

SKRIPSI

**STUDI KASUS ANALISIS KEKUATAN KONSTRUKSI
BALOK PELINTANG PADA KAPAL KMP AITUMIERI 1**

Disusun dan diajukan oleh:

**FUAD IRIANDI
D031191058**



**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

GOWA

2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI KASUS ANALISIS KEKUATAN KONSTRUKSI BALOK PELINTANG PADA KAPAL KMP AITUMIERI 1

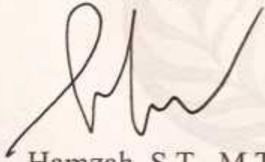
Disusun dan diajukan oleh

Fuad Iriandi
D031191058

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 22 April 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

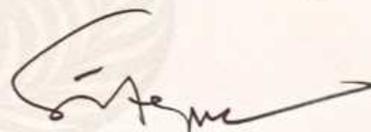
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



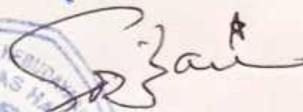
Hamzah, S.T., M.T
NIP 19800618 200501 1 004

Pembimbing Pendamping,



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

Ketua Program Studi,



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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Fuad Iriandi
NIM : D031191058
Program Studi : Teknik Perkapalan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa tulisan saya berjudul

{ Studi Kasus Analisis Kekuatan Konstruksi Balok Pelintang Pada Kapal KMP
Aitumieri I }

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan 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 dipublikasikan 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, 22 April 2024

Yang menyatakan



FUAD IRIANDI



ABSTRAK

FUAD IRIANDI. *Studi Kasus Analisis Kekuatan Konstruksi Balok Pelintang Pada Kapal KMP Aitumieri 1 (dibimbing oleh Hamzah dan Ganding Sitepu).*

Konstruksi kapal katamaran berbeda dengan kapal *monohull* pada umumnya dikarenakan pada kapal katamaran terdapat dua buah lambung (*demihull*). Kedua lambung kapal dihubungkan dengan konstruksi yang biasa disebut *cross deck*. Konstruksi pada *cross deck* merupakan konstruksi yang rentan terhadap defleksi akibat gelombang yang terjadi pada *tunnel* pada masing-masing lambung. Beban pada lambung kapal katamaran memberikan deformasi melintang pada *demihull* menyebabkan tegangan yang besar di area yang memiliki konsentrasi tegangan yang tinggi seperti sambungan antara balok pelintang dan *demihull*. Penelitian dilakukan untuk mengetahui tegangan saat kapal terkena gelombang dari arah *beam sea* dimana dilakukan simulasi kemiringan muka air dan tegangan saat kapal terkena gelombang dari arah *quartering sea* dimana dilakukan beban akibat momen torsi. Dalam penelitian ini telah dilakukan simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software Ansys Mechanical APDL*. Dalam penelitian ini diaplikasikan variasi kemiringan muka air yaitu 2 derajat, 4 derajat, 6 derajat, 8 derajat dan 10 derajat untuk kondisi gelombang arah *beam sea* dan variasi momen torsi untuk kondisi gelombang arah *quartering sea*. Tegangan maksimum untuk kondisi *beam sea* yaitu untuk kemiringan 2 derajat sebesar $7,139 \text{ N/mm}^2$, 4 derajat sebesar $10,709 \text{ N/mm}^2$, 6 derajat sebesar $16,955 \text{ N/mm}^2$, 8 derajat sebesar $20,524 \text{ N/mm}^2$ dan $24,093 \text{ N/mm}^2$. Rata-rata kenaikan tegangan tiap derajat sebesar $2,008 \text{ N/mm}^2$. Sementara itu, tegangan maksimum untuk kondisi *beam sea* yaitu untuk variasi momen torsi 8 kNm sebesar $74,845 \text{ N/mm}^2$, untuk variasi momen torsi 9 kNm sebesar $84,206 \text{ N/mm}^2$, untuk momen torsi rules 9,778 kNm sebesar $91,478 \text{ N/mm}^2$, untuk variasi momen torsi 11 kNm sebesar $102,927 \text{ N/mm}^2$ dan untuk variasi momen torsi 12 kNm sebesar $112,287 \text{ N/mm}^2$.

Kata kunci : Kapal Katamaran, Balok Pelintang, Tegangan Normal, Tegangan *Von Misses*



ABSTRAK

FUAD IRIANDI. *Case Study Strength Analysis of Transverse Beam Construction on KMP Aitumieri 1 (supervised by Hamzah and Ganding Sitepu).*

The construction of a catamaran ship is different from a monohull ship in general because in a catamaran ship there are two hulls (demihull). The two hulls are connected by a construction called cross deck. Construction of cross deck is a construction that is vulnerable to deflection due to waves that occur in the tunnel on each hull. The load on the catamaran hull gives transverse deformation to the demihull causing large stresses in areas that have high stress concentrations such as the connection between the cross beam and the demihull. The study was conducted to determine the stress when the ship is subjected to waves from the beam sea direction where the water level slope simulation is carried out and the stress when the ship is subjected to waves from the quartering sea direction where the load due to torsional moment is carried out. In this study, numerical simulations have been carried out using the finite element method with the help of Ansys Mechanical APDL software. In this study, variations in water level slope of 2 degrees, 4 degrees, 6 degrees, 8 degrees and 10 degrees are applied for beam sea wave conditions and variations in torque moment for quartering sea wave conditions. The maximum stresses for beam sea conditions are for a 2 degree slope of 7.139 N/mm², 4 degrees of 10.709 N/mm², 6 degrees of 16.955 N/mm², 8 degrees of 20.524 N/mm² and 24.093 N/mm². The average increase in stress per degree is 2.008 N/mm². Meanwhile, the maximum stress for beam sea condition is for variation of torque moment of 8 kNm is 74.845 N/mm², for variation of torque moment of 9 kNm is 84.206 N/mm², for torque moment of rules 9.778 kNm is 91.478 N/mm², for variation of torque moment of 11 kNm is 102.927 N/mm² and for variation of torque moment of 12 kNm is 112.287 N/mm².

Keywords: Catamaran Ship, Transverse Girder, Normal Stress, Von Misses Stress



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh

Syukur Alhamdulillah penulis ucapkan atas berkat rahmat dan karunia Allah ﷻ serta shalawat dan salam tercurahkan kepada Rasulullah ﷺ. Dengan segala nikmat yang dikaruniakan oleh Allah ﷻ serta dengan digerakkannya pula hati dan pikiran penulis oleh Allah ﷻ sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul **“Analisis Kekuatan Konstruksi Balok Pelintang Pada Kapal Katamaran”**. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan kelulusan pada jenjang strata satu Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

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. Bapak **Hamzah, ST., MT**, selaku pembimbing I dan Bapak **Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl-Ing**, selaku pembimbing II yang senantiasa membimbing dan mengarahkan penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
2. Ibu **Dr.Eng. A. Ardianti, ST., MT**. dan Bapak **Farianto Fachruddin, ST., MT**. selaku Penguji yang telah menghantarkan penulis memperoleh gelar akademik pada Departemen Teknik Perkapalan serta telah meluangkan waktu untuk berkonsultasi demi kesempurnaan tugas akhir ini.
3. Bapak **Prof. Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT**. selaku Ketua Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak/Ibu Dosen Fakultas Teknik Departemen Teknik Perkapalan atas ilmu, bimbingan, arahan, didikan, dan motivasi yang telah diberikan.
5. Orang tua dan saudara saudari tercinta ayahanda **Drs. Jufri Sakka** dan Ibunda **Murni S.** serta saudara saudari penulis yang tercinta Alya Ramadhani dan Al-Muqsit yang senantiasa memberikan do'a dan dukungan serta motivasi kepada penulis.

teman-teman seperjuangan laboratorium struktur Indrawansyah, Yusril Muhammad Rafly, Inayah Magfira Anwar, Amanda Putri Ayudha,



Nursyamsi Anjali Jr., Putri Dian Purnama, Musfaida, dan Irmawati yang telah memberi dukungan dan teman berbagi selama berada dilaboratorium struktur kapal.

7. Teman-teman Teknik Perkapalan 2019 yang telah memberikan semangat selama perkuliahan dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

Semoga pihak yang membantu dalam penulisan tugas akhir mendapatkan pahala oleh Allah dan bermanfaat bagi semua pihak.

Gowa, 22 April 2024

Penulis



DAFTAR ISI

LEMBAR SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
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 Penyusunan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Kapal Berlambung Banyak (<i>Multihull</i>).....	5
2.2 Konstruksi Balok Pelintang.....	5
2.3 Defenisi Gelombang.....	5
2.3 Pembebanan Pada Kapal.....	6
2.3.1 Kondisi Kapal Dengan Gelombang <i>Beam Sea</i>	7
2.3.2 Kondisi Kapal Dengan Gelombang <i>Quartering Sea</i>	9
2.4 Tegangan.....	10
2.4.1 Tegangan Normal.....	10
2.4.2 Tegangan Geser.....	11
2.4.3 Tegangan Lentur.....	12
2.4.4 Tegangan.....	13
2.4.5 Tegangan.....	13



2.7 Hubungan Tegangan dan Regangan.....	14
2.8 Metode Elemen Hingga.....	15
2.9 Ansys.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Jenis Penelitian.....	19
3.2 Waktu Penelitian.....	19
3.3 Teknik Pengumpulan Data & Jenis Data.....	19
3.4 Prosedur Analisis dengan Metode Elemen Hingga.....	21
3.5 Alur Penelitian.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	26
4.1 Perhitungan Beban.....	26
4.2.1 Perhitungan Beban Kondisi Gelombang <i>Beam Sea</i>	26
4.2.2 Perhitungan Beban Kondisi Gelombang <i>Quartering Sea</i>	30
4.2 Hasil dan Analisa.....	32
4.2.1 Tegangan <i>Von Misses</i> Akibat Kondisi Gelombang <i>Beam Sea</i>	32
4.2.2 Tegangan Normal Sumbu X Kondisi Gelombang <i>Beam Sea</i>	34
4.2.3 Tegangan <i>Von Misses</i> Kondisi Gelombang <i>Quartering Sea</i>	35
4.2.4 Tegangan Geser YZ Kondisi Gelombang <i>Quartering Sea</i>	37
4.2.5 Analisis Sebaran Tegangan Sepanjang Balok Pelintang.....	38
BAB V KESIMPULAN.....	40
5.1 Kesimpulan.....	40
5.2 Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA.....	42
LAMPIRAN.....	43



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Konstruksi balok pelintang atau <i>transverse girder</i>	5
Gambar 2	Defenisi gelombang.....	6
Gambar 3	Gaya geser vertikal (<i>vertical shear forces</i>) dan momen lentur melintang (<i>transverse bending moment</i>).....	7
Gambar 4	Ilustrasi pembebanan.....	8
Gambar 5	Selisih displacement lambung kanan (<i>starboard</i>) dan lambung kiri (<i>portside</i>).....	8
Gambar 6	Pembebanan pada kondisi <i>quartering sea</i>	9
Gambar 7	Posisi kapal saat terkena gelombang dari <i>quartering sea</i>	9
Gambar 8	Batang prismatic yang mengalami tarik.....	11
Gambar 9	Deformasi akibat tegangan lentur.....	12
Gambar 10	Hubungan tanda momen lentur dan tanda kurva.....	12
Gambar 11	Diagram tegangan dan regangan.....	14
Gambar 12	Aprokmisasi solusi keseluruhan diperoleh dari gabungan solusi-solusi elemen.....	16
Gambar 13	Detail ukuran <i>transverse framing</i> dan balok pelintang	20
Gambar 14	Konstruksi framing lambung kapal.....	20
Gambar 15	Konstruksi balok pelintang (<i>transverse girder</i>) pada lingkaran merah.....	21
Gambar 16	Konstruksi balok pelintang tampak atas.....	21
Gambar 17	Pemodelan tampak atas.....	22
Gambar 18	Pemodelan tampak bawah.....	22
Gambar 19	Kurva konvergensi tegangan.....	23
Gambar 20	Hasil <i>meshing</i> model.....	24
Gambar 21	Tumpuan pada model.....	24
Gambar 22	<i>Flowchart</i> alur penelitian.....	25
Gambar 23	Kurva displacement kapal kemiringan muka air 2 derajat...	27
Gambar 24	Kurva displacement kapal kemiringan muka air 4 derajat...	27
Gambar 25	Kurva displacement kapal kemiringan muka air 6 derajat...	28
Gambar 26	Kurva displacement kapal kemiringan muka air 8 derajat...	28



Gambar 27	Kurva displacement kapal kemiringan muka air 10 derajat..	29
Gambar 28	Pembebanan akibat kemiringan muka air.....	30
Gambar 29	Pembebanan akibat gelombang <i>quartering sea</i>	32
Gambar 30	Gradasi tegangan <i>von misses</i> akibat kemiringan muka air...	32
Gambar 31	Kurva hubungan kemiringan muka air dengan tegangan maksimum.....	33
Gambar 32	Gradasi tegangan normal sumbu x pada konstruksi balok pelintang dan transverse framing akibat kemiringan muka air.....	34
Gambar 33	Kurva hubungan kemiringan muka air dengan tegangan normal sumbu x.....	35
Gambar 34	Gradasi tegangan maksimum pembebanan akibat momen torsi.....	35
Gambar 35	Kurva hubungan momen torsi dengan tegangan maksimum.	36
Gambar 36	Gradasi tegangan geser YZ pembebanan akibat momen torsi.....	37
Gambar 37	Kurva hubungan momen torsi dengan tegangan geser YZ...	37
Gambar 38	Sebaran tegangan sepanjang balok.....	38



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Hasil konvergensi tegangan dengan berbagai ukuran <i>meshing</i>	22
Tabel 2	Data displacement kapal KMP Aitumieri 1.....	25
Tabel 3	Perhitungan beban.....	28
Tabel 4	Variasi momen torsi dan gaya.....	30
Tabel 5	Nilai tegangan maksimum variasi keolengan dan tegangan izin BKI.....	32
Tabel 6	Nilai tegangan normal maksimum sumbu x dan tegangan izin BKI.....	33
Tabel 7	Variasi nilai momen torsi dan tegangan maksimum.....	35
Tabel 8	Nilai tegangan geser maksimum pada tiap variasi momen torsi.....	36



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Kurva hidrostatis KMP Aitumieri 1.....	40
------------	--	----



DAFTAR NOTASI

Lambang	Arti dan Keterangan
Δ	Displacement kapal (ton)
Δ'	Displacement kapal saat terjadi kemiringan muka air (ton)
δ	Selisih displacement air tenang dan displacement lambung saat terjadi perbedaan sarat (ton)
Mt	Momen torsi (kNm)
Mp	Momen puntir (kNm)
σ	Tegangan (N/mm^2)
σ_v	Tegangan izin BKI von misses (N/mm^2)
σ_b	Tegangan izin BKI lentur (N/mm^2)
τ	Tegangan geser (N/mm^2)
q	Beban garis (N/mm)
F	Gaya (N)



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembangnya teknologi dunia perkapalan, penggunaan kapal berbadan banyak (*Multihull*) mulai berkembang pesat untuk kapal-kapal penumpang (*passenger & ferries*), kapal perikanan (*fishing vessels*), sarana olahraga (*spoting craft*) serta kapal-kapal riset (*oceanographic research vessel*). Salah satu di antaranya yaitu kapal berlambung dua atau dikenal sebagai kapal *Catamaran*. Pada dasarnya fungsi kapal-kapal katamaran ini sama saja dengan kapal-kapal berlambung tunggal (*monohull*) akan tetapi kapal dengan lambung ganda menawarkan berbagai kelebihan dibanding kapal *monohull* pada umumnya, utamanya dalam hal peningkatan stabilitas arah melintang dan letak akomodasi yang lebih luas. Oleh karena akses akomodasi yang lebih luas pada kapal katamaran ini, maka kapal ini menjadi pilihan yang menarik untuk kebutuhan kapal penyeberangan di daerah terpencil yang hanya bisa diakses melalui perairan.

Konstruksi kapal katamaran berbeda dengan kapal *monohull* pada umumnya dikarenakan pada kapal katamaran terdapat dua buah lambung (*demihull*). Hal yang membedakan konstruksi kapal *multihull* dengan *monohull* salah satunya adalah terdapat konstruksi sambungan antara *demihull* dengan *wetdeck* atau yang biasa disebut *cross deck*. Konstruksi pada *cross deck* merupakan konstruksi yang rentan terhadap defleksi akibat gelombang yang terjadi pada *tunnel* pada masing-masing lambung (Juneva,dkk 2017).

Beban pada lambung kapal katamaran memberikan deformasi melintang pada *demihull* menyebabkan tegangan yang besar di area yang memiliki konsentrasi tegangan yang tinggi seperti sambungan antara *transverse girder* dan *demihull* (Heggelund,dkk 2000). Konstruksi ini akan mengalami tegangan akibat *transverse bending moment* yang terjadi pada ketika posisi tengah kapal arah melintang berada di puncak gelombang. Posisi lainnya yang juga menghasilkan *transverse bending moment* yaitu ketika posisi tengah kapal arah melintang berada di lembah

ng (*demihull* berada di puncak gelombang). Selain itu, perbedaan tinggi ara satu lambung dengan yang lainnya akibat pengaruh gerak gelombang pengaruh pada sebaran gaya apung yang diterima oleh kapal, dimana hal



ini menyebabkan konstruksi balok pelintang (*transverse girder*) menerima gaya lateral yang menghasilkan tegangan lentur dan tegangan geser pada konstruksi tersebut.

KMP Aitumieri 1 adalah kapal jenis katamaran milik Dinas Perhubungan Kabupaten Teluk Wondama yang dibangun di galangan PT Dok dan Perkapalan Air Kantung. Kapal ini secara transversal diperkuat dengan konstruksi gading-gading pada *demihull* yang dihubungkan oleh konstruksi balok pelintang. Untuk mengetahui apakah balok pelintang ini mampu menahan beban yang terjadi pada kapal maka dilakukan penelitian dengan judul “Analisis Kekuatan Konstruksi Balok Pelintang Pada Kapal Katamaran”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka rumusan masalah yang akan diteliti yaitu :

1. Berapa besaran tegangan maksimum pada balok pelintang akibat kemiringan muka air akibat kondisi *Beam sea* ?
2. Berapa besaran tegangan maksimum balok pelintang saat terjadi puntiran akibat kondisi *Quartering sea* ?

1.3 Batasan Masalah

Masalah yang diteliti dibatasi dalam lingkup sebagai berikut:

1. Data kapal yang digunakan yakni kapal katamaran KMP Aitumieri 1.
2. Berat kapal atau Displacement yang menjadi acuan perhitungan pembebanan pada tiap-tiap variasi kemiringan muka air yaitu berat kapal saat kondisi pemuatan penuh atau *full loaded*.
3. Data diolah menggunakan software *ANSYS Mechanical APDL*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yaitu:

1. Menentukan nilai tegangan maksimum pada balok pelintang saat terjadi

tingan muka air.

Menentukan nilai tegangan maksimum pada balok pelintang saat terjadi puntiran pada kapal.



1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Menambah pengetahuan penggunaan software ANSYS APDL.
2. Sebagai sumber referensi untuk penelitian berikutnya.

1.6 Sistematika Penyusunan

Sistematika penyusunan laporan skripsi “Analisis Kekuatan *Transverse Girder* Pada Kapal Katamaran” ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN, bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah serta tujuan dan manfaat penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, bab ini berisi teori-teori dasar yang menunjang penelitian dan pembahasan skripsi utamanya rumus-rumus tentang tegangan dan regangan, metode elemen hingga dan momen.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN, bab ini menunjukkan lokasi penelitian, waktu penelitian, jenis penelitian, jenis data, metode pengolahan data dan diagram langkah penyelesaian masalah.

BAB IV PEMBAHASAN, bab ini menyajikan hasil penelitian beserta pembahasannya.

BAB V PENUTUP, bab ini berisi kesimpulan dan saran yang berkaitan dengan penelitian.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Berlambung Banyak (*Multihull*)

Kapal berlambung banyak atau *multihull* adalah jenis kapal yang memiliki lebih dari satu lambung. Beberapa jenis kapal *multihull* antara lain, *Catamaran* (Katamaran) yakni kapal yang memiliki dua lambung, *SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull)* yakni varian lain dari katamaran tetapi di desain dengan meminimalkan luas penampang lambung utamanya didaerah dekat permukaan air, *Trimaran* yakni kapal dengan tiga lambung dan *pentamaran* atau kapal dengan lima lambung.

Katamaran termasuk jenis kapal *multihull* dengan dua lambung (*demihull*) yang dihubungkan dengan struktur *bridging*. Struktur *bridging* ini merupakan sebuah keuntungan katamaran karena menambah tinggi lambung timbul (*freeboard*) sehingga kemungkinan terjadi *deck wetness* dapat dikurangi. Kapal jenis ini dirancang dengan lambung ganda (*Twin Hull*) sehingga, kedua lambung tersebut duhubungkan dengan konstruksi geladak yang kuat dan merentang diatasnya untuk menahan momen lentur dan gaya geser (*shear forces*) yang besar dan bekerja terhadap garis *centerline* kapal. Terdapat banyak model bentuk badan katamaran, tetapi secara umum ada tiga bentuk dasar dari katamaran yakni:

- a. Model *Twinhull* yang kedua sisinya simetris streamline
- b. Model *asymmetric* yang bagian sisi luarnya streamline.
- c. Model *asymmetric* yang bagian sisi dalamnya streamline.

(Boucasse & Broglia,2013)

Sedangkan penampang body plan katamaran dibedakan menjadi dua bentuk yaitu:

- a. *Round Bilge*

Bentuk badan kapal tipe ini diperuntukkan untuk kapal kecepatan rendah dan bermuatan lebih banyak.

- b. *Hard Chine*

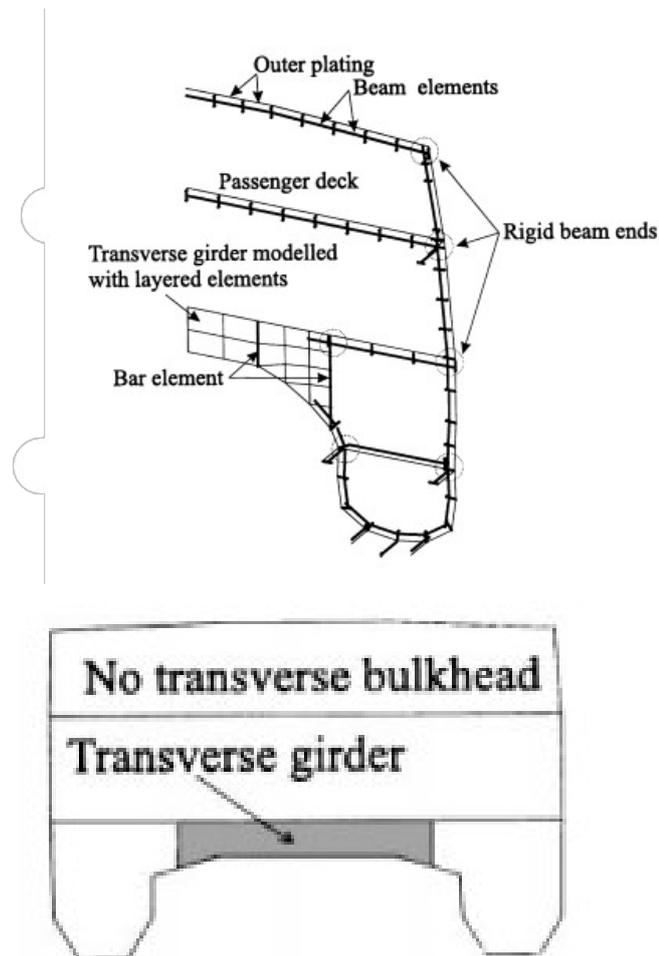
Bentuk badan kapal digunakan untuk kapal berkecepatan lebih tinggi bermuatan ringan.

(Hardjono,2010)



2.2 Konstruksi Balok Pelintang

Karena bentuk kapal katamaran yang unik yakni memiliki dua lambung, maka dibutuhkan konstruksi yang kuat sebagai bagian penghubung kedua lambung tersebut (struktur *bridging*). *Transverse framing* dihubungkan oleh konstruksi balok pelintang dimana ketebalannya tidak terlalu berbeda jauh dengan ketebalan sekat melintang. Konstruksi ini sekilas terlihat mirip dengan sekat melintang tetapi hanya meliputi struktur *bridging* dan tidak sampai pada bagian demihull. (Heggelund,dkk 2000). Konstruksi tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Konstruksi balok pelintang atau *transverse girder* (Heggelund,dkk,2000)

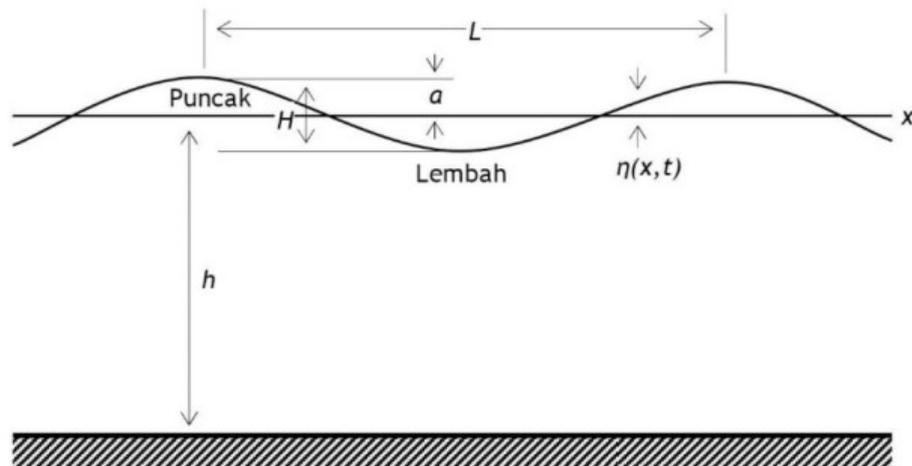
2.3 Defenisi Gelombang

Gelombang adalah gerak naik turun air dengan arah tegak lurus permukaan yang membentuk kurva/grafik sinusoidal. Gelombang di laut dapat menjadi beberapa macam yang tergantung pada gaya pembangkitnya.



Gelombang tersebut adalah gelombang angin yang dibangkitkan oleh tiupan angin di permukaan laut, gelombang pasang surut dibangkitkan oleh gaya Tarik benda-benda langit terutama matahari dan bulan terhadap bumi, gelombang tsunami terjadi karena letusan gunung berapi dan gempa di laut, gelombang yang dibangkitkan oleh kapal yang bergerak dan sebagainya.(Triatmodjo,B.,2016)

Gambar 2 Menunjukkan suatu gelombang yang berada pada system koordinat x-y yang menjalar pada arah sumbu x.



Gambar 2 Defenisi Gelombang

Dari Gambar 2 dapat diketahui bahwa,

L = Panjang gelombang

H = Tinggi gelombang

h = Kedalaman laut

a = amplitude gelombang

η = fluktuasi muka air terhadap muka air dalam

2.4 Pembebanan Pada Kapal

Beban yang terjadi pada kapal terdiri dari 2 macam, yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban statis adalah beban yang bersifat tetap misalnya berat konstruksi kapal beserta seluruh isinya dan gaya tekan keatas statis saat diam atau bergerak. Adapun beban dinamis adalah beban yang berubah-ubah besarnya dalam waktu tertentu misalnya beban akibat variasi tekanan pada lambung akibat

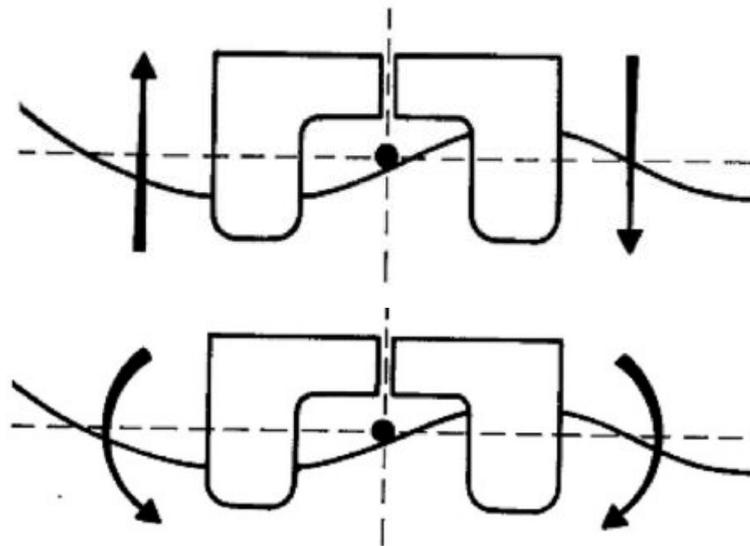
ng.



Optimization Software:
www.balesio.com

2.3.1. Kondisi Kapal Dengan Gelombang *Beam Sea*

Ketika kapal terkena gelombang dari arah samping (*Beam sea*), maka dapat terjadi perbedaan sarat antara kedua lambung kapal katamaran. Perbedaan sarat ini menyebabkan gaya geser vertikal (*vertical shear forces*) dan momen lentur melintang (*transverse bending moment*). Pada kondisi ini, struktur penghubung antar lambung (*cross deck*) sangat rentan mengalami deformasi karena area tersebut berpotensi memiliki tegangan yang besar. Gaya-gaya tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.

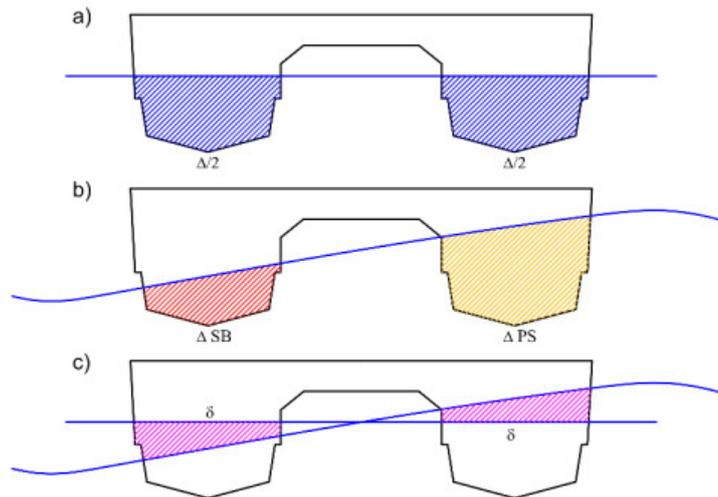


Gambar 3 Gaya geser vertikal (*vertical shear forces*) dan momen lentur melintang (*transverse bending moment*) (Sen,D. & Negi,A.,2016)

Saat kapal katamaran berada dalam keadaan air tenang (*still water*), maka berat kapal akan terdistribusi sama besar antar lambung kanan dan lambung kiri. Berdasarkan Hukum Archimedes, berat air yang dipindahkan oleh kapal adalah gaya apung (*force of buoyancy*) dan titik berat air yang dipindahkan ialah titik tekan kapal. Gaya berat kapal (*force of gravity*) memiliki nilai sama dengan gaya apung (*force of buoyancy*) tetapi arah kerja keduanya saling berlawanan serta masing-masing bekerja secara vertikal. Untuk menghitung pembebanan, maka berdasarkan Hukum Archimedes diatas, jika volume carena pada kondisi air tenang lebih besar

me carena saat terjadi perbedaan sarat kanan dan sarat kiri kapal maka beban positif dan sebaliknya. Untuk lebih jelasnya ditampilkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.





Gambar 4 a) Displacement kapal saat air tenang (*still water*), b) Displacement tiap lambung kapal saat terjadi kemiringan muka air akibat gelombang, c) Selisih displacement lambung air tenang dengan displacement saat gelombang

Selisih antara displacement air tenang dan displacement saat terjadi gelombang kemudian dihitung untuk mendapatkan arah gaya. Jika selisih displacement bernilai positif maka arah gaya berlaku vertikal ke bawah (gaya berat kapal) dan sebaliknya jika selisih displacement negatif maka arah gaya ke atas (gaya apung) (Sun,C.T,dkk,2018). Untuk mendapatkan nilai tersebut, maka dihitung dengan menggunakan Persamaan 1.

$$\delta = \frac{\Delta}{2} - \Delta_{SB} \text{ atau } \delta = \frac{\Delta}{2} - \Delta_{PS} \quad (1)$$

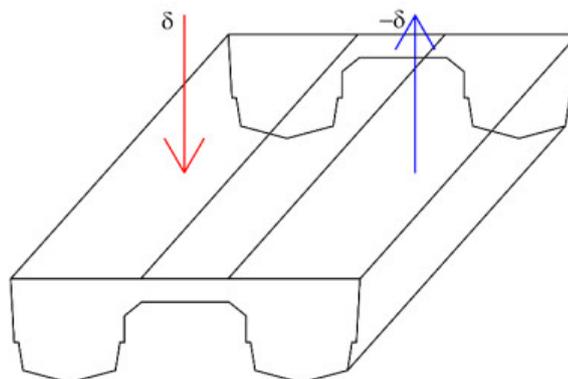
dimana,

δ = Selisih displacement (ton)

Δ = Displacement kapal (ton)

Δ_{PS} = Displacement lambung kiri saat terjadi gelombang (ton)

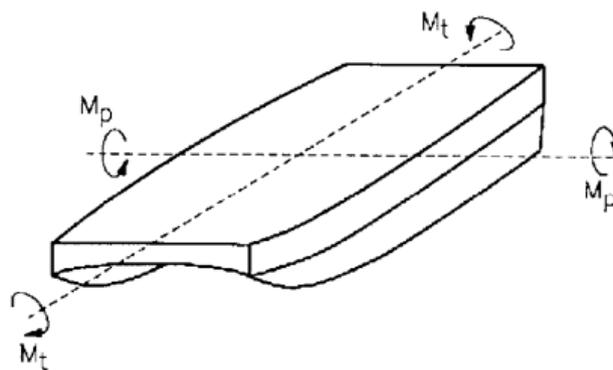
Δ_{SB} = Displacement lambung kanan saat terjadi gelombang (ton)



Gambar 5 Selisih displacement lambung kanan (*starboard*) dan lambung kiri (*portside*)

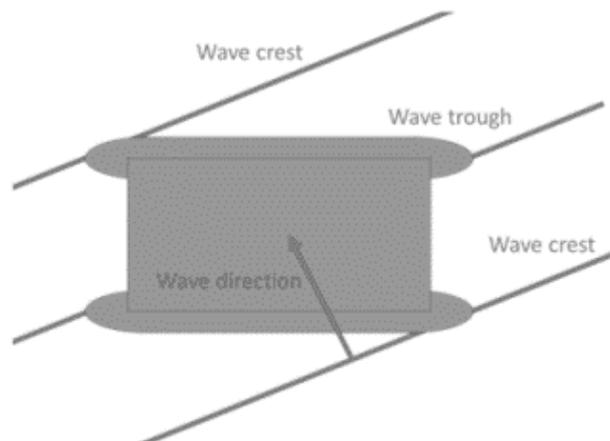
2.3.2. Kondisi Kapal Dengan Gelombang *Quartering Sea*

Adapun untuk pembebanan pada kondisi kapal saat melewati gelombang *quartering sea*, persebaran beban dilakukan dengan cara membagi empat bagian yaitu bagian haluan *starboard*, haluan *portside*, buritan *starboard* dan buritan *portside*. Nilai beban yang diterapkan pada model sama besarnya dengan perhitungan beban pada kondisi gelombang *beam sea* tetapi arah pembebanan disesuaikan sedemikian rupa agar model dapat terpuntir. Gaya puntir pada kapal katamaran ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Pembebanan pada kondisi *quartering sea*
(DNV Rules for Classification Pt.3 Ch.1, 2023)

Ketika kapal terkena gelombang dari arah diagonal kapal (*Quartering Sea*), maka kapal akan mengalami puntiran diakibatkan karena posisi puncak gelombang akan berada haluan salah satu lambung dan secara bersamaan juga berada pada bagian buritan lambung yang lainnya atau sebaliknya (lihat Gambar 7).



Gambar 7 Posisi kapal saat terkena gelombang dari *quartering sea* (Shih, Y.C.dkk, 2019)

Untuk menghitung besaran nilai momen torsional pada kapal katamaran maka digunakan rumus pada Persamaan 2 (DNV *Rules for Classification* HSLC Pt.3 Ch.1 2023).

$$M_t = \frac{\Delta a_{cg} b}{4} \quad (2)$$

dimana,

- Δ = Displacement (Ton)
- b = Jarak antar centerline lambung (m)
- a_{cg} = Akselerasi vertical pada LCG (g)
- g = Gravitasi (m/s^2)

2.5 Tegangan

Tegangan adalah gaya dalam yang bekerja pada luasan yang kecil tak berhingga pada sebuah potongan yang terdiri dari bermacam-macam besaran dan arah. Gaya-gaya dalam ini merupakan vector dalam alam dan bertahan dalam kesimbangan terhadap gaya-gaya luar terpakai. (Amir,2022)

2.4.1 Tegangan Normal

Setiap material adalah elastis pada keadaan alaminya. Karena itu jika gaya luar bekerja pada benda, maka benda tersebut akan mengalami deformasi. Ketika benda tersebut mengalami deformasi, molekulnya akan membentuk tahanan terhadap deformasi. Tahanan ini per satuan luas dikenal dengan istilah tegangan (Wardi, 2021).

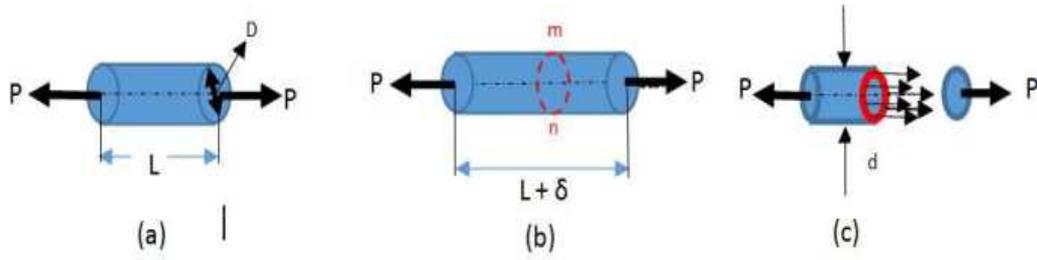
Tegangan normal merupakan ukuran dari gaya aksial atau gaya normal per satuan luas. Tegangan aksial yang bekerja (σ_a) pada elemen baja dihitung dengan Persamaan 3 (Haryono,2021). Untuk jelasnya lihat Gambar 8.

$$\sigma_a = \frac{P_{max}}{A} \quad (3)$$

dimana,

- σ_a = Tegangan aksial (N/mm^2)
- = Gaya yang bekerja (kN)
- = Luas penampang (m^2)





Gambar 8 Batang prismatic yang mengalami Tarik (a) diagram benda bebas dari segmen batang, (b) segmen batang setelah dibebani, (c) tegangan normal pada batang. (Gere & Timoshenko,2000)

2.4.2 Tegangan Geser

Tegangan geser (τ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser (S) yang saling berlawanan arah (aksi–reaksi) terhadap suatu bidang geser, pada satuan luas bidang penampang tahanan elemen struktur (A). Sehingga bidang penampang tersebut mengalami regangan geser searah bekerjanya gaya. Jika besaran gaya geser (S) dikerjakan pada batang akan menimbulkan tegangan geser (τ). Tegangan geser (τ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang adalah melintang batang atau tegak lurus batang (Haryono, 2021).

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 (Wardi, 2021 dalam Imran,2022).

$$\tau = \frac{V \cdot St}{I \cdot b} \quad (4)$$

dimana,

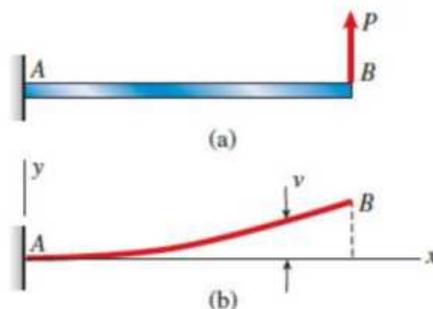
- T = Tegangan geser (N/mm^2)
- V = Gaya yang sejajar elemen (N)
- A = Luas Penampang (mm^2)
- St = Statis momen terhadap sumbu netral (mm^3)
- I = Momen inersia penampang (mm^4)
- b = Tebal (mm)



2.4.3 Tegangan Lentur

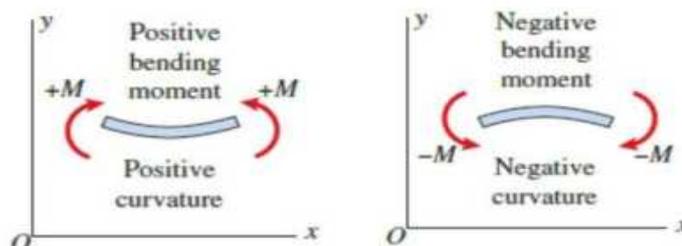
Tegangan lentur memiliki nilai terbesar disisi bagian atas dan disisi bagian bawah balok. Tegangan lentur tersebut bekerja secara tegak lurus terhadap penampang melintang dan berada dalam arah longitudinal dari balok. Merupakan gaya yang bekerja pada jarak tertentu (L) dari tumpuan benda dengan arah kerja tegak lurus sumbu benda. Sehingga mengakibatkan benda melentur/melengkung disepanjang sumbunya. (Haryono, 2021 dalam Imran,2022).

Beban yang bekerja pada sebuah balok (beam) menyebabkan beam melentur/bending, hal tersebut menyebabkan deformasi sumbu beam hingga membentuk kurva. Sebagai contoh, asumsikan sebuah balok kantilever AB dikenai beban P pada ujung bebas pada Gambar 8a. Sumbu yang awalnya lurus membengkok hingga membentuk kurva Gambar 8b, yang disebut dengan defleksi. (Gere & Goodno, 2009 dalam Imran,2022)



Gambar 9 Deformasi akibat tegangan lentur
(Gere & Goodno,2009 dalam Imran,2022)

Jika momen lentur dari balok adalah positif, maka tegangan lentur akan positif (tensil) pada bagian penampang balok dimana y negatif, yaitu dibagian bawah balok. Tegangan pada bagian atas balok akan negatif (kompresi). Jika momen lentur negatif, maka tegangan lentur kebalikannya. Hubungan ini ditunjukkan pada Gambar 10 (Gere & Goodno, 2009 dalam Imran,2022).



Gambar 10 Hubungan tanda momen lentur dan tanda kurva
(Gere & Goodno,2009 dalam Imran,2022)



Adapun persamaan tegangan lentur ditunjukkan pada Persamaan 5.

$$\sigma = M \left(\frac{y}{I} \right) \text{ atau } \sigma = \frac{M}{W} \quad (5)$$

dimana,

- Σ = Tegangan lentur (N/mm²)
- M = Momen (N.mm)
- Y = Jarak dari sumbu netral (mm)
- I = Momen inersia penampang (mm⁴)
- W = Modulus penampang (mm³)

2.6 Regangan

Regangan adalah Perubahan pada ukuran sebuah benda karena gaya-gaya atau kopel dalam kesetimbangan dibandingkan dengan ukuran semula. Regangan juga disebut derajat deformasi (Wulandari dkk, 2021 dalam Imran,2022).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

dimana,

- E = Regangan
- ΔL = Pertambahan panjang (mm)
- L = Panjang mula-mula (mm)

2.7 Elastisitas

Elastisitas adalah sifat benda yang setelah diberi gaya dan kemudian gaya dihilangkan tetap dapat kembali ke bentuk semula. Apabila batas elastisitas tercapai dalam konstanta *Young* atau *Modulus Young*, maka benda akan mencapai batas deformasi yang berarti 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 (Amir,2022).

Sesuai dengan Hukum Hooke, tegangan sebanding dengan regangan. Hal ini di dalam batas elastis. Perbandingan tegangan satuan σ untuk regangan ε dari setiap bahan yang diberikan dari hasil eksperimen, memberikan suatu konstanta yang disebut modulus elastisitasnya, yaitu Elastisitas E (Amir,2022).



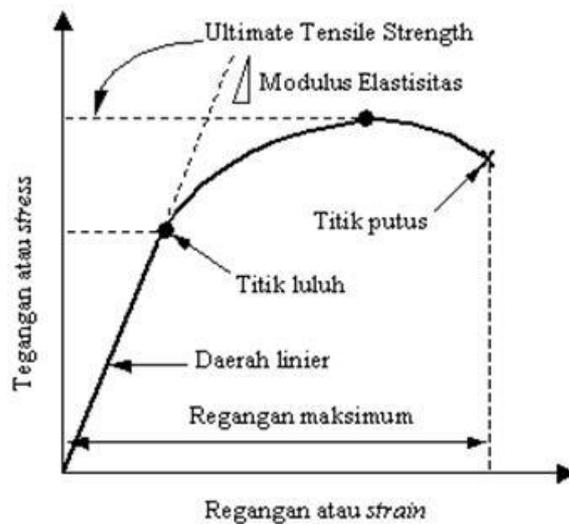
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (7)$$

dimana,

- Σ = Tegangan (N/mm²)
- E = Regangan
- F = Beban aksial total
- A = Luas penampang (m²)
- Δ = Perubahan bentuk aksial total (m)
- L = Panjang batang (m)

2.8 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 dalam Amir,2022).



Gambar 11 Diagram tegangan dan regangan

Batas proporsional (*proportional limit*). Dari titik asal O ke suatu titik yang disebut batas proporsional masih merupakan garis lurus (lihat Gambar 11). Daerah ini berlaku hukum Hooke, bahwa tegangan sebanding dengan regangan. Kesebandingan ini tidak berlaku di seluruh diagram. Kesebandingan ini berlaku hanya pada batas proporsional (Amir,2022).



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 (Amir,2022).

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 (Amir,2022).

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 (Amir,2022).

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 (Amir,2022).

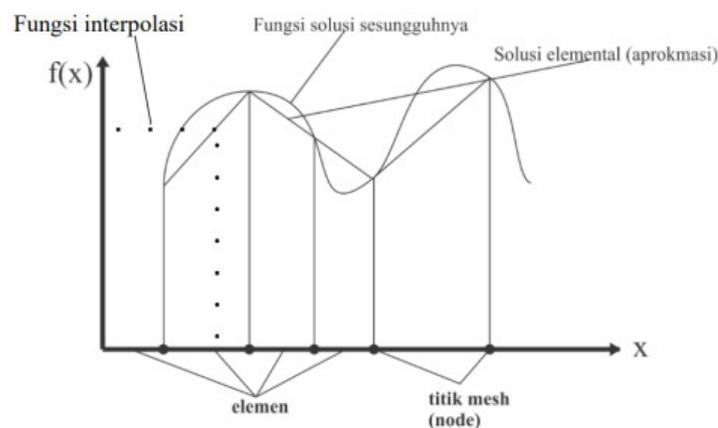
2.9 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi persamaan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*). Karena persamaan diferensial seringkali digunakan sebagai model permasalahan engineering maka penting bagi para insinyur untuk dapat memahami dan mampu menerapkan MEH. Saat ini MEH merupakan salah satu metode numerik paling versatile untuk memecahkan problem dalam domain continuum (Kosasih,2012).

Pada awalnya MEH dikembangkan untuk memecahkan problem di bidang mekanika benda padat (*solid mechanic*), tetapi kini MEH sudah merambah ke hampir semua problem engineering seperti mekanika fluida (*fluid mechanics*), transfer panas (*heat transfer*), elektromagnetik (*electro magnetism*), getaran (*vibration*), analisis modal (*modal analysis*), dan banyak lagi problem engineering (Kosasih,2012).



Proses inti MEH adalah membagi problem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen dari mana solusi yang lebih sederhana dapat dengan mudah diperoleh. Solusi dari setiap elemen jika digabungkan akan menjadi solusi problem secara keseluruhan. Gambar 12 menjelaskan cara kerja MEH di mana solusi suatu problem yang kompleks diaproksimasikan oleh solusi elemen. Untuk mendapatkan solusi elemental, MEH menggunakan fungsi interpolasi untuk mengaproksimasikan solusi elemen. Untuk contoh ini suatu fungsi linear yang sederhana dipergunakan sebagai fungsi interpolasi. Setelah solusi setiap elemen diperoleh, dengan menggabungkan solusi-solusi elemen maka solusi keseluruhan problem dapat diperoleh. Dengan menggunakan fungsi polynomial seperti fungsi kuadratik sebagai fungsi interpolasi, solusi yang lebih akurat bisa diperoleh (Kosasih,2012).



Gambar 12 Aprokmisasi solusi keseluruhan diperoleh dari gabungan solusi-solusi elemen (Kosasih,2012)

Pada prinsipnya penerapan Metode Elemen Hingga terdiri dari langkah-langkah 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 ebanannya.



- 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 :

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (8)$$

- 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 Persamaan 9.

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (9)$$

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 Persamaan 9.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{21} & \dots & K_{n1} \\ K_{21} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & \dots & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Penyelesaian tegangan dan regangan elemen didapatkan dari persamaan pada ke-3. Persamaan tersebut dimasukkan kedalam Persamaan 10 pada 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 (Amir,2022).

2.10 Ansys

Ansys adalah salah satu software yang digunakan untuk menganalisis berbagai macam struktur, aliran fluida, dan perpindahan panas. Adapun contoh software analisis yang lain yaitu NASTRAN, CATIA, Fluent dan yang lainnya (Pinem, 2013).

Pada penggunaannya, secara umum program ANSYS memiliki Tahapan utama yaitu:

1. Pre-Processing adalah langkah awal dalam permodelan elemen hingga. Pada pre-processing terdapat beberapa fungsi dimana kita harus mendefinisikan fungsi-fungsi tersebut akan menghasilkan perhitungan yang spesifik pada benda yang akan dianalisa. Fungsi-fungsi yang terdapat pre-processing adalah: permodelan, penentuan tipe elemen, penentuan material, meshing.
2. Solution, Pada tahapan ini FEM telah mendekati proses perhitungan dan analisa. Ada beberapa langkah dalam proses perhitungan yang harus dilalui terlebih dahulu. Langkah-langkah tersebut adalah: pembebanan dan analisa.
3. General Post-Processing Setelah proses permodelan dan analisis selesai langkah selanjutnya adalah proses post processing. Proses ini digunakan untuk melihat hasil analisis, dalam hal ini hasil yang dilihat adalah displacement, momen, gaya geser, dan gaya normal yang terjadi. (Kusbiantoro dkk,2016)

