

SKRIPSI

**ANALISIS KEKUATAN SIDE RAMP DOOR
KAPAL LCT JHONNY XLV MENGGUNAKAN METODE
ELEMEN HINGGA**

Disusun Dan Diajukan oleh

**INAYAH MAGFIRAH ANWAR
D031191033**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS KEKUATAN *SIDE RAMP DOOR* KAPAL LCT JHONNY XLV MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Disusun dan diajukan oleh

Inayah Magfirah Anwar
D031191033

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 26 April 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan


Menyetujui,

Pembimbing Utama,



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

Pembimbing Pendamping,



Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl.-Ing
NIP 19600425 198811 1 001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Eng. Suandar Basao, ST., MT.
NIP 19730206 200012 1 002



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Inayah Magfirah Anwar
NIM : D031191033
Program Studi : Teknik Perkapalan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisis Kekuatan Side Ramp Door Kapal LCT JHONNY XLV Menggunakan Metode Elemen Hingga}

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

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

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

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

Gowa, 26 April 2024

Yang Menyatakan



Inayah Magfirah Anwar



ABSTRAK

INAYAH MAGFIRAH ANWAR. *Analisis Kekuatan Side Ramp Door Kapal LCT JHONNY XLV Menggunakan Metode Elemen Hingga* (dibimbing oleh Hamzah dan Ganding Sitepu)

Landing Craft – Tank (LCT) adalah jenis kapal yang digunakan untuk mendaratkan muatan di perairan dangkal yang sulit untuk dijangkau dengan menggunakan kapal pengangkut biasa. Muatan yang diangkut dengan menggunakan Landing Craft – Tank (LCT) adalah alat berat, mesin, mobil, bahan konstruksi, bulldozer, dan truk, heavy cargo, ekskavator, dan barang-barang lainnya yang berbobot dan berukuran besar. *Ramp door* adalah pintu untuk memasukkan kendaraan ke dalam kapal yang mengangkut kendaraan. Selain itu penggunaan *ramp door* sangat dibutuhkan untuk mempermudah proses bongkar muat kendaraan dari dermaga penyebrangan ke kapal dan sebaliknya. *Ramp Door* ini dirancang menggunakan pin engsel sehingga pin engsel tersebut harus kuat menahan beban kendaraan dan juga berat strukturnya. *Side Ramp Door* ini menggunakan sepuluh pin engsel. Pada pin engsel ini terjadi konsentrasi tegangan karena *side ramp door* kendaraan ini beban kendaraan yang melewati *ramp door* ini. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *Software ANSYS Workbench*. Karena menggunakan baja biasa maka nilai tegangan tidak boleh melebihi 180 N/mm^2 karena melewati tegangan yang diizinkan oleh BKI. Presentase tegangan mengalami penurunan secara proporsional. Letak tegangan maksimum akibat beban truk terjadi pada pin engsel. dan jika *ramp door* mengalami kemiringan maka tegangan maksimum pada *ramp door* yaitu pada sudut 0° . Pada posisi pembebanan roda kendaraan yang melewati *ramp door* berada di tengah *ramp* masih dibawah tegangan yang diizinkan oleh BKI.

Kata Kunci: Pin Engsel, Tegangan, Metode Elemen Hingga, *Ansys Workbench*



ABSTRACT

INAYAH MAGFIRAH ANWAR. *Analisis Kekuatan Side Ramp Door Kapal LCT JHONNY XLV Menggunakan Metode Elemen Hingga* (supervised by Hamzah dan Ganding Sitepu)

Landing Craft – Tank (LCT) is a type of ship used to land cargo in shallow waters that are difficult to reach using ordinary transport ships. The cargo transported using a Landing Craft - Tank (LCT) is heavy equipment, machines, cars, construction materials, bulldozers and trucks, heavy cargo, excavators and other goods of large weight and size. Ramp door is a door for entering vehicles into a ship that carries vehicles. Apart from that, the use of ramp doors is very necessary to facilitate the process of loading and unloading vehicles from the ferry dock to the ship and vice versa. This Ramp Door is designed using hinge pins so that the hinge pins must be strong enough to withstand the weight of the vehicle and also the weight of the structure. This Side Ramp Door uses ten hinge pins. At this hinge pin, stress concentration occurs because the side ramp door of the vehicle is the weight of the vehicle passing through this ramp door. This analysis was carried out using the finite element method with the help of ANSYS Workbench Software. Because it uses ordinary steel, the stress value cannot exceed 180 N/mm^2 because it exceeds the stress permitted by BKI. The voltage percentage decreases proportionally. The location of the maximum stress due to the truck load occurs at the hinge pin. and if the ramp door is tilted, the maximum stress on the ramp door is at an angle of 0° . In the loading position, the vehicle wheels passing through the ramp door are in the middle of the ramp and are still below the tension permitted by BKI.

Keywords: Hinge Pin, Stress, Finite Element Method, ANSYS Workbench



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatu

Alhamdulillah segala puji dan syukur kepada ALLAH SWT. Atas limpahan berkat dan karunianya-nya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul “Analisis Kekuatan *Side Ramp Door* Kapal LCT JHONNY XLV Menggunakan Metode Elemen Hingga”. Yang disusun guna untuk memenuhi salah satu persyaratan bagi setiap mahasiswa untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada program Studi Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam penyelesaian tugas akhir ini merupakan suatu kebanggaan tersendiri bagi penulis karena tantangan dan hambatan yang menghadang selama mengerjakan tugas akhir ini dapat teratasi dengan penuh kesabaran dan keikhlasan serta bantuan, bimbingan, kritikan dan saran dari berbagai pihak. penulis sangat menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna dan masih banyak kekurangan di dalamnya sehingga penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang membangun demi kesempurnaan tulisan ini

Tidak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih kepada banyak pihak yang sangat membantu dan terlibat dalam banyak hal semasa penulis menjalani pendidikan di Universitas Hasanuddin. Oleh sebab itu. Disini penulis menyampaikan rasa terima kasih sedalam-dalamnya kepada:

1. 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.
2. Ibunda **Sitti Fakhriyyah**, orang tua tercinta yang senantiasa mencurahkan kasih sayang, doa dan dukungan serta motivasi yang tiada hentinya kepada penulis. Sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak **Prof. Dr. Eng. Suandar Baso. ST., MT.**, selaku Ketua Departemen Teknik Perkapalan Universitas Hasanuddin. yang telah membantu dan memberikan arahan dalam penyelesaian tugas ini.

Dr. Eng. A. Ardianti, ST., MT, selaku dosen laboratorium struktur kapal



sekaligus dosen penguji yang telah memberikan masukan dan saran sehingga penulis dapat memperoleh gelar akademik di Departemen Teknik Perkapalan.

5. Bapak **Fadhil Rizki Clausthaldi, S.T., B.Eng. M.Sc.**, selaku penguji yang telah memberikan masukan dan saran sehingga penulis dapat memperoleh gelar akademik di Departemen Teknik Perkapalan.
6. Bapak/Ibu Dosen Fakultas Teknik Departemen Teknik Perkapalan atas bimbingan, arahan, didikan dan motivasi yang telah yang telah diberikan selama di Pendidikan strata satu.
7. Staff Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas kemurahan hatinya membantu segala administrasi penulis, Selama berkuliah di Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Keluarga tercinta yang menemani selama pengerjaan skripsi.
9. Senior Laboratorium Struktur atas kesediaannya dalam berdiskusi mengenai tugas akhir ini.
10. Teman seperjuangan laboratorium struktur (Tadika Struktur'19) Wawan, Yusril, Fuad, Irma, Ifa, Anjali, Amanda, Pedep.
11. Teman-teman SMA Indah Farah Adibah, A.Alma Rezky Indriani, A. Ayu Andira.
12. Teman-teman Teknik Perkapalan 2019 dan kaum minoritas yang telah memberikan semangat selama berkuliah dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
13. Seluruh pihak terkait yang telah hadir di kehidupan kampus penulis. Baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis ucapkan terima kasih.

Semoga pihak yang membantu dalam penulisan tugas akhir ini mendapatkan pahala oleh Allah SWT. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi semua pihak bagi yang berkenan membaca dan mempelajarinya.

Gowa, Februari 2024

Penulis



DAFTAR ISI

SAMPUL	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	x
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Masalah	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Pengertian Kapal	4
2.2 Kapal Landing Craft-Tank (<i>LCT</i>)	4
2.3 <i>Ramp Door</i> (Pintu Rampa)	5
2.4 Pembebanan pada Struktur Kapal	7
2.4.1 Beban Statis	8
2.4.2 Beban Dinamis	8
2.5 Analisis Tegangan, Regangan, dan Elastisitas	9
2.5.1 Tegangan	9
2.5.2 Regangan	11
2.5.3 Elastisitas	11
2.5.4 Hubungan Tegangan dan Regangan	12
2.6 Tegangan Izin	13
Metode Elemen Hingga	14
ANSYS	16
METODE PENELITIAN	18



3.1	Waktu dan Tepat Penelitian.....	18
3.2	Jenis Penelitian.....	18
3.3	Teknik Pengumpulan Data	18
4.4	Prosedur Penyelesaian dengan Software Ansys Workbench Metode Elemen Hingga	19
4.5	Kerangka Alur Penelitian.....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		26
4.1	Pembebanan Struktur	26
4.2	Analisis Respon Struktur Kapal	27
4.2.1	Tegangan <i>Von-mises</i> Pada Setiap Kemiringan	28
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		32
5.1	Kesimpulan	32
5.2	Saran	33
DAFTAR PUSTAKA.....		34



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Hasil konvergensi tegangan berbagai ukuran meshing	22
Tabel 2 Berat kendaraan mobil truk.....	26
Tabel 3 Hasil Tegangan von-mises pada pin Variasi Kemiringan.....	29
Tabel 4 Hasil Tegangan von-mises pada pin Variasi Kemiringan.....	30



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Kapal LCT Jhonny XLV	5
Gambar 2 Batang prismatis yang mengalami tarik (a) diagram benda bebas dari segmen batang, (b) segmen batang sebelum dibebani, (c) segmen batang sesudah dibebani, dan (d) tegangan normal pada batang.....	9
Gambar 3 Tegangan yang bekerja pada suatu bidang	10
Gambar 4 Diagram Tegangan-Regangan	12
Gambar 5 Sketsa Geometri Ramp Door	20
Gambar 6 Sketsa Geometri Pin Engsel Ramp Door	20
Gambar 7 Frictional contact Engsel dan Pin Engsel.....	21
Gambar 8 Kurva konvergensi tegangan.....	22
Gambar 9 Model ramp door dengan engselnya dengan mesh size 550 mm	22
Gambar 10 Jenis tumpuan fixed support sisi pin yang terhubung dengan kapal	23
Gambar 11 Jenis tumpuan sendi pada ujung ramp door	23
Gambar 12 Model yang berhasil di running dengan tanda centang.....	24
Gambar 13 Alur Pikir Penelitian.....	25
Gambar 14 Truk Engkel 6.....	26
Gambar 15 Geometri ramp door untuk setiap variasi sudut	28
Gambar 16 Kurva hubungan antara tegangan maksimum dengan variasi kemiringan ramp door.....	29
Gambar 17 (a) Pin Engsel Ramp Door (b) Engsel Ramp Door	30
Gambar 18 Kurva hubungan antara tegangan maksimum dengan variasi kemiringan rampdoor.....	31



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Gambar General Arrangement Kapal LCT JHONNY XLV	36
Lampiran 2 Gambar Konstruksi Ramp Door	37
Lampiran 3 Gambar Kondstuksi Pin Kupingan Engsel	38



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
Q	Beban Merata (N/mm ²)
F	Gaya Berat atau Beban (N)
A	Luas Penampang (mm ²)
m	Berat truk (kg)
g	Percepatan gravitasi (m/s ²)
σ	Tegangan (N/mm ²)
ϵ	Regangan
ΔL	Pertambahan Panjang (mm)
L	Panjang mula-mula (mm)
{F}	Vektor gaya global pada titik simpul
[K]	Matriks kekakuan global struktur
{d}	Vektor perpindahan titik simpul



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Landing Craft – Tank (LCT) adalah jenis kapal yang digunakan untuk mendaratkan muatan di perairan dangkal yang sulit untuk dijangkau dengan menggunakan kapal pengangkut biasa. Muatan yang diangkut dengan menggunakan Landing Craft – Tank (LCT) adalah alat berat, mesin, mobil, bahan konstruksi, bulldozer, dan truk, heavy cargo, ekskavator, dan barang-barang lainnya yang berbobot dan berukuran besar. 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 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 Landing Craft – Tank (LCT) adalah *ramp door*.

Kapal LCT JHONNY XLV yang dibangun di PT. BAHTERA BAHARI SHIPYARD yang berada di Batam, awalnya memiliki dua deck dan mengangkut kendaraan mobil-mobil kecil. Kemudian beralih fungsi sebagai kapal angkutan muatan mobil tambang besar dan hanya menggunakan satu deck. Kapal ini juga pada awalnya hanya memiliki satu pintu rampa yang digunakan untuk menaikkan dan mengeluarkan muatan yang berada pada bagian buritan kapal. Kemudian, menambahkan satu pintu rampa pada sisi samping kapal pada saat perubahan angkutan muatan.

Side ramp door yang digunakan oleh kapal LCT JHONNY XLV adalah konstruksi baru yang dibuat di Batam dengan ukuran yang berbeda dengan *side ramp door* yang berada di buritan. Penambahan *side ramp door* ini *ramp door* pada bagian haluan digunakan untuk tempat masuknya muatan kendaraan dan untuk *side ramp door* digunakan sebagai tempat keluarnya



muatan atau kendaraan. Hal ini tentu cukup menarik perhatian karena konstruksi *side ramp door* yang baru perlu dihitung kekuatan konstruksi lanjutannya, sehingga diperlukan penelitian variasi kemiringan untuk mengetahui kekuatan konstruksi dari *side ramp door* yang baru.

Berdasarkan hal diatas maka diperlukan “***Analisis Kekuatan Terhadap Struktur Konstruksi Side Ramp Door Kapal LCT***” untuk memperkuat konstruksi *ramp door* pada kapal tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan sebelumnya, maka rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana kondisi beban yang ditanggung kekuatan struktur konstruksi *side ramp door*?
2. Bagaimana kekuatan yang terjadi pada konstruksi *side ramp door* serta letak titik *hot spot stress* pada konstruksi *side ramp door* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini yaitu:

1. Untuk mengetahui kondisi kritis yang bisa terjadi pada struktur konstruksi *side ramp door*.
2. Untuk mengetahui kekuatan *ramp door* serta letak titik paling rawan pada konstruksi *ramp door*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Sebagai bahan acuan dalam memperbaharui dan mengoptimalkan desain dan kekuatan *ramp door*.
2. Sebagai bahan acuan untuk melanjutkan skripsi selanjutnya yang berhubungan dengan topik yang telah dibahas.

1.5 Batasan Masalah

penelitian ini terarah, maka penulis mebatasi masalah pada :

n yang digunakan pada penelitian ini hanya beban kendaraan yang wati rampdoor.



2. Kondisi stabilitas tidak dibahas.
3. Pin engsel
4. Pengujian dilakukan dengan *software* ANSYS untuk mengetahui letak tegangan maksimal pada konstruksi *ramp door*.

1.6 Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN, membahas latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, berisi 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, berisi kesimpulan dari penelitian dan saran-saran.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Kapal

Berdasarkan peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 45 Tahun 2021 tentang “Pengukuran kapal bahwa kapal adalah kendaraan air dengan bentuk dan jenis tertentu, yang digerakkan dengan tenaga angin, tenaga mekanik, energi lainnya, ditarik atau ditunda, termasuk kendaraan yang berdaya dukung dinamis, kendaraan di bawah permukaan air, serta alat apung dan bangunan terapung yang tidak berpindah-pindah.” (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2021)

2.2 Kapal Landing Craft-Tank (LCT)

Landing Craft Tank (LCT) adalah jenis kapal yang awalnya dikembangkan untuk penggunaan militer, mengangkut peralatan tempur selama Perang Dunia II. Ketika Inggris mengalami kekalahan telak di Dunkirk, Perdana Menteri Inggris Winston Churchill mengusulkan rancangan kapal yang dapat mengangkut dan mendaratkan tank secara bersamaan di pantai Eropa. Kapal tersebut kemudian dikenal dengan nama *Landing Craft Tank* (LCT). Angkatan Laut AS mengembangkan LCT, yang kemudian digunakan selama Perang Korea-Vietnam.

Saat ini ada berbagai jenis kapal LCT. Jenis kapal LCT, dipecah berdasarkan ukuran kapal, meliputi:

1. Ukuran LCT ≤ 250 DWT Jenis kapal LCT dengan kapasitas maksimal 175 ton, biasanya beroperasi di perairan dangkal atau sungai kecil.
2. LCT Ukuran 400 - 500 DWT Kapal LCT jenis ini dapat beroperasi di perairan dangkal atau jarak jauh.
3. LCT ukuran 700 - 800 DWT Kapal jenis LCT ini mampu memuat barang dalam jumlah besar.
4. LCT Ukuran 1000 - 1200 DWT Kapal LCT mampu mengangkut hingga 25 alat berat ukuran sedang.

LCT, ukuran 1500 hingga 2000 DWT Jenis LCT ini dapat menempuh jarak yang sangat jauh dengan mesin yang membantu navigasi di perairan yang kasar.



6. LCT > 2500 DWT Jenis kapal LCT terbesar dengan panjang maksimal 75 meter. Kapal jenis ini mampu mengangkut 40 alat berat sedang dan besar serta mengangkut 1800 ton.

Saat ini kapal LCT digunakan sebagai kapal pengangkut barang, alat berat dan material konstruksi. Dengan menggunakan kapal LCT, alat dan bahan tersebut dapat diangkut ke daerah-daerah terpencil yang sulit dijangkau oleh kapal kargo biasa. Jenis kapal ini memiliki dek yang lebar dan datar sehingga cocok untuk mengangkut tank, tentara, atau material logistik. Secara perkembangan, senjata serang udara, meriam dan juga peluncur roket bisa dipasang di geladak kapal ini. (Lesmini, 2019)



Gambar 1 Kapal LCT Jhonny XLV
(sumber : Dokumen Pribadi)

LCT sering digunakan untuk keperluan komersial karena sangat efisien dalam mengangkut alat berat seperti bulldozer, excavator, dump truck, loader dan alat berat lainnya yang dibutuhkan untuk proyek pertambangan dan konstruksi. Selain itu, material konstruksi berukuran besar seperti pipa besi, plat baja, tangki air, dll juga dapat diangkut dengan kapal LCT. Menggunakan LCT untuk mengangkut barang ke tambang, terutama di pulau atau di daerah terpencil, lebih efisien dibandingkan dengan menggunakan tongkang. Karena LCT tidak membutuhkan pelabuhan besar untuk membongkar barang yang diangkut dan bisa bongkar muat dimana saja, misalnya langsung di darat. (Prasetyo, 2008)

2.3 Ramp Door (Pintu Rampa)

Ramp Door (pintu rampa) adalah pintu untuk memasukkan kendaraan ke kapal LCT ataupun jenis kapal lain yang mengangkut kendaraan. Rampa ramp door sangat dibutuhkan untuk mempermudah proses



membongkar dan memuat kencanaan dari dermaga penyebrangan ke kapal dan sebaliknya. *Ramp Door* dihubungkan dengan *moveable brigde* 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 actuator 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 mengkonversi kembali tekanan hidrolik menjadi tenaga putar. Motor hidrolik dapat bekerja 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)

Ada beberapa jenis *rampdoor* yang sering dipakai pada kapal antara lain :

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

apun persyaratan dalam pembuatan *ramp door* diantaranya adalah :
(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. Aerodnamis 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 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 suatu 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)

2.4 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 muatan dalam struktur (Avallone dan Baumeister, 1996).



2.4.1 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 :

- 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. (Rosyid dan Setyawan,2000).

2.4.2 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. (Rosyid dan Setyawan, 2000)

Beban dinamis adalah semua beban yang terjadi akibat pemakaian suatu struktur atau bangunan, termasuk dari beban yang bekerja di atas lantai yang dapat berpindah-pindah atau bersifat sementara. contohnya manusia, kendaraan dan peralatan yang dapat bergerak. Pembebanan pada pin engsel dirumuskan dengan persamaan 1.

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

dimana,

Q = Beban merata (N/mm²)

F = Gaya Berat Truk (N)

A = Luas Penampang ban yang menyentuh Pintu palka kendaraan (mm²)

$$F = m \cdot g \quad (2)$$

Dimana,

F = Gaya Berat Truk (N)

m = Berat Truk (kg)



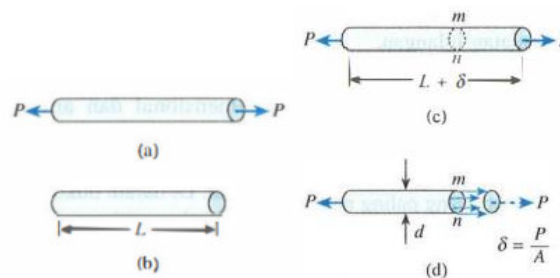
g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

2.5 Analisis Tegangan, Regangan, dan Elastisitas

2.5.1 Tegangan

Sebuah batang prismatis dengan panjang L yang diberikan aksi berupa gaya aksial P (gaya searah panjang batang) berupa tarik/tekan, akan menimbulkan reaksi pada batang yang menyebabkan terjadinya pertambahan/pengurangan panjang batang ΔL . Gere & Timoshenko (2000) menyatakan bahwa aksi ini terdiri atas gaya terdistribusi kontinu yang bekerja pada seluruh penampang. Intensitas gaya (yaitu gaya per satuan luas) ini disebut tegangan dan diberi notasi huruf Yunani σ (sigma). Jadi, gaya aksial P yang bekerja di penampang adalah resultan dari tegangan yang terdistribusi kontinu.

Penjelasan yang sama juga ditunjukkan pula oleh Sears (1944) dalam Wulandari dkk. (2016) yang menyatakan bahwa tegangan merupakan perilaku material saat diberikan gaya atau beban. Jika suatu material dengan nilai luasan penampang yang sama diberikan beban yang sama dan searah di sepanjang material tersebut nantinya akan timbul tegangan pada material tersebut. Semua bahan berubah bentuk karena pengaruh gaya. Ada yang kembali ke bentuk aslinya bila gaya dihilangkan, ada pula yang tetap berubah bentuk sedikit atau banyak.



Gambar 2 Batang prismatis yang mengalami tarik (a) diagram benda bebas dari segmen batang, (b) segmen batang sebelum dibebani, (c) segmen batang sesudah dibebani, dan (d) tegangan normal pada batang.

(Sumber: Gere & Timoshenko, 2000 halaman 4)

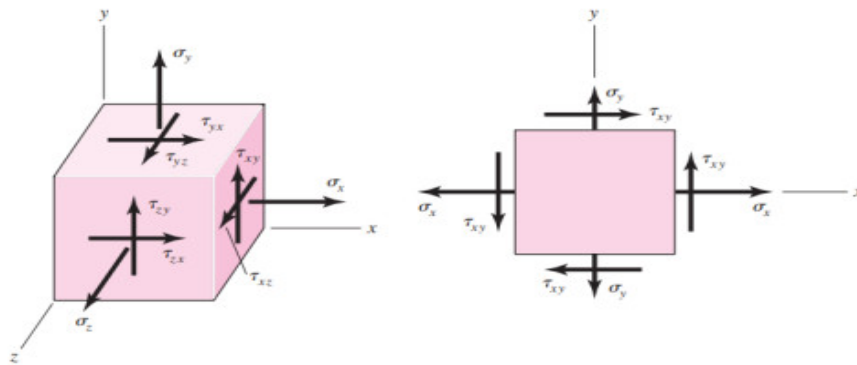
Dengan mengasumsikan bahwa tegangan terbagi rata di seluruh potongan mn (Gambar 2.3), dapat dilihat bahwa resultannya harus sama dengan intensitas σ dengan luas penampang A dari batang tersebut. Dengan demikian, rumus berikut untuk menyatakan besarnya tegangan:



$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Dimana: σ = Tegangan aksial (N/mm²)
 P = Gaya aksial (N)
 A = Luas penampang batang (mm²)

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 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)



Gambar 3 Tegangan yang bekerja pada suatu bidang
 (sumber : Shigley's, 2004)

Keterangan :

σ_x = Tegangan normal yang bekerja pada bidang x

σ_y = Tegangan normal yang bekerja pada bidang y

σ_z = Tegangan normal yang bekerja pada bidang z

σ_{xy} = Tegangan geser yang bekerja pada bidang normal x dalam arah y

σ_{yx} = Tegangan geser yang bekerja pada bidang normal y dalam arah x

σ_{xz} = Tegangan geser yang bekerja pada bidang normal x dalam arah z

σ_{zx} = Tegangan geser yang bekerja pada bidang normal z dalam arah x



Adapun persamaan untuk tegangan normal bidang tiga dimensi adalah sebagai berikut :

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_x (1 - \nu) + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_y (1 - \nu) + \nu(\epsilon_x + \epsilon_z)] \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_z (1 - \nu) + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)] \quad (6)$$

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. Contoh tegangan yang bekerja pada suatu bidang dapat dilihat pada Gambar 3.

2.5.2 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

$$\epsilon = \frac{\Delta}{L} \quad (7)$$

dimana,

ϵ = Regangan

Δ = Pertambahan Panjang (mm)

L = Panjang mula-mula (mm)

2.5.3 Elastisitas

Elastisitas adalah sifat benda yang setelah diberi gaya dan kemudian gaya dibatalkan tetap dapat kembali ke bentuk semula. Apabila batas elastisitas tercapai konstanta *Young* atau *Modulus Young*, maka benda akan mencapai batas elastisitas yang berarti tidak dapat kembali ke bentuk semula (disebut plastis). Sifat benda kemudian dinyatakan dalam tegangan, regangan, dan menjadi



dasar fenomena benda yang disebut pegas sebagaimana Hukum Hooke. (Macdonald, 2001).

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.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (8)$$

dimana,

Δ = perubahan bentuk aksial total (m)

F = beban aksial total

L = panjang batang (m)

A = luas penampang batang (m²)

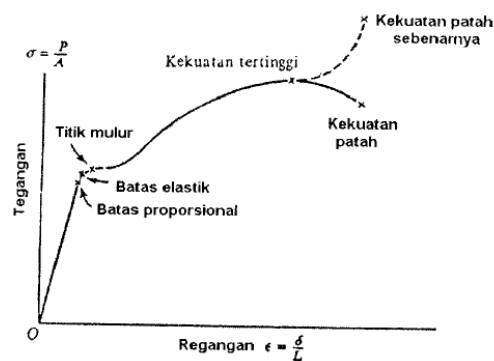
E = modulus elastisitas bahan

ϵ = regangan.

σ = tegangan (N/mm²)

2.5.4 Hubungan Tegangan dan Regangan

Jika suatu benda ditarik maka akan mulur (*estension*), terdapat hubungan antara pertambahan panjang dengan gaya yang diberikan. Jika gaya persatuan luasan disebut tegangan dan pertambahan panjang disebut regangan maka hubungan ini dinyatakan dengan grafik tegangan dan regangan (*stress-strain graph*). (Zainuri, 2008)



Gambar 4 Diagram Tegangan-Regangan
(Sumber : Zainuri, 2008)



- a) **Batas proporsional (*proportional limit*)**. Dari titik asal O ke suatu titik yang disebut batas proporsional masih merupakan garis lurus (lihat Gambar 4). Pada daerah ini berlaku hukum Hooke, bahwa tegangan sebanding dengan regangan. Kesebandingan ini tidak berlaku di seluruh diagram. Kesebandingan ini berakhir pada batas proporsional.
- b) **Batas elastis (*elastic limit*)**. Batas elastis merupakan batas tegangan di mana bahan tidak kembali lagi ke bentuk semula apabila beban dilepas tetapi akan terjadi deformasi tetap yang disebut permanent set. Untuk banyak material, nilai batas proporsional dan batas *elastic* hampir sama. Untuk membedakannya, batas elastik selalu hampir lebih besar dari pada batas proporsional.
- c) **Titik mulur (*yield point*)**. Titik mulur adalah titik di mana bahan membujur mulur tanpa penambahan beban. Gejala mulur khususnya terjadi pada baja struktur (*medium-carbon structural steel*), paduan baja atau bahan lain tidak memilikinya.
- d) **Kekuatan maksimum (*ultimate strength*)**. Titik ini merupakan ordinat tertinggi pada kurva tegangan-regangan yang menunjukkan kekuatan tarik (*tensile strength*). Titik ini merupakan ordinat tertinggi pada kurva tegangan-regangan yang menunjukkan kekuatan tarik (*tensile strength*) bahan.
- e) **Kekuatan patah (*breaking strength*)**. Kekuatan patah terjadi akibat bertambahnya beban mencapai beban patah sehingga beban meregang dengan sangat cepat dan secara simultan luas penampang bahan bertambah kecil.

2.6 Tegangan Izin

Tegangan izin adalah tegangan yang mengakibatkan suatu konstruksi mengalami lendutan yang besar dimana lendutan tersebut adalah batas sebuah konstruksi masih aman dalam mengatasi beban yang terjadi atau yang bekerja padanya. Apabila tegangan izin dari suatu konstruksi lebih kecil dari tegangan maksimum, berdasarkan BKI Volume II tahun 2016 tentang Peraturan lambung domestik mengenai dudukan bantalan dan bagian konstruksi lainnya dari engsel yang mana tegangan izin berikut tidak dilampaui. Rumus tegangan izin dapat dilihat

amaan 9.

ivalent Stress



$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} = \frac{180}{k} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (9)$$

dimana,

σ = Tegangan (N/mm²)

σ_b = Tegangan lengkung (N/mm²)

τ = Tegangan geser (N/mm²)

2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga 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 : (Susatio, 2004)

1. Analisis tegangan (*stress*), meliputi analisis truss dan frame serta masalah-masalah yang berhubungan dengan tegangan-tegangan terkonsentrasi;
2. Buckling; dan
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. 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. (Susatio, 2004)

Beberapa kelebihan dalam penggunaan metode ini adalah:

1. Dapat menganalisis masalah dengan bentuk yang tidak teratur dapat dengan mudah dianalisis



2. Tidak terdapat kesulitan dalam menganalisa beban pada suatu struktur
3. Pemodelan dari suatu benda dengan komposisi materi yang berlainan dapat dilakukan karena tinjauan yang dilakukan secara individu untuk setiap elemen
4. Dapat menangani berbagai macam syarat batas dalam jumlah yang tak terbatas
5. Variasi dalam ukuran elemen memungkinkan untuk memperoleh detail analisa yang diinginkan
6. Dapat memecahkan masalah-masalah dinamik

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 elemenelemen 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 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 :

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (10)$$

- 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

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 :

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (11)$$

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 :

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{21} & \dots & K_{n1} \\ K_{21} & \dots & & \dots \\ \dots & \dots & & \dots \\ K_{n1} & \dots & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_n \end{Bmatrix} \quad (12)$$

- 7) Penyelesaian tegangan dan regangan elemen didapatkan dari persamaan pada tahap ke-3. Persamaan tersebut dimasukkan kedalam persamaan 12 pada tahapan ke-6, sehingga tegangan elemen dapat diperoleh.
- 8) Interpretasi hasil pada 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. Ada beberapa *software* untuk analisis menggunakan elemen hingga diantaranya STAAD-PRO, GT-STRUDEL, NASTRAN, dan ANSYS.

2.8 ANSYS

Untuk mengetahui kemampuan struktur menerima beban yang dialaminya, diperlukan analisa beban yang bekerja pada struktur. Analisa beban struktur berupa analisa beban statis maupun analisa beban dinamis. (Pinem, 2013)



Dalam menganalisa struktur ada beberapa alternatif metode yang dapat digunakan. Dalam hal ini metode yang digunakan adalah program analisa struktur dengan ANSYS. Selain ANSYS, *software* FEA yang juga bisa digunakan dalam analisa struktur adalah MOSES, NAPA, dan sebagainya.

ANSYS adalah program program paket yang dapat memodelkan elemen hingga untuk penyelesaian masalah yang berhubungan dengan mekanika, termasuk didalamnya masalah statik, dinamik, analisis struktur (baik linier maupun non linear), masalah perpindahan panas, fluida dan juga masalah yang berhubungan dengan elektromagnetik. Adapun output yang dihasilkan oleh ANSYS adalah gaya aksial, gaya geser, gaya lentur, momen, dan displacement.

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

1) *Preprocessing* : pendefinisian masalah

Langkah umum dalam preprocessing terdiri dari :

- (i) Mendefinisikan *keypoint/ lines/ areas/ volume*
- (ii) Mendefinisikan tipe elemen dan bahan yang digunakan/ sifat geometric
- (iii) *Mesh lines/ areas/ volumes* sebagaimana dibutuhkan. Jumlah detil yang dibutuhkan akan tergantung pada dimensi daerah yang dianalisis, ie., ID, 2D axisymmetric dan 3D.

2) *Solution* : *assigning loads, constraints, and solving*

Di sini, perlu menentukan beban, constraints (translasi dan rotasi) dan kemudian menyelesaikan hasil persamaan yang telah diset.

3) *Postprocessing* : *further processing and viewing of the results*

menampilkan hasil dari diagram kontur tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan perpindahan titik simpul (*displacement*).

