}$ = *vektor gaya global pada titik simpul*
 $[K]$ = *matriks kekakuan global struktur*
 $\{d\}$ = *vektor perpindahan titik simpul*

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 : *S-N-curve depending on surface finishing for base material and free plate edge*
- Lampiran 2 : Gambar Konstruksi Pintu Rampa
- Lampiran 3 : Gambar GA (*General Arrangement*)
- Lampiran 4 : Gambar Sebaran Tegangan *Von-Mises* Untuk Variasi Sudut 5°, 10°, dan 15°.
- Lampiran 5 : Gambar deformasi Total Untuk Variasi Sudut 5°, 10°, dan 15°.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal jenis Ro-Ro adalah kapal yang bisa memuat penumpang ataupun kendaraan yang berjalan masuk kedalam kapal atau keluar dengan penggeraknya sendiri sehingga disebut sebagai kapal Roll On Roll Off disingkat Ro-Ro, untuk itu kapal jenis ini dilengkapi dengan pintu rampa (*ramp door*) yang dihubungkan dengan *moveble bridge* atau dermaga apung ke dermaga. *Ramp door* adalah pintu untuk memasukkan kendaraan ke dalam kapal Ro-Ro ataupun jenis kapal lain yang mengangkut kendaraan. Selain itu penggunaan *ramp door* sangat dibutuhkan untuk mempermudah proses bongkar muat kendaraan dari dermaga penyebrangan ke kapal dan sebaliknya.

Dalam pembangunan kapal, salah satu hal penting yang harus diperhatikan adalah kekuatan struktur konstruksi kapal itu sendiri. Kekuatan struktur merupakan salah satu aspek penting yang mempengaruhi tingkat keselamatan kapal. Salah satu konstruksi penting yang perlu diperhatikan pada kapal ferry Ro-Ro adalah *ramp door*. Hal ini dikarenakan konstruksi *ramp door* akan menerima beban baik itu beban statis maupun dinamis selama masa pengoperasiannya. Dimana beban statis yang diterima akan menimbulkan masalah seperti deformasi dan keretakan, sedangkan beban dinamis yang diterjadi secara terus menerus akan mengakibatkan kelelahan (*fatigue*). Sehingga konstruksi *ramp door* harus memiliki tegangan pada batas yang diizinkan dan bisa diterima oleh konstruksi tersebut serta memiliki kekakuan elastis yang cukup.

Terdapat beberapa metode dalam analisis *fatigue*, salah satunya adalah analisa metode elemen hingga (FEM) yang merupakan metode matematis yang bisa digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan seperti analisis tegangan. Pada analisis struktur, analisis FEM dapat digunakan untuk menyelesaikan defleksi dan tegangan pada struktur yang menerima beban tertentu pada kondisi batas yang sesuai.

Berdasarkan hal diatas maka perlu dilakukan “**Analisis Kelelahan Ramp Door Kapal Ferry Ro-Ro**” untuk meminimalkan kerusakan konstruksi akibat kelelahan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kekuatan yang terjadi pada konstruksi rampdoor serta letak titik paling rawan terjadi kelelahan pada konstruksi *ramp door*?
2. Mengetahui *Fatigue Life* (umur kelelahan) konstruksi *rampdoor* ?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menghitung dan menganalisis kelelahan (*fatigue*) pada konstruksi *ramp door* Kapal Ferry Ro-Ro maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Beban yang digunakan pada penelitian ini hanya beban kendaraan yang melewati rampdoor.
2. Jenis kendaraan yang digunakan adalah mobil truk dan mobil sedan.
3. Kondisi kendaraan saat menganalisis kelelahan dalam keadaan diam dan berada ditengah *rampdoor*.
4. Variasi kemiringan *rampdoor* dibuat arah ke bawah.
5. Analisa dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS untuk mengetahui letak tegangan maksimal yang akan digunakan untuk mengetahui *fatigue life* pada konstruksi *ramp door*.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah

1. Untuk mengetahui kekuatan yang terjadi pada konstruksi *rampdoor* serta letak titik paling rawan terjadi kelelahan pada konstruksi *rampdoor*
2. Untuk mengetahui *Fatigue Life* (umur kelelahan) konstruksi *rampdoor*

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Dapat digunakan sebagai acuan dalam memperbaharui dan mengoptimalkan desain dan kekuatan *ramp door*

2. Dapat digunakan sebagai referensi penelitian dalam menganalisis *fatigue* konstruksi *ramp door*

1.6 Sistematika Penulisan

Penyajian materi penulisan ini dijabarkan secara umum dalam kerangka penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tentang landasan teori dan studi literatur yang berkaitan dengan topik penelitian

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini dijelaskan jenis penelitian yang digunakan untuk memperoleh data yang dibutuhkan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini disajikan hasil-hasil penelitian yang diperoleh dari pengolahan data dan penelitian.

BAB V PENUTUP

Berisikan kesimpulan dari penelitian dan saran-saran.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Ferry Ro-Ro

Kapal Ferry Ro-Ro adalah sarana angkutan penyebrangan yang dapat mengangkut penumpang, kendaraan, barang, maupun ternak dari satu daratan ke daratan yang lain. Kapal Ferry mempunyai peranan penting dalam sistem pengangkutan bagi banyak kota di pesisir pantai, membuat transit langsung antar kedua tujuan dengan biaya lebih kecil dibandingkan jembatan atau terowongan, lihat Gambar 2.1. (Nugroho, 2014)



Gambar 2.1 Kapal Ferry Ro-Ro

(sumber: www.kabarpemumpang.com,2020)

Secara umum penggolongan tipe kapal ferry didasarkan menurut cara pemuatannya, hal ini dilakukan karena proses pemuatan kapal ferry erat kaitannya dengan beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam pemilihan kapal ferry yang sesuai dengan kondisi daerah operasi maupun dalam perencanaan kapal ferry itu sendiri. (Nugroho, 2014)

Konsep standar dari kapal ferry Ro-Ro adalah kapal dengan *ramp door* yang bisa digerakkan untuk proses *loading* dan *offloading*. Oleh karena itu, *ramp door* pada kapal ferry menjadi sasaran dari berbagai pembebanan dinamis maupun statis selama masa pakainya dan mungkin menyebabkan kerusakan akibat kelelahan. Saat tidak digunakan, *ramp door* bertindak sebagai bagian dari

lambung dan berkontribusi pada struktur integritas kapal. Karena itu, *ramp door* juga dirancang untuk menahan tekanan laut akibat gelombang. (Aron, 2013)

2.2 Ramp Door (Pintu Rampa)

Ramp door (Pintu rampa) adalah pintu untuk memasukkan kendaraan ke dalam kapal *Ro-Ro* ataupun jenis kapal lain yang mengangkut kendaraan. Penggunaan *ramp door* sangat dibutuhkan untuk mempermudah proses membongkar dan memuat kendaraan dari dermaga penyeberangan ke kapal dan sebaliknya. *Ramp Door* dihubungkan dengan *moveable bridge* pelengsengan yang ada di dermaga (Sarjito Jokosisworo, 2011). Mekanisme penggerak pada *ramp door* dibagi menjadi dua penggerak yaitu:

1. Mekanisme penggerak dengan motor hidrolik

Motor hidrolik adalah sebuah aktuator mekanik yang mengkonversi aliran dan tekanan hidrolik menjadi torsi atau tenaga putaran. Alat ini menjadi satu bagian dari sebuah sistem hidrolik selain silinder hidrolik. Motor hidrolik berkebalikan fungsi dengan pompa hidrolik. Jika pompa hidrolik berfungsi untuk menghasilkan tekanan dan aliran tertentu pada suatu sistem hidrolik, maka motor hidrolik bertugas mengkonversi kembali tekanan hidrolik menjadi tenaga putar. Motor hidrolik dapat berkerja pada dua arah putaran motor sesuai dengan kebutuhan penggunaan.

2. Mekanisme Penggerak Dengan Motor Listrik

Motor listrik adalah alat untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Begitu juga dengan sebaliknya yaitu alat untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik yang biasanya disebut dengan *generator* atau *dynamo*. Pada motor listrik yang tenaga listrik di ubah menjadi tenaga mekanik. Perubahan ini dilakukan dengan mengubah tenaga listrik menjadi magnet yang disebut sebagai elektro magnet. Sebagaimana yang telah kita ketahui bahwa kutub-kutub dari magnet yang senama akan tolak menolak dan kutub yang tidak senama akan tarik menarik. Dengan terjadinya proses ini maka kita dapat memperoleh gerakan jika kita menempatkan sebuah magnet pada sebuah poros

yang dapat berputar dan magnet yang lain pada suatu kedudukan yang tetap. (Pratama P.A, 2019)

Sedangkan untuk jenis dari *rampdoor* ada beberapa jenis yang sering dipakai pada kapal antara lain : (Aron, 2013)

1. *Quarter Ramp Door*
2. *Side Ramp Door*
3. *Slewing Ramp Door*
4. *Stern Ramp Door*
5. *Foldable Stern Ramp Door*

Adapun persyaratan dalam pembuatan *ramp door* diantaranya adalah: (Sarjito Jokosisworo, 2011)

1. Kedap terhadap air laut dalam hal melalui pelayaran laut terbuka.
2. Kuat menahan beban kendaraan yang melewati pintu saat menaikkan dan menurunkan kendaraan.
3. Aerodinamis dalam hal melakukan perjalanan panjang.

Salah satu hal yang harus diperhatikan pada sebuah kapal adalah tentang konstruksi kapal. Dalam sebuah sistem konstruksi, kekuatan merupakan struktur terpenting dalam sebuah kapal sebab fungsi struktur tersebut adalah untuk menjamin keselamatan daripada awak kapal, penumpang dan muatan yang dibawanya. Dalam hal ini membahas tentang sebuah konstruksi *ramp door* yang ada dikapal, yang mana *ramp door* ini biasanya digunakan untuk akses keluar masuknya kendaraan yang akan diangkut kedalam kapal. Maka dari itu, dalam mendesain suatu konstruksi terutama konstruksi *ramp door*, haruslah memiliki acuan atau peraturan-peraturan yang dapat mendukung konstruksi yang akan dibuat. Dalam hal ini peraturan atau *rules* yang digunakan adalah BKI (Biro Klasifikasi Indonesia) dalam pembuatan suatu konstruksi *ramp door*. Maka dari itu dalam membuat susatu konstruksi haruslah sangat diperhatikan mengenai *rules* BKI yang digunakan agar tidak terjadi kesalahan dalam membuat suatu konstruksi dan konstruksi terbuat masih dalam batas yang diijinkan menurut *rules* BKI yang ada. (Johan, 2018)

2.3 Pembebanan Pada Struktur Kapal

Struktur adalah himpunan elemen-elemen bahan yang dapat meneruskan beban atau gaya muatan ke elemen-elemen bahan lain. Struktur bangunan dirancang untuk dapat menahan beban bangunan tersebut. Struktur bangunan umum termasuk kapal, gedung, jembatan, pesawat, mesin-mesin, dan bangunan kerangka pemikul beban lainnya, struktur bangunan dapat dipecah menjadi bagian-bagian yang merupakan satu kesatuan dalam analisis dan perancangannya. (Wang, diterjemahkan oleh Ismoyo,1985).

Sedangkan beban adalah gaya, deformasi, atau akselerasi yang diterapkan pada komponen struktur. Beban menyebabkan tegangan, deformasi, dan perpindahan dalam struktur (Avallone dan Baumeister, 1996).

2.3.1 Beban Statis

Beban-beban yang berubah hanya apabila berat total kapal berubah, sebagai akibat kegiatan bongkar-muat, pemakaian bahan bakar atau perubahan pada kapalnya sendiri. Ini terdiri dari : (Rosyid dan Setyawan,2000)

1. Berat kapal beserta seluruh isinya.
2. Gaya tekan ke atas statis saat diam.
3. Beban-beban suhu (*thermal*) akibat perubahan suhu *non-linier* dalam lambung.
4. Beban-beban terpusat akibat *dry dock* dan kandas.

2.3.2 Beban Dinamis

Beban-beban yang berubah besarnya dalam waktu dengan periode merentang dari beberapa detik sampai beberapa menit dan oleh karena itu terjadi dengan frekuensi-frekuensi yang cukup rendah yang bila dibandingkan dengan frekuensi-frekuensi getaran lambung kapal dan bagian-bagiannya tidak menyebabkan pembesaran resonansi yang berarti pada tegangan-tegangan yang terjadi pada struktur kapal. Beban-beban ini terutama disebabkan oleh gelombang selama kapal bergerak. Beban-beban ini terdiri dari: (Rosyid dan Setyawan, 2000)

1. Variasi tekanan pada lambung akibat gelombang.
2. Variasi tekanan pada lambung akibat gerakan osilatoris kapal.
3. Reaksi-reaksi inersial akibat percepatan massa kapal beserta isinya.

Adapun beban yang bekerja pada *rampdoor* diambil dari beban kendaraan yang melewatinya. Dimana beban kendaraan diasumsikan sebagai beban merata. Dimana untuk menghitung beban merata digunakan rumus sebagai berikut:

$$Q = \frac{F}{A} \quad [2.1]$$

Dimana

Q = Beban Merata (N/mm²)

F = Gaya Berat Truk (N)

A = Luas Penampang ban yang menyentuh *rampdoor* (mm²)

$$F = m \cdot g \quad [2.2]$$

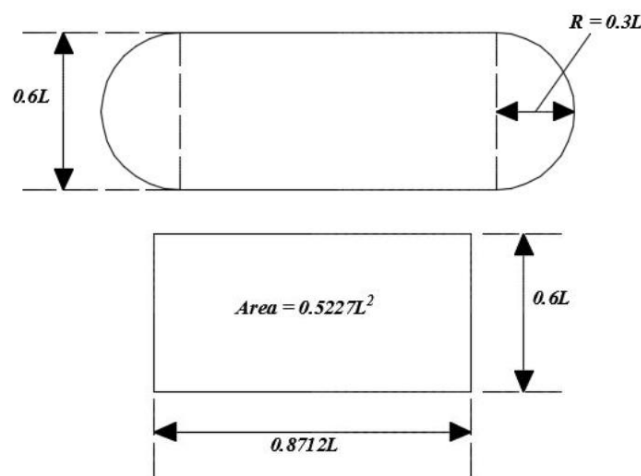
Dimana

F = Gaya Berat Truk (N)

m = Berat Truk (kg)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

Sedangkan untuk dimensi daerah kontak ban dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Dimensi Daerah Kontak Ban

2.4 Analisis Tegangan, Regangan, dan Elastisitas

2.4.1 Tegangan

Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai besaran gaya terhadap luas penampang daerah yang dikenai gaya tersebut (Van Vlack seperti dikutip Nugraheni dkk, 2014:2). Tegangan disebut juga intensitas gaya (yaitu gaya per satuan luas) dan satuan Standar Internasional untuk tegangan normal adalah

Newton per meter kuadrat (N/m^2) atau Pascal (Pa). Tegangan normal (*normal stress*) adalah tegangan yang tegak lurus terhadap permukaan tegangan tersebut diterapkan. Tegangan normal dapat berupa tarikan (*tensile*) dan tekanan (*compressive*). Tegangan tarik (*tensile*) bertanda positif dan tegangan tekan (*compressive*) bertanda negatif (Gere dan Timoshenko, Vol. I, 2000:22).

Bila arah bidang khayal memotong sebuah bagian struktur yang dipilih dengan bijaksana, maka tegangan yang bekerja pada potongan tersebut akan sangat penting dan mudah menentukannya. Keadaan penting seperti itu terdapat pada suatu pembebanan batang aksial lurus dalam gaya tarik, asal bidang dibuat tegak lurus terhadap batang. Tegangan tarik yang bekerja pada potongan tersebut merupakan tegangan maksimum, sedangkan potongan lain yang tidak tegak lurus pada sumbu batang akan mempunyai permukaan yang lebih luas untuk melawan gaya pakai. Tegangan maksimum merupakan yang paling penting karena cenderung akan menyebabkan kegagalan bahan tersebut. (Popov, 1984)

Lihat Gambar 2.2(a) Bila batang dianggap tidak mempunyai berat, dua gaya P yang sama dan berlawanan arah diperlukan masing-masing pada tiap ujung batang untuk menjaga keseimbangan. Karena keseluruhan benda berada dalam keseimbangan, setiap bagian dari benda berada pula dalam keadaan seimbang. Bagian batang yang berada disebelah $x-x$ berada dalam keseimbangan. Pada potongan tersebut, dimana luas penampang batang adalah A , gaya yang setara dengan P haruslah dibentuk, seperti yang diperlihatkan Gambar 2.1(b) dan (c). Kemudian dari definisi tegangan, tegangan normal atau tegangan yang berlaku tegak lurus pada potongan tersebut adalah: (Popov, 1984)

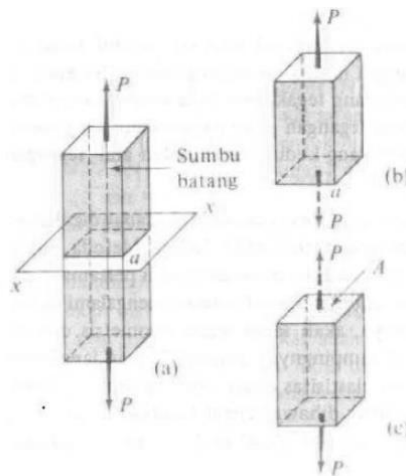
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [2.3]$$

Dimana :

σ = tegangan (N/mm^2)

F = gaya atau beban (N)

A = luas penampang (mm^2)



Gambar 2.3 Tegangan sebuah benda

(Sumber: Popov, 2020)

Analisis menggunakan perangkat lunak elemen hingga memiliki kelebihan yaitu dapat menghasilkan nilai tegangan Von Mises atau tegangan ekuivalen, yaitu jenis tegangan yang mengakibatkan kegagalan pada struktur material yang dirumuskan oleh penemunya yang bernama Von Mises. Untuk penentuan tegangan Von Mises, terlebih dahulu menghitung tegangan utama yang bekerja pada struktur dengan menggunakan persamaan diatas, setelah tegangan utama ditemukan maka tegangan Von Mises bisa didapatkan dengan persamaan (Shigley seperti dikutip Anggara, 2019:23) :

$$\sigma = \left\{ \frac{[\sigma^1 - \sigma^2]^2 + [\sigma^2 - \sigma^3]^2 + [\sigma^3 - \sigma^1]^2}{2} \right\}^{1/2} \quad [2.4]$$

Gaya pada benda menyebabkan perubahan ukuran benda. Pengaruh vektor gaya terhadap sumbu x menghasilkan besaran *tensile stress* dengan lambang σ_x . Indeks x menyatakan arah vektor gaya. Pengaruh gaya terhadap sumbu y dan z menghasilkan momen yang disebut tegangan geser (*shear stress*). Tegangan geser (*shear stress*) dilambangkan τ yang secara matematis didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad [2.5]$$

$$\tau = \frac{V \cdot St}{I \cdot b} \quad [2.6]$$

Dimana :

τ = tegangan geser (N/mm^2)

V = gaya sejajar bidang elemen (N)

A = luas penampang (mm^2)

St = statis momen (mm^3)

I = Inersia (mm^4)

b = tebal (mm)

2.4.2 Regangan

Regangan adalah perbandingan deformasi suatu struktur terhadap panjang mula-mula akibat gaya yang arahnya sejajar dengan perubahan panjang struktur tersebut (Van Vlack,1991). Dengan beban yang sama dan suatu jarak ukur yang lebih panjang, suatu deformasi yang lebih besar dapat kita amati, atau sebaliknya. Karena itu lebih mendasar untuk memperhatikan perpanjangan per satuan alat ukur tersebut. Bila Δ adalah perpanjangan total pada panjang ukur awal L yang ditinjau, maka perpanjangan per satuan panjang ε (epsilon) adalah

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L} \quad [2.7]$$

Dimana

ε = Regangan

Δ = Pertambahan Panjang (mm)

L = Panjang mula-mula (mm)

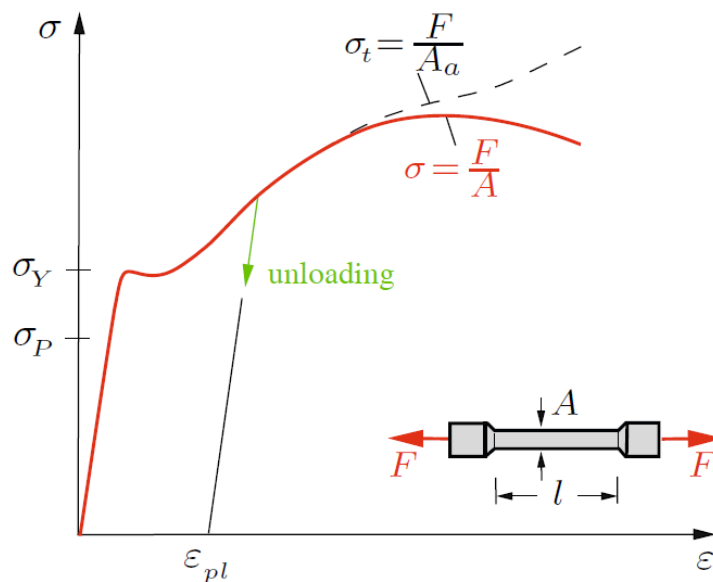
2.4.3 Elastisitas

Elastisitas didefinisikan sebagai sifat yang dimiliki material untuk mengalami tegangan tanpa mengakibatkan perubahan ukuran atau bentuk permanen setelah tegangan dihilangkan (Van Vlack, 1991). Apabila batas elastisitas tercapai dalam konstanta Young atau Modulus Young, maka benda akan mencapai batas deformasi yang tidak dapat kembali ke bentuk semula (disebut plastis). Elastisitas benda kemudian dinyatakan dalam tegangan, regangan, dan menjadi dasar fenomena benda yang disebut pegas sebagaimana Hukum Hooke. Sesuai dengan Hukum Hooke, tegangan sebanding dengan regangan. Hal ini berlaku di dalam

batas elastis. Perbandingan tegangan satuan σ untuk regangan satuan ε dari setiap bahan yang diberikan dari hasil eksperimen, memberikan suatu ukuran kekuatannya, yaitu Elastisitas E, yaitu: (Mursalim,2020)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [2.8]$$

2.4.4 Hubungan Tegangan dan Regangan



Gambar 2.4 Grafik hubungan antara tegangan-regangan.

(Sumber : Gross, dkk, 2011)

Keterangan :

- σ = Tegangan (*Stress*) (N/mm^2)
- ε = Regangan (*Strain*)
- σ_Y = *Yield Stress*
- σ_P = *Proportional Limit*
- F = Gaya Luar Total atau Beban (N)
- A = Luas Penampang Batang (mm^2)
- l = Panjang Batang (m)

Grafik hubungan antara tegangan-regangan (Gambar 2.3) merupakan hasil pengujian material baha lentur yang menunjukkan hubungan antara tegangan-regangan

1. Daerah Linier (*Elastic Limit*)

Bila sebuah material diberi gaya sampai titik *proportional limit* (σ_P) kemudian bebannya dihilangkan, maka material tersebut akan kembali ke kondisi semula. Tetapi jika beban ditarik sampai melewati titik *proportional limit* (σ_P), hukum hooke tidak lagi berlaku dan material akan mengalami perubahan secara permanen.

2. Titik Luluh (Batas Proporsional)

Titik luluh merupakan batas elastis atau fase pergantian dari deformasi elastis ke deformasi plastis. Pada titik ini penerapan hukum Hooke masih bisa ditolerir , dalam aplikasinya, batas proporsional biasanya disamakan dengan batas elastis.

3. Deformasi Plastis (*Plastic Deformation*)

Deformasi Plastis merupakan fase perubahan bentuk secara permanen. Hal ini terjadi karena material yang diberi beban tertarik sampai melewati batas proporsionalnya.

4. *Ultimate Tensile Strength* (UTS)

Ultimate Tensile Strength (UTS) merupakan batas tegangan maksimum yang diperoleh dari uji tarik

5. Titik Putus (*Fracture*)

Titik Putus (*Fracture*) merupakan fase dimana material yang diuji mengalami patah dan putus akibat tegangan yang besar.

2.5 Tegangan Izin

Dalam membuat konstruksi *rampdoor*, ada beberapa aturan yang perlu diperhatikan menurut *rules* dari BKI, misalnya saja tentang tegangan ijin dan material yang digunakan dalam pembuatan *ramp door*. Dalam hal ini tegangan ijin yang digunakan yang sesuai dengan ketentuan BKI Vol. II. Dimana persamaannya adalah sebagai berikut

Bending Stress

$$\sigma = \frac{120}{k} \quad [\text{N/mm}^2]; \text{ dengan } k = \text{faktor baja} \quad [2.9]$$

Shrear Stress

$$\tau = \frac{100}{k} \quad [\text{N/mm}^2] \quad [2.10]$$

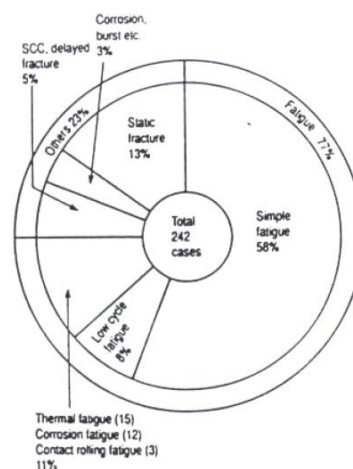
Equivalent Stress

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} = \frac{180}{k} \quad [\text{N/mm}^2] \quad [2.11]$$

2.6 Analisa Umur Kelelahan (*Fatigue Life*)

Kelelahan (*Fatigue*) adalah proses perubahan struktural permanen yang terjadi pada material yang mengalami kondisi yang menghasilkan tegangan dan regangan yang berfluktuasi pada beberapa titik dan dapat berujung pada retakan setelah mengalami cukup banyak fluktuasi. Setelah beberapa siklus seperti itu, retakan kecil akan dimulai, biasanya pada atau di dekat permukaan yang diskontinuitas seperti goresan atau pemahatan. Semakin banyak siklus terakumulasi, celah tumbuh sampai akhirnya bagian yang tidak retak tidak dapat lagi menahan beban dan komponen patah. (F.C. Campbell, 2012)

Kelelahan (*Fatigue*) adalah salah satu jenis kegagalan/patah pada komponen akibat beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah). Diperkirakan 50%-90% (Gambar 2.4) kegagalan mekanis adalah disebabkan oleh kelelahan. (Abrianto Akuan, 2007)



Gambar 2.5 Distribusi mode kegagalan

(Sumber : Akuan, 2007)

Secara umum disepakati bahwa empat fase kelelahan yang berbeda dapat terjadi:

1. Nukleasi retak
2. Perambatan retak yang bergantung secara struktural (sering disebut fase retak pendek atau retak kecil)
3. Perambatan retak yang dicirikan oleh mekanika fraktur elastis linier, fraktur elastis-plastik mekanik, atau fraktur plastik penuh mekanika.
4. Ketidakstabilan dan kegagalan akhir.

Masing-masing fase ini adalah proses yang sangat kompleks (atau mungkin melibatkan beberapa proses). Misalnya, nukleasi retakan fatik sangat sulit dipelajari, dan bahkan mekanisme fatik murni dapat sangat bergantung pada susunan intrinsik material. Ketika pengaruh yang tidak langsung terlibat dalam nukleasi, seperti efek suhu (misalnya creep), semua jenis korosi, atau fretting, masalah pemodelan kerusakan menjadi berat. (F.C. Campbell, 2012)

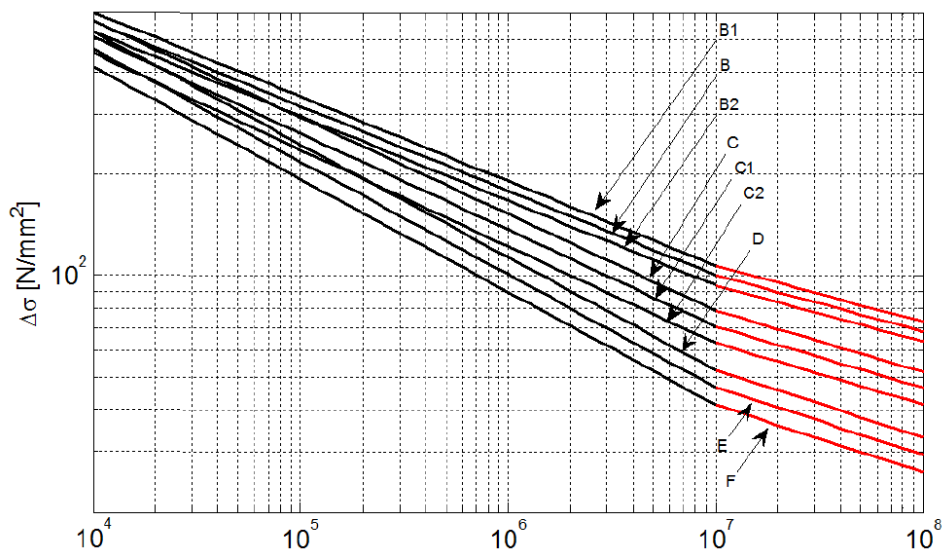
2.6.1 Kurva S-N

Kapasitas kelelahan *welded joints* dan *base material* ditentukan oleh kurva S-N, yang diperoleh dari tes kelelahan. Desain kurva S-N didasarkan pada kurva rata-minus-dua-standar-deviasi, yaitu terkait dengan probabilitas kelangsungan hidup 97.5%. Kurva S-N berlaku untuk baja normal dan baja berkekuatan tinggi yang digunakan dalam konstruksi struktur lambung kapal hingga 500 N/mm². Kurva S-N untuk *welded joints* termasuk efek dari las lokal untuk pendekatan hot spot. Untuk pendekatan tegangan normal menggunakan kurva S-N FAT *class*. (DNV,2015)

Bila Untuk desain kelelahan, detail las dan *base metal* dapat dibagi menjadi beberapa kelas, masing-masing dengan kurva S-N desain yang sesuai. Rincian umum dalam *class* ditentukan dalam Tabel 2.1 tergantung pada: Detail geometri, arah tegangan yang berfluktuasi, metode fabrikasi (*misalignment/cacat* dan kondisi permukaan) dan detail inspeksi. Setiap detail kelelahan, *crack* mungkin berpotensi berkembang, diklasifikasikan dalam sesuai dengan tabel yang

diberikan. Untuk sambungan las, sesuai dengan Tabel 2.2 (lihat pada Lampiran 1) untuk bahan dasar. (DNV, 2015)

Kurva S-N untuk air *environment* diberikan pada Tabel 2.1 pada Gambar 2.6 hingga 10^8 cycles. Rentang tegangan pada 2×10^6 dan 10^7 cycles. Konsentrasi tegangan struktural faktor yang berasal dari metode *hot spot* termasuk untuk referensi. Untuk detail yang dilas, kurva D adalah kurva referensi untuk metode tegangan *hot spot*. Untuk *base metal*, kurva B₁ digunakan sebagai referensi. Kurva B, B₂, C, C₁ dan C₂ berlaku untuk tegangan lokal pada tepi pelat sesuai Tabel 2.2 (lihat pada Lampiran 1). Kurva S-N *parameterized* ditunjuk dengan FAT X adalah digunakan untuk detail yang dilas dinilai dengan pendekatan tegangan nominal, dan tidak boleh digunakan dalam kaitannya dengan base metal. (DNV, 2015)



Gambar 2.6 Kurva S-N

(Sumber : DNV,2015)

Desain dasar kurva S-N diberikan sebagai:

$$\text{Log } N = \text{Log } K_2 - m \text{ Log } \Delta\sigma \quad [2.12]$$

Dengan parameter kurva S-N diberikan dalam Tabel 2.1

N = Jumlah siklus kegagalan untuk tegangan kisaran $\Delta\sigma$

$\Delta\sigma$ = Tegangan kisaran (N/mm^2)

m = kemiringan *invers* negatif dari kurva S-N

$\text{Log } K_2 = \text{intercept of } \text{Log } N \text{ by S-N curve}$

$$\log K_2 = \log K_1 - 2\delta \quad [2.13]$$

Dimana :

K_1 = Konstanta rata-rata kurva S-N (50% probability)

K_2 = Konstanta design kurva S-N (97,5% probability)

2δ = Standar deviasi Log N;

= 0,20

Berdasarkan desain dasar kurva S-N pada Gambar 2.6, rumus digunakan untuk memperoleh prediksi jumlah siklus batas ketahanan yang dimiliki sebuah material dengan tegangan kisaran serta parameter yang mempengaruhi material tersebut. Dalam penggunaan kurva S-N, diberikan kriteria yang mempengaruhi umur kelelahan seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. S-N parameters

S-N Curve	Reference stress at $2 \cdot 10^6$ cycles (FAT)	Reference stress at 10^7 cycles (knuckle), $\Delta\sigma_q$	Structural stress concentration embedded in the detail and taken at $2 \cdot 10^6$ (10^7) cycles	$N \leq 10^7$		$N > 10^7$	
	N/mm ²	N/mm ²		log K_2	m	log K_2	m+ Δm
B1	160	107.00	0.56 (0.49)	15.118	4	19.176	6
B	150	100.31	0.60 (0.52)	15.005	4	19.008	6
B2	140	93.62	0.64 (0.56)	14.886	4	18.828	6
C	125	78.92	0.72 (0.67)	13.640	3.5	17.435	5.5
C1	112	70.72	0.80 (0.74)	13.473	3.5	17.172	5.5
C2	100	63.14	0.90 (0.83)	13.301	3.5	16.902	5.5
D	90	52.63	1.00 (1.00)	12.164	3	15.606	5
E	80	46.78	1.13 (1.13)	12.010	3	15.350	5
F	71	41.52	1.27 (1.27)	11.855	3	15.091	5
FAT	X	0.585·X	90/X (90/X)	6.301+3·log(X)	3	7+5·log(0.585·X)	5

2.6.2 Umur Struktur

Formulasi umur kelelahan struktur diberikan sebagai berikut, (DNV,2015)

Variasi tegangan dinamis disebut sebagai rentang tegangan ($\Delta\sigma$) atau amplitudo tegangan (σ)

$$\Delta\sigma = 2\sigma \quad [2.14]$$

Fatigue damage accumulation

$$D = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{K_2} \sum_{i=1}^{n_{tot}} n_i (\Delta\sigma_i)^m \leq \eta \quad [2.15]$$

Dimana :

D = Accumulated fatigue damage

m, K_2 = S-N fatigue parameters

n_{tot} = Number of stress blocks

n_i = Number of stress cycles in stress block i

N_i = Number of cycles to failure at constant stress range $\Delta\sigma_i$

η = Maximum acceptable usage factor

Fatigue Life

$$T = \frac{D_{life}}{D} \quad [2.16]$$

2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*Finite Elemen Method*) adalah metode numerik yang digunakan untuk memecahkan permasalahan teknik berupa persamaan matematis dengan menggunakan rumus integral dalam sistem aljabar linear dan non-linear dengan tingkat ketelitian yang cukup akurat. Tipe masalah teknis yang dapat diselesaikan menggunakan metode elemen hingga adalah analisis struktur yang meliputi analisis tegangan, buckling, dan analisis getaran. Selain itu metode elemen hingga juga bisa menyelesaikan masalah teknis non struktur seperti perpindahan panas dan massa, distribusi listrik dan magnet, mekanika fluida, dan lain sebagainya. Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi : (Yerri Susatio, 2004)

1. Analisis tegangan (*stress*), meliputi analisis truss dan frame serta masalah-masalah yang berhubungan dengan tegangan-tegangan terkonsentrasi.
2. Buckling
3. Analisis getaran

Dalam persoalan-persoalan yang menyangkut geometri yang rumit, seperti persoalan pembebanan terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika

analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji. (Yerri Susatio, 2004)

Penyelesaian analisis dari suatu persamaan differensial suatu geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, tidak mudah diperoleh. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini. (Yerri Susatio, 2004)

Karena matematika analisis memerlukan nilai atau besaran yang harus diketahui pada setiap titik di struktur (Yerri Susatio, 2004). Terdapat dua pendekatan umum dalam metode elemen hingga, yaitu :

1. Metode fleksibilitas. Gaya yang bekerja pada struktur difungsikan sebagai variabel yang harus dicari dalam metode ini. Persamaan keseimbangan digunakan untuk memperoleh persamaan pengatur. Kemudian persamaan lainnya didapat dengan memberikan syarat kompatibilitas (Kurniawan, Skripsi, 2014:25)
2. Metode kekakuan/perpindahan. Perpindahan titik simpul digunakan sebagai variabel yang harus dicari dalam metode ini. Syarat kompatibilitas mewajibkan elemen yang berhubungan akan tetap terhubung setelah mengalami deformasi. Metode kekakuan lebih menguntungkan untuk keperluan komputasi karena formulasi untuk masalah struktur lebih sederhana dibanding fleksibilitas (Kurniawan, Skripsi, 2014:25).

Langkah-langkah penyelesaian metode elemen hingga berdasarkan metode kekakuan adalah sebagai berikut :

1. Pembagian dan pemilihan jenis elemen

Pada tahap ini, struktur material akan dipecah menjadi suatu sistem elemen-elemen hingga. Penentuan jenis elemen dilakukan agar model yang dibuat dapat mewakili bentuk dan sifat benda sebenarnya. Pemilihan jenis elemen bergantung pada kondisi benda dan pembebanannya.

2. Pemilihan fungsi perpindahan

Fungsi perpindahan pada elemen ditentukan menggunakan nilai atau koordinat titik simpul elemen. Fungsi perpindahan elemen 2 Dimensi ditentukan dengan fungsi koordinat dalam elemen tersebut.

3. Tentukan hubungan *strain/displacement* dan *stress/strain*

Hubungan *strain/displacement* dan *stress/strain* penting dalam penurunan persamaan tiap-tiap elemen hingga. Untuk kasus deformasi dalam arah sumbu x hubungan *strain* (regangan) ϵ_x dengan *displacement* dinyatakan dengan :

$$\epsilon_x = \frac{d_u}{d_x} \quad [2.17]$$

4. Penurunan matriks dan persamaan kekakuan elemen

Matriks dan persamaan kekakuan elemen diturunkan dari konsep koefisien pengaruh kekakuan yang digunakan dalam analisis struktur.

5. Penggabungan persamaan elemen untuk mendapatkan persamaan global total dan penetapan syarat batas

Setelah persamaan elemen diperoleh, maka selanjutnya digabungkan dengan metode superposisi berdasarkan kesetimbangan gaya pada titik simpul. Persamaan tersebut akan menghasilkan persamaan global. Persamaan global dapat dituliskan dalam matriks berikut :

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad [2.18]$$

Dimana :

$\{F\}$ = vektor gaya global pada titik simpul

$[K]$ = matriks kekakuan global struktur

$\{d\}$ = vektor perpindahan titik simpul

6. Penyelesaian persamaan global

Dengan menerapkan syarat batas diperoleh persamaan simultan yang ditulis dalam matriks berikut :

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{21} & \dots & K_{n1} \\ K_{21} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & \dots & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_n \end{Bmatrix}$$

Dimana n = total derajat kebebasan titik simpul struktur.

7. Penyelesaian tegangan dan regangan elemen

Tegangan dan regangan didapatkan dari persamaan pada tahap ke-3. Persamaan tersebut dimasukkan kedalam persamaan 2.15 pada tahapan ke-6, sehingga tegangan elemen dapat diperoleh.

8. Interpretasi hasil

Langkah terakhir adalah menginterpretasikan atau menganalisis hasil yang didapat untuk digunakan dalam proses perancangan selanjutnya.

Metode elemen hingga dapat dipakai untuk memecahkan berbagai masalah. Daerah yang dianalisis dapat mempunyai bentuk, beban, dan kondisi batas yang sembarang. Jaring-jaringnya bisa terdiri dari elemen dengan jenis, bentuk, dan ukuran yang berbeda. Kemudahan penggunaan tersebut tergabung pada satu program komputer serbaguna, yaitu dengan menyediakan data seperti jenis, geometri, kondisi batas, elemen, dan sebagainya (D. Cook, 1990:6). Beberapa software computer untuk analisis menggunakan elemen hingga diantaranya STAAD-PRO, GT-STRUDEL, NASTRAN, dan ANSYS.

2.8 ANSYS™

ANSYS merupakan salah satu software analisis dengan metode elemen hingga untuk menganalisis berbagai macam struktur, aliran fluida, dan perpindahan panas dari software analisis yang lain yaitu CATIA, NASTRAN, Fluent, dan lain sebagainya. (Pinem, 2013).

Secara umum penyelesaian metode elemen hingga menggunakan ANSYS™ dapat dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu :

1. *Preprocessing* (Pendefinisian Masalah)

Tahap *Preprocessing* terdiri dari langkah umum yaitu: [1] mendefinisikan keypoint/lines/areas/volume, [2] mendefinisikan tipe elemen dan bahan yang digunakan/sifat geometri, dan [3] mesh lines/areas/volumes yang dibutuhkan. Jumlah detail yang diperlukan tergantung pada dimensi daerah analisis.

2. *Solution* (*Assigning Loads, Constraints, dan Solving*)

Tahap *solution* merupakan penentuan beban (titik atau tekanan), *constraint* (translasi dan rotasi), dan kemudian menyelesaikan hasil persamaan yang telah di set.

3. *Postprocessing* (*Futher Processing dan Viewing of the Results*)

Tahap *Postprocessing* digunakan untuk menampilkan hasil-hasil dari diagram kontur tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan perpindahan titik simpul (*displacement*).