



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Perbandingan Respon Struktur Kapal *Ro-Ro Passenger 99 M* Di *North Atlantic Ocean & Indonesian Waterways* Menggunakan Metode Elemen Hingga

Kurniawan Agung Santosa¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Wilma Amiruddin¹⁾, Sukron Makmun²⁾

¹⁾Lab. Konstruksi & Struktur Kapal,

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²⁾Biro Klasifikasi Indonesia (BKI)

Email : k.a.santosa@outlook.com

Abstrak

Kekuatan struktur kapal sangat dipengaruhi oleh kondisi perairan yang dilaluinya. Jenis dan tinggi gelombangnya menentukan besar kecilnya bending momen kapal, baik pada kondisi air tenang, *sagging* maupun *hogging*. Dari nilai momen tersebutlah kekuatan struktur dapat diketahui dengan mencari nilai tegangan maksimum kapal. Pada penelitian ini penulis melakukan analisa kekuatan struktur kapal *Ro-Ro Passenger 99 M* di *North Atlantic Ocean* dan *Indonesian Waterways*. Respon struktur kapal yang didapat digunakan sebagai acuan dalam mencari reduksi desain konstruksi kapal yang bisa dilakukan dan mendapatkan rekomendasi desain konstruksi yang sesuai dengan kondisi perairan Indonesia. Model kapal dibuat dan dianalisa menggunakan *software MSC Patran*. Analisa tersebut menggunakan variasi momen yang telah didapat dari perhitungan *software Hydromax*. Maka didapatkan hasil respon struktur kapal pada kondisi air tenang sebesar 26,8 MPa, kondisi *Sagging North Atlantic Ocean* sebesar 160 MPa, kondisi *Hogging North Atlantic Ocean* sebesar 114 MPa, kondisi *Sagging Indonesian Waterways* sebesar 61,8 MPa dan kondisi *Hogging Indonesian Waterways* sebesar 70,2 MPa. Total reduksi tebal plat dan modulus profil yang dapat dilakukan adalah sebesar 31,62 % dengan reduksi tiap tebal plat dan modulus profil sebesar 33,265 %. Dan desain rekomendasi kapal ini untuk perairan Indonesia dapat ditentukan dengan mengacu nilai total reduksi tersebut.

Kata Kunci : Kapal *Ro-Ro Passenger*, Respon Struktur Kapal, *North Atlantic Ocean*, *Indonesian Waterways*, Metode Elemen Hingga.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di sektor maritim, kondisi lingkungan sangat berpengaruh terhadap kelaikan kapal saat berlayar maupun bagi bangunan lepas pantai yang sedang beroperasi. Kondisi lingkungan tersebut tidak bisa lepas dari letak geografis suatu negara. Letak geografis inilah yang membuat setiap negara memiliki kondisi lingkungan perairan yang berbeda satu sama lainnya. Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki karakteristik perairan tersendiri.

Untuk mengatur segala kegiatan yang ada di sektor maritim, Indonesia menggunakan

regulasi yang dikeluarkan langsung oleh BKI (Biro Klasifikasi Kapal), yaitu suatu badan usaha milik negara yang bertugas mengeluarkan regulasi/peraturan disektor maritim (perkapalan, bangunan lepas pantai, dan yang lainnya) dengan tujuan menjamin keselamatan kapal maupun bangunan lepas pantai yang berbendera Indonesia maupun lainnya, yang beroperasi di lingkup domestik maupun lingkup internasional. [1]

Regulasi BKI sendiri telah dikembangkan dari beberapa variasi yang bersumber pada regulasi nasional maupun internasional yang merupakan hasil dari studi ilmiah, penelitian dan

juga praktik praktik rekayasa keteknikan. Dalam perkembangannya, regulasi BKI mempunyai rujukan referensi kondisi lingkungan di daerah Samudera Atlantik Utara (*North Atlantic Ocean*).

Berdasarkan perkembangan dari industri perkapalan lingkup nasional, khususnya untuk perkapalan dan bangunan lepas pantai yang hanya beroperasi di wilayah perairan Indonesia akan memerlukan regulasi dan peraturan mengenai desain struktur yang sesuai dengan kondisi perairan Indonesia, sehingga nantinya perancangan desain strukturnya tidak berlebihan. Penentuan kekuatan struktur kapal dan bangunan lepas pantai yang beroperasi di Indonesia bisa ditentukan berdasarkan formulasi tinggi gelombang dari tiap zonasi perairan Indonesia yang telah dipetakan. Dengan mengacu data gelombang yang ada di ECMWF (*European Center for Medium Range Weather Forecast*) yaitu untuk rata-rata tinggi gelombang di *North Atlantic Ocean* adalah 10,75 m, *Indonesian Waterways Zona 1* adalah 2,49 m, *Indonesian Waterways Zona 2* adalah 2,84 m, dan *Indonesian Waterways Zona 3* adalah 3,75 m, penulis melakukan analisa momen di zona tertinggi kedua perairan tersebut pada kondisi air tenang, *sagging* dan *hogging*. [2]

Analisa tersebut bertujuan untuk mendapatkan dan membandingkan tegangan maksimum di masing-masing perairan. Tegangan inilah yang nantinya dijadikan acuan untuk melakukan reduksi tebal plat agar didapatkan desain konstruksi kapal yang sesuai dengan perairan Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan memperhatikan pokok permasalahan yang terdapat pada latar belakang maka rumusan permasalahan yang menjadi pokok bahasan dalam penelitian ini antara lain :

1. Berapa besar respon struktur kapal *Ro-Ro Passenger* 99 m di wilayah *North Atlantic Ocean* untuk semua kondisi gelombang ?
2. Berapa besar respon struktur kapal *Ro-Ro Passenger* 99 m di wilayah *Indonesian Waterways* untuk semua kondisi gelombang ?
3. Berapa perbedaan hasil perhitungan respon struktur kapal *Ro-Ro Passenger* 99 m pada kedua wilayah tersebut ?
4. Berapa besar total reduksi desain konstruksi kapal *Ro-Ro Passenger* 99 m yang dapat dilakukan melalui analisa perbandingan tersebut ?

5. Bagaimana rekomendasi desain konstruksi kapal yang sesuai dengan perairan Indonesia?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah digunakan sebagai arahan serta acuan dalam penulisan penelitian sehingga sesuai dengan permasalahan serta tujuan yang diharapkan. Adapun batasan permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Data kapal yang digunakan adalah kapal *Ro-Ro Passenger* dengan panjang kapal (Lpp) 99 meter.
2. Perairan yang digunakan dalam perhitungan adalah Samudera Atlantik Utara (*North Atlantic Ocean*) dan Laut Indonesia (*Indonesian Waterways*).
3. Data perairan yang digunakan merujuk pada *ECMWF Hind-Cast Data*.
4. Permodelan FEM dan analisa respon struktur dilakukan dengan menggunakan Software *MSC Patran*.
5. Regulasi yang di gunakan adalah *BKI Vol II Rules for Hull 2016*.
6. Analisa dilakukan pada zona perairan tertinggi (zona 3) di kedua wilayah perairan (*North Atlantic Ocean* dan *Indonesian Waterways*).
7. Permodelan dilakukan dengan menggunakan satu desain kapal dan dua pembebanan gelombang (*North Atlantic Ocean* dan *Indonesian Waterways*).

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin di capai dari penelitian "Analisa Perbandingan Respon Struktur Kapal *RO-RO Passenger* 99 M Di *North Atlantic Ocean & Indonesian Waterways* Menggunakan Metode Elemen Hingga" adalah :

1. Mengetahui besar respon struktur kapal *ro-ro passanger* 99 m di wilayah *North Atlantic Ocean* untuk semua kondisi gelombang.
2. Mengetahui besar respon struktur kapal *ro-ro passanger* 99 m di wilayah *Indonesian Waterways* untuk semua kondisi gelombang.
3. Mengetahui perbedaan hasil perhitungan respon struktur kapal *ro-ro passanger* 99 m pada kedua wilayah tersebut.
4. Mengetahui berapa besar total reduksi desain konstruksi kapal *Ro-Ro Passenger* 99 m yang dapat dilakukan melalui analisa perbandingan tersebut.
5. Mendapatkan rekomendasi desain konstruksi kapal yang sesuai untuk perairan Indonesia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Ro-Ro (*Roll On-Roll Off*)

Merupakan jenis kapal *Passenger* yang dirancang khusus untuk mengangkut muatan penumpang dan bisa memuat kendaraan yang berjalan masuk ke dalam dan keluar kapal dengan penggerak sendiri, sehingga disebut sebagai kapal *roll on - roll off* atau disingkat *Ro-Ro*. Kapal ini dilengkapi dengan pintu rampa yang dihubungkan dengan *moveable bridge* atau dermaga apung ke dermaga sebagai fasilitas khusus untuk kendaraan seperti : mobil, truk, bus bahkan sarana tempat gerbong kereta api. Sehingga kapal ini mempunyai rancangan khusus agar dapat membawa kargo roda seperti mobil, truk, trailer. [3]

2.2 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) merupakan sebuah metode yang menggunakan pendekatan numerik untuk menganalisa sebuah struktur sehingga didapatkan solusi pendekatan dari suatu permasalahan. Metode ini merubah suatu *elastic continuum* menjadi beberapa substruktur (elemen) melalui proses *discretized*. Kemudian defleksi dari tiap titik (*node*) akan dihubungkan dengan pembebanan, *property material*, *property geometrid* dan lain-lain dengan menggunakan matriks. [4] Pada penelitian ini, penulis menggunakan analisa Linier Statis yaitu sebuah analisa yang berfungsi mengetahui kondisi sebuah struktur terhadap pembebanan yang bersifat linier/konstan, tidak berubah terhadap waktu.

2.3 Respon Struktur Kapal

Dengan menggunakan metode elemen hingga kita dapat melakukan analisa secara keseluruhan tanpa melakukan pembagian menjadi beberapa komponen sederhana. Dengan cara mencari tegangan primer pada struktur kapal dengan konsep balok. Komponen yang dipakai dalam perhitungan tegangan primer adalah komponen struktur memanjang seperti geladak, plat sisi, plat alas, sekat memanjang, penumpu-penumpu dan penegar-penegar. Tegangan primer juga mencakup tegangan pada sekat-sekat melintang akibat berat dan gaya lintang yang di salurkan lewat sekat tersebut oleh geladak, plat alas, plat sisi yang bersebelahan. Hasil dalam perhitungan kekuatan adalah hubungan antara tegangan memanjang (σ_x) kapal pada bidang plat dengan momen lengkung yang bekerja pada sebuah titik ($x.z$) pada

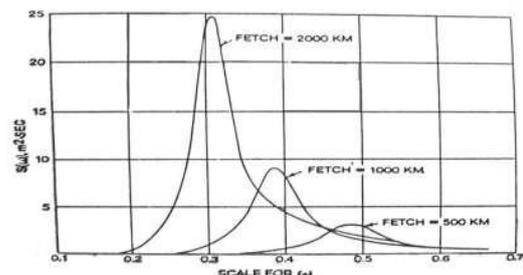
panjang kapal $M(x)z$ dengan I yaitu nilai inersia penampang melintang kapal. Secara sistematis maka perhitungan tersebut dapat dilihat pada persamaan (1) [5] :

$$\sigma_x = - \frac{M(x)z}{I} \quad (1)$$

2.3 Spectrum dan Pemetakan Gelombang

Pada penelitian ini *spectrum* gelombang yang dipakai adalah *Spectrum JONSWAP* (*Joint North Sea Wave Project*) yaitu merupakan jenis gelombang pada daerah perairan tertutup atau kepulauan. [6] *North Atlantic Ocean* dan *Indonesian Waterways* merupakan kategori gelombang berspektrum JONSWAP.

Sedangkan untuk pemetakan gelombang pada kedua wilayah perairan tersebut yaitu untuk *North Atlantic Ocean* dibagi menjadi 3 wilayah yakni 20 nm (P), 50 nm (L), dan 200 nm (T) dengan rata-rata tinggi gelombang 10,75 m. Dan untuk *Indonesian Waterways* dibagi menjadi 3 wilayah yaitu zona 1 (20 nm) dengan rata-rata tinggi gelombang 2,49 m, zona 2 (50 nm) dengan rata-rata tinggi gelombang 2,84 m dan zona 3 (200 nm) dengan rata-rata tinggi gelombang 3,75 m. [7]



Gambar 1. Spektrum JONSWAP dalam berbagai hembusan angin (*fetches*)

2.4 BKI Vol II Rules for Hull – 2016 Sec. 4 Design Load

Perhitungan koefisien gelombang atau C_0 dapat dilakukan menggunakan rumus pada persamaan (2) [8] :

$$\begin{aligned} C_0 &= \left[\frac{L}{25} + 4, 1 \right] C_{RW} && = \text{for } L < 90 \text{ m} \\ &= \left[10,75 - \left[\frac{300-L}{100} \right]^{1,5} \right] C_{RW} && = \text{for } 90 \leq L \leq 300 \text{ m} \quad (2) \\ &= 10,75 \times C_{RW} && = \text{for } L > 300 \text{ m} \end{aligned}$$

Diketahui bahwa nilai 10,75 adalah nilai yang memiliki relevansi dengan kondisi gelombang di wilayah *North Atlantic Ocean*. [9]

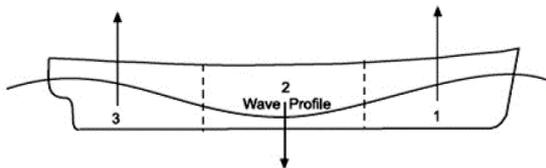
2.5 Distribusi Pembebanan Kapal

Langkah pertama dalam perhitungan bending momen memanjang kapal ialah menentukan penyebaran gaya berat sepanjang kapal. Distribusi berat ini merupakan sebagian pembebanan yang akan menimbulkan bending momen, adalah merupakan hasil penjumlahan dari penyebaran berat kapal kosong dengan berat muatan, perbekalan, crew, penumpang, bahan bakar, minyak lumas, air tawar dan lain sebagainya, yaitu merupakan berat total pada saat kapal berlayar.

Langkah kedua yaitu menentukan gaya tekan keatas. Gaya tekan keatas merupakan reaksi massa air terhadap kapal yang di sebut *displacement*. Dimana harga displacement tersebut sama dengan massa total kapal, demikian juga dengan resultan gaya tekan keatas tersebut harus tepat satu garis vertical dengan resultan gaya berat. Displacement kapal dapat diperoleh dari integrasi kearah memanjang dari massa air sepanjang kapal. [5]

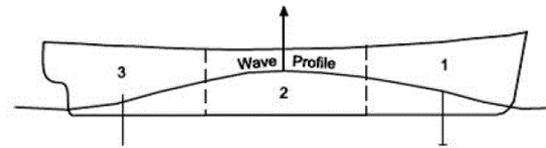
2.6 Sagging dan Hogging

Sagging merupakan kondisi dimana muatan kapal dipusatkan pada bagian tengah kapal sehingga menyebabkan tekanan pada bagian tengah kapal lebih besar. Akibatnya bentuk kapal hampir menyerupai huruf “U”. Disisi lain, *sagging* juga bisa terjadi karena adanya dua puncak gelombang yaitu di bagian depan dan belakang kapal, sehingga gaya keatas kapal lebih besar nilainya pada kedua bagian tersebut. Sedangkan bagian tengah kapal mengalami gaya kebawah yang lebih besar.



Gambar 2. Kondisi *Sagging*

Hogging merupakan kondisi dimana muatan kapal dipusatkan pada bagian depan dan belakang kapal sehingga menyebabkan tekanan pada ujung kapal lebih besar. Akibatnya bentuk kapal hampir menyerupai huruf “n”. Disisi lain, *Hogging* juga bisa terjadi karena adanya satu puncak gelombang yang berada di bagian tengah kapal, sehingga gaya keatas lebih besar nilainya. Sedangkan pada bagian depan dan belakang kapal mengalami gaya kebawah yang lebih besar. [10]



Gambar 3. Kondisi *Hogging*

2.7 Safety Factor

Safety factor adalah faktor yang menunjukkan tingkat kemampuan suatu bahan teknik menerima beban dari luar, yaitu beban tekan maupun tarik. Gaya yang diperlukan agar terjadi tingkat optimal bahan di dalam menahan beban dari luar sampai akhirnya menjadi pecah disebut dengan beban *ultimate* (*ultimate load*). Dengan membagi beban ultimate ini dengan luas penampang, kita akan memperoleh kekuatan *ultimate* (*ultimate strength*) atau tegangan ultimate (*ultimate stress*) dari suatu bahan. Untuk desain bagian – bagian struktur tingkat tegangan disebut tegangan ijin (*allowable stress*) dibuat benar – benar lebih rendah dari pada kekuatan *ultimate* yang diperoleh dari pengujian “statis”. Hal ini penting untuk berbagai pertimbangan. Besar gaya yang dapat bekerja pada bangunan yang dirancang jarang diketahui secara pasti. Karena tegangan dikalikan luas sama dengan gaya, maka tegangan ijin dari *ultimate* dapat diubah dalam bentuk gaya atau beban yang diijinkan dan *ultimate* yang dapat ditahan oleh sebuah batang. Suatu perbandingan (*ratio*) yang penting dapat dilihat pada persamaan (3) [11] :

$$FS = \frac{\sigma_{ultimate}}{\sigma_{ijin}} \quad (3)$$

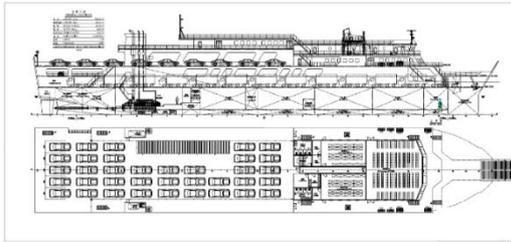
3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Data Primer

Pada penelitian ini kapal yang dipakai adalah jenis kapal *Ro-Ro Passenger* kelas A 100. Berikut adalah data ukuran utama kapal :

Tabel 1. Data Ukuran Utama Kapal

Data Ukuran Utama Kapal	
<i>Length over all (Loa)</i>	106,25 meter
Lpp	99,20 meter
B	20,40 meter
H	6,50 meter
T	4,20 meter
<i>Passenger</i>	498 orang
<i>Crew</i>	17 orang



Gambar 4. General Arrangement kapal Ro-Ro Passenger 99 M

3.2 Data Sekunder

Data sekunder didapat dari literatur jurnal penelitian sebelumnya yang bersumber ECMWF dan IACS Rec 34 *Standard Wave Data*. Data sekunder yang berupa tinggi gelombang dapat dilihat pada tabel 2 :

Perairan	Tinggi Gelombang
North Atlantic Ocean	10,75 m
Indonesian Waterways	3,75 m

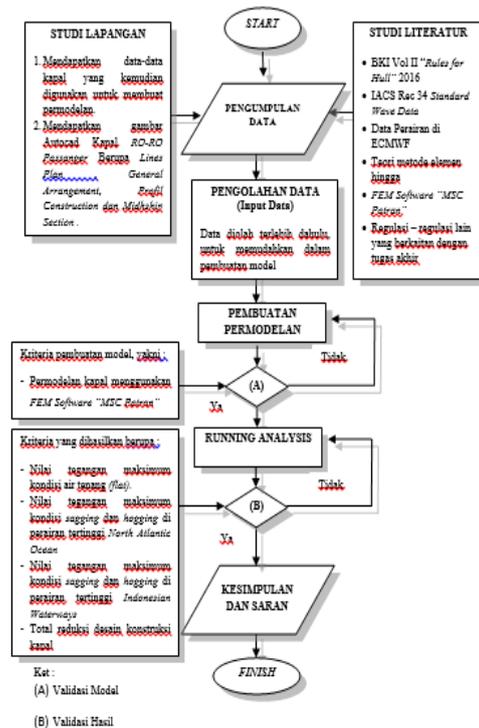
3.3 Pemodelan dan analisa

Tahap pemodelan dan analisa yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Pengolahan dan pemodelan 3D menggunakan software *Maxsurf*
2. Analisa variasi momen dengan menggunakan software *Hydromax* untuk tiap kondisi.
3. Pembuatan model FEM menggunakan *MSC Patran* dengan tahapan :
 - Pembuatan model geometri awal kapal
 - Pemilihan jenis material yang digunakan
 - *Meshing*
 - *Input properties* tebal plat
 - *Input profil* kapal
 - *Equivalence processing*
 - Pembuatan *Boundary Condition* dan *MPC*
4. Analisa model FEM dengan memasukkan nilai momen masing – masing kondisi yang sudah didapat dari software *Hydromax*.

3.4 Flow Chart Metodologi Penelitian

Penelitian ini didasarkan pada sistematika metodologi yang diuraikan berdasarkan urutan diagram alir atau *flowchart* yang dilakukan sejak mulai penelitian hingga selesainya penelitian. Penelitian ini dimulai dengan tahap pengumpulan data-data penunjang untuk proses penelitian yang kemudian dilanjutkan dengan pengolahan data dan dilanjutkan ke tahap analisa yaitu didapatkan output yang sesuai dengan tujuan awal penelitian, sehingga diperoleh kesimpulan akhir.

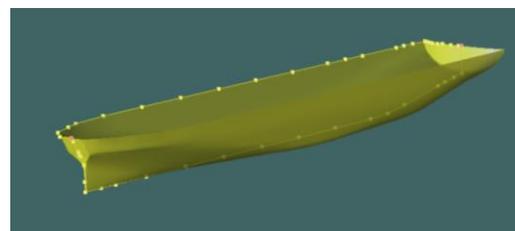


Gambar 5. Flow Chart Metodologi Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Data Kapal

Dari data kapal yang tercantum pada metodologi diolah dan dibuat pemodelan 3D kapal dengan bantuan software *Maxsurf Modeler*. Model kapal dibuat hanya sampai *Upper Deck* (tanpa bangunan atas). Gambar model 3D kapal *Ro-Ro Passenger 99 M* yang sudah jadi bisa dilihat pada gambar 6 :



Gambar 6. Pemodelan 3D Kapal Menggunakan Software *Maxsurf*

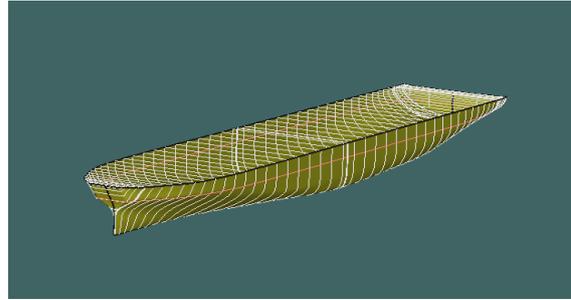
4.2 Perhitungan Distribusi Beban

Distribusi beban ini merupakan sebagian pembebanan yang akan menimbulkan bending momen yang merupakan hasil penjumlahan dari penyebaran berat kapal kosong dengan berat muatan (DWT+LWT). Perhitungan dimulai dengan mencari berat total LWT dan DWT kapal terlebih dahulu. Kemudian dari hasil tersebutlah dapat diketahui nilai dsitribusi beban pada kapal. Dan telah didapatkan berat total LWT sebesar 2152,27 ton, berat total DWT sebesar 3891,80

ton dan *displacement* kapal sebesar 6044,07 ton. Tabel pembebanan kapal dapat dilihat pada tabel 3.

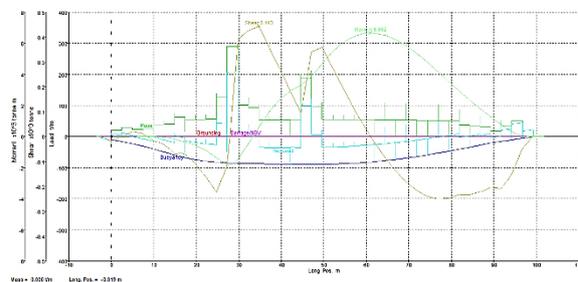
Tabel 3. Pembebanan Kapal

Station	q LWT	q DWT	q Total	Berat (qxb)	Lengan	Momen
AP-1	17,90	2,60	20,50	50,84	-49,60	-4766,06
1-2	25,59	2,60	28,19	69,90	-47,12	-6225,40
2-3	12,49	10,60	23,09	57,25	-44,64	-4830,23
3-4	13,69	10,60	24,29	60,23	-42,16	-4799,29
4-5	14,79	23,93	38,72	96,03	-39,68	-7201,50
5-6	15,90	23,93	39,83	98,77	-37,20	-6944,60
6-7	39,02	23,93	62,95	156,11	-34,72	-10244,24
7-8	32,77	22,87	55,64	138,00	-32,24	-8408,60
8-9	32,80	22,87	55,67	138,07	-29,76	-7765,74
9-10	33,47	22,87	56,34	139,73	-27,28	-7204,51
10-11	34,07	91,28	125,35	310,87	-24,80	-14571,03
11-12	34,60	254,69	289,29	717,45	-22,32	-30265,29
12-13	35,14	66,60	101,75	252,33	-19,84	-9461,69
13-14	43,83	49,49	93,32	231,44	-17,36	-7593,52
14-15	18,69	34,20	52,89	131,16	-14,88	-3688,74
15-16	18,90	34,20	53,10	131,69	-12,40	-3086,22
16-17	19,05	34,20	53,25	132,07	-9,92	-2476,12
17-18	19,05	35,80	54,85	136,04	-7,44	-1912,89
18-19	19,20	169,06	188,26	466,89	-4,96	-4376,80
19-20	19,20	77,56	96,76	239,95	-2,48	-1124,71
20-21	19,15	35,80	54,95	136,27	2,48	337,96
21-22	19,05	35,80	54,85	136,04	4,96	674,74
22-23	18,90	36,20	55,10	136,65	7,44	1016,66
23-24	18,69	36,20	54,89	136,12	9,92	1350,35
24-25	18,40	36,20	54,60	135,41	12,40	1679,08
25-26	18,04	36,20	54,24	134,50	14,88	2001,43
26-27	17,66	36,20	53,86	133,58	17,36	2318,89
27-28	17,28	36,20	53,48	132,62	19,84	2631,27
28-29	16,80	36,20	53,00	131,43	22,32	2933,61
29-30	16,22	36,20	52,42	130,01	24,80	3224,14
30-31	15,55	36,20	51,75	128,34	27,28	3501,10
31-32	14,78	36,20	50,98	126,44	29,76	3762,71
32-33	13,88	36,20	50,08	124,20	32,24	4004,12
33-34	12,84	24,13	36,97	91,69	34,72	3183,58
34-35	11,64	24,13	35,77	88,72	37,20	3300,29
35-36	10,28	21,33	31,61	78,39	39,68	3110,64
36-37	8,78	8,00	16,78	41,62	42,16	1754,75
37-38	27,12	8,00	35,12	87,10	44,64	3887,96
38-39	50,16	0,00	50,16	124,41	47,12	5862,05
39-FP	22,47	0,00	22,47	55,73	49,60	2764,08
	867,85	1569,27		6044,07		-93647,78



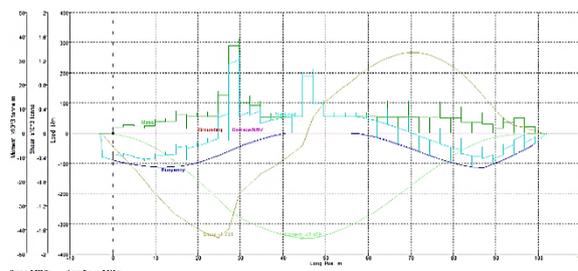
Gambar 7. Pembagian 40 Station pada model kapal

Selanjutnya, hasil perhitungan distribusi beban yang sudah didapat dimasukkan kedalam *loadcase* melalui menu *input loadcase* software *Hydromax*. Kemudian analisa momen dilakukan dengan memasukkan nilai tinggi gelombang yang ada di kedua wilayah perairan pada masing – masing kondisi kapal. Tinggi gelombang yang dipakai yaitu 10,75 meter untuk perairan *North Atlantic* dan 3,75 meter untuk perairan Indonesia. Hasil analisa dari masing-masing kondisi dapat dilihat pada grafik dibawah ini :



Gambar 8. Grafik Air Tenang

Pada kondisi air tenang momen tertinggi yang didapat adalah sebesar 6662 Ton.m atau 65331902,30 Nm. Nilai momen air tenang pada kedua wilayah perairan adalah sama.



Gambar 9. Grafik Sagging North Atlantic Ocean

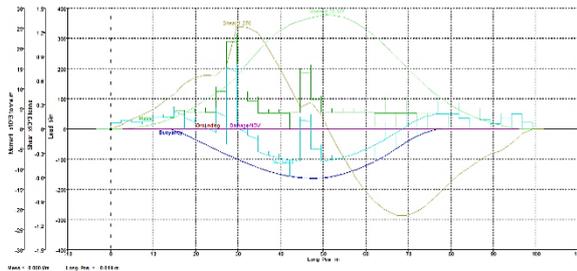
Pada kondisi *Sagging* di wilayah *North Atlantic Ocean* momen tertinggi yang didapat adalah sebesar -43469 Ton.m atau -426285268,85 N.m

Titik berat terhadap midhsip (LCG)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sum \text{Momen}}{\sum \text{Berat kapal}} \\
 &= \frac{-93647,78}{6044,07} = -15,49 \text{ meter.}
 \end{aligned}$$

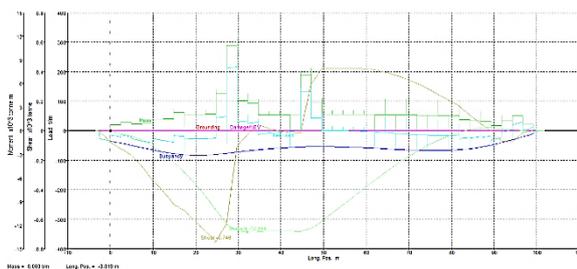
4.2 Perhitungan Momen Menggunakan Software *Hydromax*

Pada tahap ini model 3D kapal yang sudah ada dibagi terlebih dahulu menjadi 40 *station*. Hal ini berfungsi untuk mendistribusikan beban kapal yang sudah ada secara menyeluruh. Pembagian *station* tersebut dapat dilihat pada gambar 7 dibawah ini :



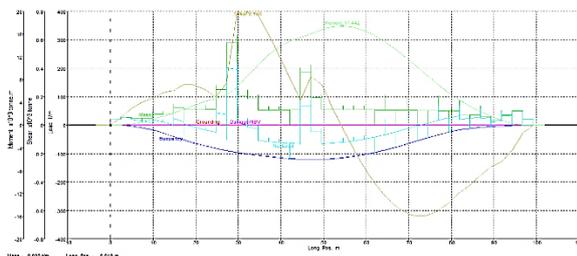
Gambar 10. Grafik Hogging North Atlantic Ocean

Pada kondisi Hogging di wilayah North Atlantic Ocean momen tertinggi yang didapat adalah sebesar 28387 Ton.m atau 278381373,55 N.m



Gambar 11. Grafik Sagging Indonesian Waterways

Pada kondisi Sagging di wilayah Indonesian Waterways momen tertinggi yang didapat adalah sebesar -12844 Ton.m atau -125956612,60 N.m



Gambar 12. Grafik Hogging Indonesian Waterways

Pada kondisi Hogging di wilayah Indonesian Waterways momen tertinggi yang didapat adalah sebesar 17442 Ton.m atau 171047589,30 N.m

Berdasarkan grafik masing-masing kondisi diatas maka rangkuman momen maksimum yang telah didapat bisa dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Rangkuman Momen Maksimum

Kondisi	Momen Maksimum
Air Tenang	65331902,30 N.m
Sagging	-426285268,85 N.m

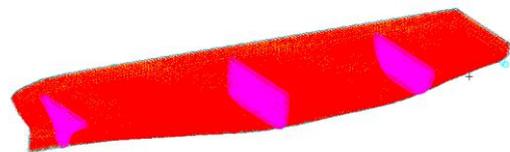
North Atlantic Ocean	
Hogging	278381373,55 N.m
North Atlantic Ocean	
Sagging	-125956612,60 N.m
Indonesian Waterways	
Hogging	171047589,30 N.m
Indonesian Waterways	

4.3 Pendefinisian Material

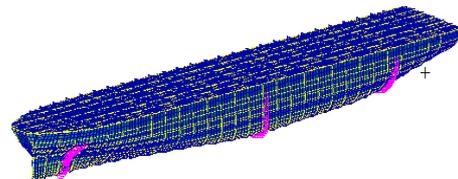
Dalam tahap ini jenis material yang dipakai adalah baja grade A yang mempunyai nilai elastic modulus 2.1×10^{11} N/m², Poisson Ratio 0,3, shear modulus 8×10^{11} N/m² dan density 7.85 ton/m³. Model terlebih dahulu ditentukan jenis elemen (material yang diuji) terkait dengan sifat-sifat yang dimiliki oleh material yang dianalisa. Kemudian jenis elemen yang sudah ditentukan tersebut diberi tebal sesuai material yang diuji.

4.4 Pemodelan FEM Menggunakan MSC Patran

Pemodelan FEM dimulai dengan membuat model geometri awal. Kemudian model tersebut dibagi menjadi elemen-elemen kecil melalui proses meshing. Pembagian elemen dilakukan sesuai peletakan beam yang akan dibuat, sehingga harus sesuai dengan jarak gading kapal. Setelah meshing, model tersebut diberi properties tebal plat dan pemasangan profil atau beam. Berikut adalah gambar model kapal ketika meshing dan sesudah meshing :



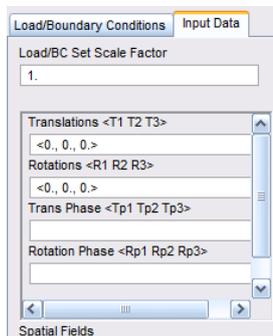
Gambar 13. Proses Meshing



Gambar 14. Model FEM setelah proses Meshing dan Input Properties.

4.4 Pemberian *Boundary Conditions*

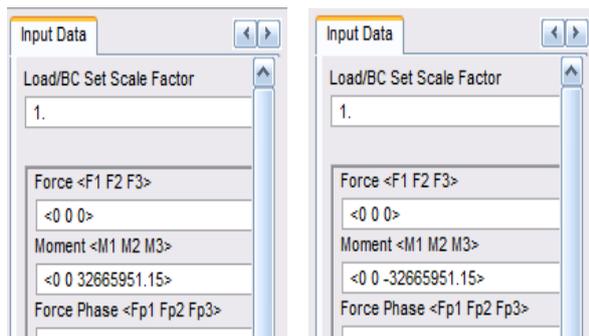
Untuk analisa linear statis, salah satu tahap yang harus dilakukan adalah menetapkan *Boundary Conditions*. *Boundary Conditions* merupakan tahap akhir dari suatu proses pemodelan elemen hingga, yaitu penentuan tumpuan sebelum model di analisa.



Gambar 15. Penentuan *Boundary Conditions*

4.4 Peletakan Momen

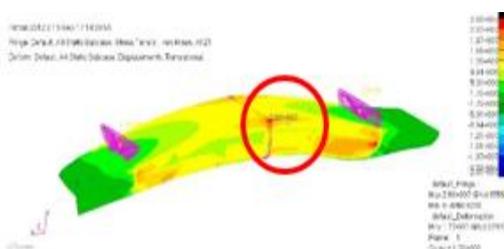
Pada tahap ini nilai momen yang sudah didapat dari hasil perhitungan momen menggunakan software *Hydromax* diletakan ke sekat haluan kapal yaitu pada frame 125 dan sekat buritan kapal yaitu pada frame 23. Masing-masing nilai momen pada tiap kondisi diletakan pada sekat tersebut. Berikut adalah contoh nilai momen kondisi air tenang yang dimasukkan pada sekat haluan dan buritan kapal :



Gambar 16. Contoh *Input Momen*

4.5 Analisa dan Pembahasan Respon Struktur Kapal

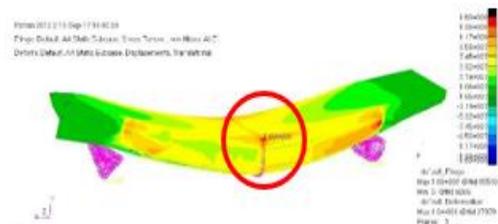
- Kondisi Air Tenang



Gambar 17. Air Tenang

Mengacu pada *fringe stress tensor (von mises) result*, tegangan maksimum yang didapat adalah sebesar 26,8 MPa yang terletak pada *node @85560*. Khusus untuk kondisi ini nilai tegangan maksimum yang didapat pada kedua wilayah perairan adalah sama.

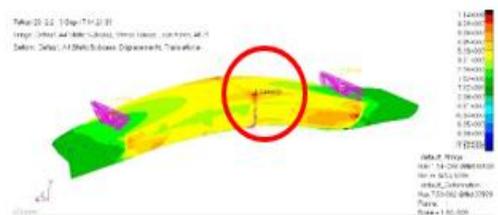
- Kondisi *Sagging North Atlantic Ocean*



Gambar 18. *Sagging North Atlantic Ocean*

Mengacu pada *fringe stress tensor (von mises) result*, tegangan maksimum yang didapat pada kondisi ini adalah sebesar 160 MPa yang terletak pada *node @85560*.

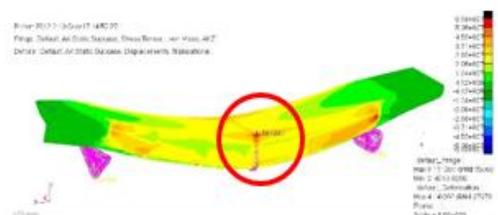
- Kondisi *Hogging North Atlantic Ocean*



Gambar 19. *Hogging North Atlantic Ocean*

Mengacu pada *fringe stress tensor (von mises) result*, tegangan maksimum yang didapat pada kondisi ini adalah sebesar 114 MPa yang terletak pada *node @85560*.

- Kondisi *Sagging Indonesian Waterways*



Gambar 20. *Sagging Indonesian Waterways*

Mengacu pada *fringe stress tensor (von mises) result*, tegangan maksimum yang didapat pada kondisi ini adalah sebesar 61,8 MPa yang terletak pada *node @85560*.

- Kondisi *Hogging Indonesian Waterways*



Gambar 21. *Hogging Indonesian Waterways*

Mengacu pada *fringe stress tensor (von mises) result*, tegangan maksimum yang didapat pada kondisi ini adalah sebesar 70,2 MPa yang terletak pada *node @85560*.

Berdasarkan hasil analisa masing-masing kondisi tersebut maka dapat diketahui perbedaan respon struktur kapal (%) dari perairan *North Atlantic Ocean* dan *Indonesian Waterways* adalah sebagai berikut :

Tabel 5. Perbedaan Respon Struktur Kapal

Kondisi	North Atlantic Ocean	Indonesian Waterways	Reduksi (%)
Air Tenang	26,8 MPa	26,8 MPa	0 %
Sagging	160 MPa	61,8 MPa	61,375 %
Hogging	114 MPa	70,2 MPa	38,42 %

Berdasarkan tabel 5 diatas maka dapat diketahui bahwa penurunan respon struktur kapal pada kondisi *Sagging* sebesar 61,375 % dan untuk kondisi *Hogging* sebesar 38,42 %. Sedangkan untuk penurunan respon struktur kapal rata-rata dari semua kondisi adalah 33,265 %.

4.7 Reduksi & Analisa Desain Rekomendasi

Berdasarkan nilai rata-rata penurunan respon struktur kapal diatas maka untuk reduksi tebal plat dan modulus profil dapat dilakukan maksimal sampai 33,265 %. Setelah dilakukan perhitungan di masing-masing plat dan modulus, total reduksi yang telah dilakukan sebesar 31,62 %. Perhitungan tersebut dilakukan dengan cara mengurangi tebal tiap plat dan modulus profil

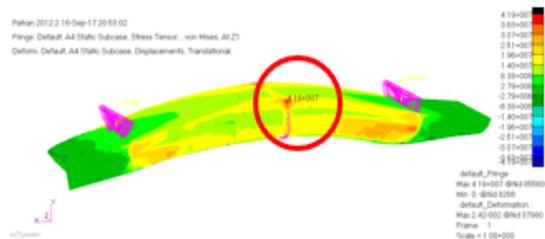
sebesar 33,265 %. Dari modulus baru yang didapat kemudian dicari ukuran profil yang baru berdasarkan tabel Annex. Berikut adalah ukuran profil baru yang didapat setelah dilakukan reduksi pada modulus :

Tabel 6. Ukuran Profil Baru

Item	Ukuran Profil Setelah Direduksi
Deck Girder	340 x 23
Deck Longitudinal	130 x 75 x 12
Main Frame AP	100 x 50 x 10
Main Frame FP	100 x 65 x 11
Main Frame Midship	120 x 80 x 8
Side Longitudinal	340 x 23
Web Frame AP & FP	340 x 23
Web Frame Midship	340 x 23
Stiffener	120 x 80 x 8
Stiffener Frame 12	130 x 75 x 10
Stiffener	120 x 80 x 8
Longitudinal Bulkhead	
Web Beam	360 x 26
Upper Deck AP Area	
Web Beam	360 x 26
Upper Deck Dominant	
Main Frame UD-MD	100 x 50 x 10
Web Frame UD-MD FP Area	360 x 26
Upper Centre Deck Girder	360 x 26
Upper Side Deck Girder	360 x 26
Upper Deck Longitudinal	120 x 80 x 8
Web Beam	340 x 23
AP-Midship 1-FP Area	
Web Beam Midship 2 Area	340 x 23

Tebal plat dan ukuran profil baru yang sudah didapat dimasukkan kedalam model FEM yang sudah ada. Setelah perubahan ukuran tersebut, proses analisa dilakukan kembali untuk 3 kondisi gelombang yaitu Air Tenang, Sagging dan Hogging. Karena desain rekomendasi ini hanya untuk perairan Indonesia saja maka tinggi gelombang yang dipakai dalam analisa ini adalah tinggi gelombang perairan Indonesia saja yaitu sebesar 3,5 m dan momen yang dipakaipun adalah momen kondisi gelombang di perairan Indonesia. Dan berikut adalah hasil analisa tersebut :

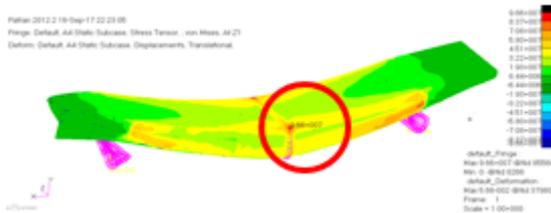
- Kondisi Air Tenang



Gambar 22. *Result Air Tenang Desain Rekomendasi*

Mengacu pada *fringe stress tensor (von mises) result*, tegangan maksimum yang didapat pada kondisi ini adalah sebesar 41,9 MPa yang terletak pada *node @85560*.

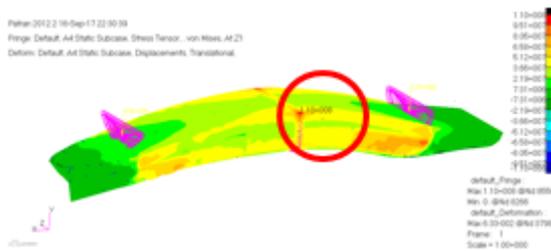
- Kondisi *Sagging*



Gambar 23. *Result Sagging* Desain Rekomendasi

Mengacu pada *fringe stress tensor (von mises) result*, tegangan maksimum yang didapat pada kondisi ini adalah sebesar 96,6 MPa yang terletak pada *node @85560*.

- Kondisi *Hogging*



Gambar 24. *Result Hogging* Desain Rekomendasi

Mengacu pada *fringe stress tensor (von mises) result*, tegangan maksimum yang didapat pada kondisi ini adalah sebesar 110 MPa yang terletak pada *node @85560*.

4.8 Safety Factor

Safety Factor (faktor keamanan) merupakan sebuah faktor yang berfungsi untuk menunjukkan tingkat kemampuan dari suatu bahan/material teknik dalam menerima beban dari luar, baik itu beban tekan maupun tarik^[8]. Awal yang harus dilakukan dalam perhitungan *safety factor* adalah mencari batas nilai tegangan ijin yang diperbolehkan berdasarkan regulasi BKI Vol. II *Rules for Hull 2016 Section 5 C. 1.1*. Pada *section* tersebut dijelaskan bahwa tegangan ijin maksimal adalah 175/k, artinya tegangan hasil analisa yang didapat tidak boleh melebihi dari 175/k. [8]

Tabel 7. Faktor Material

<i>Minimum Yield Stress ReH in N/mm</i>	K
235	1
315	0,78
355	0,72
390	0,68

Pada penelitian ini, kapal *Ro-Ro Passenger 99 M* menggunakan material jenis baja *Grade A* yang mempunyai minimum yield (*ReH*) sebesar 235 N/mm². Sehingga tegangan ijin maksimum adalah 175 N/mm². Berikut ini adalah tabel perhitungan tegangan ijin/*safety factor* :

Tabel 8. Tegangan Ijin

Kondisi	Node	Tegangan Maks. (N/mm ²)	Tegangan Ijin (N/mm ²)	Keterangan
Air Tenang	8266	26,8	175	Memenuhi
<i>Sagging</i>	8266	160	175	Memenuhi
<i>North Atlantic Ocean</i>				
<i>Hogging</i>	8266	114	175	Memenuhi
<i>North Atlantic Ocean</i>				
<i>Sagging</i>	8266	61,8	175	Memenuhi
<i>Indonesian Waterways</i>				
<i>Hogging</i>	8266	70,2	175	Memenuhi
<i>Indonesian Waterways</i>				

Tabel 9. Tegangan Ijin Desain Rekomendasi

Kondisi	Node	Tegangan Maks. (N/mm ²)	Tegangan Ijin (N/mm ²)	Keterangan
Air Tenang	85560	41,9	175	Memenuhi
<i>Sagging</i>	85560	96,6	175	Memenuhi
<i>Hogging</i>	85560	110	175	Memenuhi

4.8 Validasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil dari perhitungan *software* dan perhitungan manual. Dalam perhitungan manual, nilai tegangan kapal dicari dengan menggunakan rumus pada persamaan (4) [12] :

$$\sigma = M_{max} / W \quad (4)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} M_{max} &= \text{Momen maksimum} \\ W &= \text{Modulus penampang} \\ &= I_{NA} / z \end{aligned}$$

Dalam perhitungan manual tersebut, nilai modulus penampang harus dicari terlebih dahulu. Dan berikut adalah perhitungan modulus penampang :

Tabel 10. Perhitungan Momen Inersia

LPP/40 (b)	Luas Total (At) (m ²)	Titik Berat (Z) (m)	At x Z (m ³)	At x Z ² (m ⁴)	Momen Inersia (I _o) (m ⁴)	I _{NA}
2,48	4528,93	5,2	23550,42	122462,2	56,76	122518,94

$$W = I_{NA} / z$$

$$W = 122518,94 / 5,2$$

$$W = 23561,34 \text{ m}^3$$

Sehingga untuk perhitungan manual tegangan air tenang adalah :

$$\sigma = M_{max} / W$$

$$\sigma = 65331902,30 / 23561,34$$

$$= 2772,84 \text{ Ton/m}^2$$

$$= 27,19 \text{ Mpa}$$

Koreksi untuk perhitungan validasi dapat dilihat pada tabel 11 dibawah ini :

Tabel 11. Koreksi Validasi Model

Perhitungan Manual	Perhitungan Software	Koreksi	Keterangan
27,19 Mpa	26,8 Mpa	98,54 %	Memenuhi

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini adalah :

1. Respon struktur kapal pada wilayah *North Atlantic Ocean* untuk kondisi air tenang adalah sebesar 26,8 MPa, kondisi *Sagging* sebesar 160 MPa dan kondisi *Hogging* sebesar 114 MPa.
2. Respon struktur kapal pada wilayah *Indonesian Waterways* untuk kondisi air tenang adalah sebesar 26,8 MPa, kondisi *Sagging* sebesar 61,8 MPa dan kondisi *Hogging* sebesar 70,2 MPa.
3. Perbedaan hasil perhitungan respon struktur kapal pada kedua wilayah perairan adalah sebesar 61,375 % untuk kondisi *Sagging* dan 38,42 % untuk kondisi *Hogging*.
4. Besar total reduksi yang dapat dilakukan pada tebal plat dan modulus profil adalah sebesar 31,62 %.
5. Rekomendasi desain konstruksi kapal yang sesuai dengan perairan Indonesia dapat ditentukan dengan mengganti nilai C_o (*rules* BKI Vol.II *Rules for Hull – 2016 Sec.4 Design Load*) menjadi 3,75 (sesuai dengan tinggi maksimum gelombang perairan Indonesia) dalam perhitungan konstruksi kapal. Sedangkan khusus untuk kapal ini, rekomendasi desain konstruksi yang sesuai

adalah dengan mengurangi tiap tebal plat dan modulus profil sebesar 33,265 %.

5.2 Saran

1. Lebih diperbanyak dalam variasi jenis dan tinggi gelombang serta jenis kapal yang dianalisis, agar hasil yang diperoleh lebih beragam.
2. Perlu dilakukan analisa kekuatan lanjutan dengan metode yang berbeda agar kondisi kapal dapat diketahui dengan detail.
3. Sangat disarankan menggunakan komputer dengan spesifikasi yang tinggi, agar proses pemodelan dan *running* bisa berjalan dengan lancar dan cepat sehingga bisa lebih menghemat waktu.
4. Lebih teliti dalam pembuatan geometri model agar hasil analisa lebih tepat dan akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini adalah hasil kerjasama antara Departemen Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro dan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Biro Klasifikasi Indonesia. 2016. Company Profile. www.bki.co.id/pagestatis-63-company-profile-lang-id. (diakses 21 Februari 2017).
- [2] Mohammad Arif Kurniawan, dkk . 2016. A Comparison of Three Different Water Areas and its Influence for Development of Rules Regulation. Mokpo, Rep. Of Korea.
- [3] Anonim. “Kapal Ro-Ro”. https://id.wikipedia.org/wiki/Kapal_Ro-Ro. (diakses 3 November 2016).
- [4] Ross, C.T.F. 1985. *Finite Element Methods in Structural Mechanics*. Chichester: Ellis Horwood Ltd.
- [5] Nurayoga, Fasya. 2016. Analisa Kekuatan Struktur *Tank Deck* Pada Kapal (LST) *Landing Ship Tank* KRI. Teluk Bintuni 7000 DWT Menggunakan Metode Elemen Hingga, Tugas Akhir, Departemen Teknik Perkapalan, Undip : Semarang
- [6] IACS. 2001. IACS Recommendation No.34 Standard Wave Data. United Kingdom. IACS.

- [7] [European Centre for Medium-range Weather Forecast \(ECMWF\). apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype](https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype) (diakses 27 Januari 2017).
- [8] Biro Klasifikasi Indonesia. 2016. Rules BKI Volume II Rules for Hull. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia.
- [9] Kendrick, A, Daley, C, Pavic, M. 2006. Comparative Study of Ship Structure Design Standard. Submitted to US Maritime Administration. BMT Fleet Technology.
- [10] Barrass. 1999. Ship Stability for Master and Mates. Oxford: Elsevier
- [11] Popov, E.P. 1978. *Mechanics of Material, 2nd edition, Prentice-Hall, Inc.*, Englewood Cliffs. New Jersey. USA
- [12] Rosyid, D.M., dan Setyawan, D. 2000. *Kekuatan Struktur Kapal*. Jakarta: Pradnya Paramita.