

Analisa Perkiraan Umur Struktur Pada Kapal Ikan Katamaran 10 GT Menggunakan Metode Elemen Hingga

Miftachul Huda dan Budie Santosa

Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: budies@na.its.ac.id

Abstract - Evaluasi kekuatan konstruksi kapal katamaran pada jarak pisah (S/L) = 0.3 dilakukan dengan paket komersial Nastran yang berbasis metode elemen hingga. Model kapal diasumsikan menggunakan bahan baja ASTM A516-70. Dalam bidang kekuatan kapal, perlu memperhitungkan kekuatan memanjang suatu konstruksi kapal. Kapal Katamaran merupakan jenis kapal kecil dengan memiliki dua lambung sehingga perlu adanya perhatian khusus dalam analisa tegangan maksimal yang nantinya akan digunakan untuk perhitungan kekuatan suatu konstruksi kapal. Penaksiran umur kelelahan dalam tugas akhir ini menggunakan metode *simplified* dengan pembebanan gelombang dengan memvariasikan kondisi muatan. Pembebanan gelombang disimulasikan dengan bantuan *software* Nastran yang menghasilkan *output* berupa tegangan nominal yang digunakan sebagai inputan untuk menghitung *cumulative fatigue damage*. *Cumulative fatigue damage* yang didapat digunakan untuk menghitung umur kelelahan (*fatigue life*) dari tujuh lokasi detail struktur yang dianggap kritis. Analisis umur kelelahan dilakukan dengan menggunakan pendekatan *Simplified* (sederhana). Hasilnya menunjukkan bahwa sambungan struktur yang paling kritis adalah sambungan antara side girder dan balok geladak dan daerah antara gading dan *inner bottom*, nilai *fatigue* terkecil 26.4 tahun dan tidak kurang dari kriteria *design life* yang disyaratkan yakni 25 tahun, maka struktur katamaran tersebut masih baik dari segi rancangan desain, namun harus dilakukan penguatan struktur di lokasi-lokasi tertentu yang dianggap kritis dan rawan terjadi kegagalan agar umur dari struktur tersebut dapat bertambah sehingga mampu menjalankan tugas operasinya hingga waktu yang cukup lama.

Kata Kunci - baja ASTM A516 grade 70, *fatigue life*, katamaran, Nastran, , metode *simplified*.

I. PENDAHULUAN

DALAM tiga dasawarsa terakhir terdapat peningkatan yang pesat akan kebutuhan kapal-kapal berbadan banyak (*multihulls*) untuk sejumlah pemakaian seperti untuk kapal penumpang (*ferries*), kapal penangkap ikan (*trawlers*), sarana olah raga (*sporting craft*) dan riset (*oceanographic research vessel*) [1]. Kelebihan mendasar dari kapal jenis ini dibandingkan kapal berbadan tunggal (*monohull*) adalah letak akomodasi yang menarik, adanya peningkatan stabilitas kearah melintang dan sejumlah kasus dapat mengurangi kapasitas tenaga penggerak kapal untuk mencapai kecepatan dinas tertentu [2].

Berbagai bentuk kapal kemudian dikembangkan untuk

memenuhi criteria desain kapal di atas. Di antara berbagai bentuk yang ada, maka konsep kapal katamaran yang paling banyak dipilih dan mendapatkan perhatian, karena sejumlah kelebihanannya antara lain memiliki luasan geladak yang lebih besar dan stabilitas melintang yang lebih baik dibandingkan kapal berbadan tunggal [3].

Namun untuk lebih mengetahui apakah kekuatan konstruksi kapal katamaran ini sudah memenuhi sesuai standart atau harapan yang ingin dicapai. Maka Tugas Akhir ini akan melakukan analisa kekuatan struktur kapal dengan memperhitungkan tegangan ijin yang bekerja pada kapal dan selanjutnya akan menganalisa umur konfigurasi struktur kapal (*fatigue life*) untuk bahan material menggunakan baja A516 grade 70. Untuk mengetahui apakah struktur konfigurasi kapal katamaran benar-benar aman untuk jangka waktu yang cukup lama.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Fatigue* Kapal Katamaran

Pengertian *fatigue* adalah kerusakan pada struktur akibat konsentrasi tegangan yang terjadi akibat beban siklis atau berulang dari lingkungan (gelombang, angin, arus dan lain lain) yang bekerja secara terus menerus.

B. *Prosedur Perhitungan Kelelahan*

Secara umum, ada dua metode yang dapat digunakan untuk analisis kelelahan, yaitu pendekatan kurva S-N (*S-N curve approach*) yang dibuat berdasarkan tes kelelahan, dan pendekatan mekanika kepecahan (*fracture mechanics approach*). Untuk tujuan desain kelelahan, pendekatan kurva S-N lebih banyak digunakan dan dianggap sebagai metode yang paling cocok. Sedangkan metode mekanika kepecahan digunakan untuk menentukan ukuran cacat yang dapat diterima, menaksir perambatan retak kelelahan, merencanakan inspeksi dan strategi untuk memperbaikinya, dan lain-lain.

C. *Beban*

Widodo (2010), dalam penelitiannya menyebutkan bahwa beban yang dapat menyebabkan terjadinya kelelahan pada struktur adalah beban yang bersifat siklik [4], yaitu :

- Beban siklis frekuensi rendah (quasi-statis) yang ditimbulkan oleh eksitasi gelombang dengan jumlah sekitar 10^7 s/d 10^8 kali selama umur operasi struktur (25 tahun)
- Beban siklis frekuensi tinggi (dinamis), yang dapat diklasifikasikan menjadi beban transient (slamming, wave slapping, hull whipping) dan steady (mesin, baling-baling, hull springing) dengan jumlah sekitar 10^6 kali selama umur operasi struktur (25 tahun)
- Beban siklis frekuensi sangat rendah (statis) akibat perubahan beban (logistik) di atas struktur dan hidrostatis (pasut) dengan jumlah sekitar 4000 ~ 8000 kali selama umur operasi struktur (25 tahun).
- Beban siklis karena gradien panas tak beraturan akibat cuaca dan temperatur muatan dengan jumlah sekitar 7000 kali selama umur operasi struktur (25 tahun).

D. Kondisi Pembebanan (loadcase)

Dikarenakan tipe kapal katamaran belum ada rule pasti yang bisa menjelaskan probabilitas loading conditions yang harus dikenakan, maka untuk tugas akhir ini loading conditions divariasikan sendiri melihat keadaan yang memungkinkan saat beroperasinya kapal maka beberapa variasi pembebanan di buat antara lain.

Tabel 1.
Prosentase Probability tiap Loadcase

Load case	Ruang Muat (%)	Fuel Oil (%)	Probability [%]
1	100	50	20
2	0	100	20
3	50	50	20
4	10	10	20
5	100	10	20

E. Desain Kurva S-N

Untuk analisis kelelahan berdasarkan pendekatan tegangan nominal (nominal stress approach), sambungan lasan dibagi menjadi beberapa klas. Tiap klas memiliki desain kurva S-N masing-masing. Klasifikasi kurva S-N bergantung pada geometri detil sambungan las, arah dari fluktuasi tegangan yang bersifat relative bergantung pada detil, dan metode fabrikasi dan inspeksi dari detil sambungan tersebut.. Kurva S-N didesain berdasar pada kurva rata-rata-minus-dua-standart-deviasi untuk data uji coba yang relevan. Basic design dari kurva S-N dinyatakan sebagai berikut [5] :

$$\log N = \log K - m \log S$$

dimana :

- S = Rentang tegangan
- N = Nilai prediksi dari cycles untuk gagal pada rentang tegangan S
- m = Slope inverse negative dari kurva S-N
- log K = intersep dari log N-axis pada kurva S-N
- S-N = $\log a - 2\text{std}$ a dan std adalah konstan berhubungan dengan rata-rata kurva S-N dan standart deviasi dari log N.

Untuk detil struktur kapal, kurva S-N digambarkan dengan :

$$S^m \cdot N = K_2$$

Nilai K_2 dan m dapat dilihat pada Tabel 2 dibawah ini. Nilai K_2 dan m berbeda untuk tiap-tiap jenis tipe sambungan [6].

Tabel 2.
Tipe Sambungan (CSR for Double Hull Oil Tanker, 2010)

Class	K_1			m	Standard Deviation		K_2	S_q N/mm ²
	\log_{10}	\log_e	\log_e		\log_{10}	\log_e		
B	2.343 E15	15.3697	35.3900	4.0	0.1821	0.4194	1.01E15	100.2
C	1.082 E14	14.0342	32.3153	3.5	0.2041	0.4700	4.23E13	78.2
D	3.988 E12	12.6007	29.0144	3.0	0.2095	0.4824	1.52E12	53.4
E	3.289 E12	12.5169	28.8216	3.0	0.2509	0.5777	1.04E12	47.0
F	1.726 E12	12.2370	28.1770	3.0	0.2183	0.5027	0.63E12	39.8
F ₂	1.231 E12	12.0900	27.8387	3.0	0.2279	0.5248	0.43E12	35.0
G	0.566E12	11.7525	27.0614	3.0	0.1793	0.4129	0.25E12	29.2
W	0.368 E12	11.5662	26.6324	3.0	0.1846	0.4251	0.16E12	25.2

Klas untuk sambungan las yang cocok dengan detil sambungan dari struktur kapal kebanyakan adalah klas F dan F2. Sambungan las fillet termasuk ke dalam klas F, F2, atau G tergantung dari ukuranm orientasi dan lokasi las-lasan. Saat ini sudah tersedia electrodes yang dibuat secara spesifik untuk akar las agar mendapatkan hasil dengan kualitas las satu sisi yang lebih baik (tanpa backing). Menurut Bai (2003) dengan meningkatnya kualitas hasil lasan ini, sambungan tersebut dapat dikategorikan ke dalam klas F2 jika dilakukan dengan penetrasi penuh.

F. Konsentrasi Tegangan

Tujuan dari analisis tegangan adalah untuk menghitung tegangan pada kaki las (hot spot), $\sigma_{hotspot}$. Stress concentration factor karena efek geometri dinyatakan sebagai berikut [5] :

$$SCF = \frac{\sigma_{hotspot}}{\sigma_{nominal}}$$

Dari penjelasan di atas dapat dinyatakan bahwa stress concentration factor adalah rasio perbandingan antara rentang tegangan hotspot dengan rentang tegangan nominal. Semua tegangan yang naik harus diperhatikan saat mengevaluasi stress concentration factor (SCF). Hasil akhir dari persamaan SCF adalah :

$$SCF = SCF_g \cdot SCF_w \cdot SCF_{te} \cdot SCF_{ta} \cdot SCF_n$$

dimana :

- SCF_g = Faktor konsentrasi tegangan akibat bentuk kasar dari detil struktur
- SCF_w = Faktor konsentrasi tegangan akibat bentuk las-lasan
- SCF_{te} = Faktor konsentrasi tegangan tambahan karena toleransi keanehan bentuk (biasanya digunakan hanya untuk sambungan pelat)
- SCF_{ta} = Faktor konsentrasi tegangan tambahan karena ketidaktepatan sudut (biasanya digunakan hanya untuk sambungan pelat)
- SCF_n = Faktor konsentrasi tegangan tambahan untuk penguat

G. Simplified Fatigue Assesement

Penaksiran ini menggunakan hukum Palmgren-Miner, yang dinyatakan sebagai berikut [5] :

$$D_{fat} = \int_0^{\infty} \frac{N_0 f(S)}{N(S)}$$

Untuk marine structure, fungsi probabilitas dari rentang tegangan dapat digambarkan dengan dua parameter distribusi Weibull seperti persamaan yang telah dijelaskan sebelumnya.

Dimana A dan ξ adalah parameter skala dan parameter bentuk. maka akan didapat persamaan damage fatigue :

$$D_{fat} = \frac{N_0}{K} \int_0^{\infty} S^m \frac{\xi}{A} \left(\frac{S}{A}\right)^{\xi-1} \exp\left(-\frac{S}{A}\right)^{\xi} dS$$

Memperkenalkan :

$$x = \left(\frac{S}{A}\right)^{\xi}$$

Akan didapat :

$$D_{fat} = \frac{N_0}{K} A^m \int_0^{\infty} x^{1+m/\xi} \exp(-x) dx$$

Gamma function dinyatakan sebagai berikut :

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{k-1} dx$$

Mengkombinasikan dua persamaan sebelumnya maka akumulasi kerusakan jangka panjang dapat ditulis sebagai berikut :

$$D_{fat} = \frac{N_0}{K} A^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

Dengan A:

$$A = \left[\frac{S_0^{\xi}}{\ln N_0}\right]^{1/\xi}$$

Maka akan diperoleh persamaan akumulasi kerusakan jangka panjang adalah sebagai berikut (Almar-Naess, 1985) :

$$D_{fat} = \frac{N_0}{K} \left[\frac{S_0^{\xi}}{\ln N_0}\right]^{m/\xi} \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

dimana :

- N_0 = Total jumlah siklus dalam periode jangka panjang selama masa hidup
- S_0 = Rentang tegangan maksimum, dalam setiap N_0 cycles
- $P(S > S_0)$ = $\frac{1}{N_0}$ (rentang tegangan kelelahan S melebihi S_0 sekali dalam N_0 cycles)
- ξ = Parameter bentuk dari distribusi Weibull untuk siklus tegangan
- K, m = Parameter material dari kurva S-N

Selanjutnya dengan asumsi distribusi jangka panjang dari rentang stres sesuai dengan dua parameter weibull dan probabilitas distribusi, maka perhitungan kerusakan kumulatif DM untuk setiap kondisi yang relevan dapat dihitung sebagai [6] :

$$DM = \frac{\alpha_i \cdot N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

dimana :

- N_L : jumlah siklus untuk umur desain yang direncanakan. kecuali dinyatakan jika tidak, NL harus diambil sebagai: $\frac{foU}{4 \log L}$

nilai umumnya antara 0.6x10⁸ dan 0.8x10⁸ siklus untuk desain kehidupan 25years

- fo : diambil 0,85, dengan mempertimbangkan faktor tidak berlayar waktu untuk operasi seperti bongkar muat, perbaikan, dll
- U : lama perencanaan, dalam detik = $0,788 \times 10^9$ untuk desain umur 25 tahun
- L : aturan panjang, dalam m,
- m : parameter grafik S-N
- K_2 : parameter grafik S-N
- α_i : proporsi untuk ship life
 $\alpha_i = 0.5$ untuk kondisi muatan penuh
 $\alpha_i = 0.5$ untuk kondisi balas
- S_{Ri} : rentang stress yang di kemungkinan berkisar level 10^{-4} in N/mm²
- N_R : 10 000, jumlah siklus yang sesuai dengan probabilitas level 10^{-4}
- ζ : parameter distribusi weibull
- Γ : gamma function
- μ_i : koefisien memperhitungkan perubahan kemiringan grafik S-N

$$\mu_i = 1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$$

$$v_i = \left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} \ln N_R$$

- S_q : kisaran stres di persimpangan dua segmen dari grafik SN
- Δm : 2
- $\gamma(a, x)$: incomplete gamma function

Selanjutnya, rasio cumulative fatigue damage (DM) dapat diubah ke dalam perhitungan umur kelelahan menggunakan persamaan di bawah ini (Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker, 2010) [6]. Dalam pola ini, umur kelelahan yang didapat harus mendekati atau lebih besar dari design life kapal.

$$fatigue\ life = \frac{Design\ life}{DM} \quad years$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Perhitungan Pembebanan

Beban air laut (sea pressure) yaitu suatu pembebanan yang disebabkan tekanan air laut. Besar tidaknya tekanan yang dihasilkan dipengaruhi oleh besar kecilnya sarat kapal. Berikut ini merupakan gambar penyebaran sea pressure berdasarkan RINA 2010.

Beban gelombang (wave pressure) merupakan suatu pembebanan akibat gelombang air laut. Beban gelombang dalam regulasi RINA 2010 dibedakan menjadi dua macam kondisi yaitu kondisi yaitu kondisi upright dan kondisi inclined.

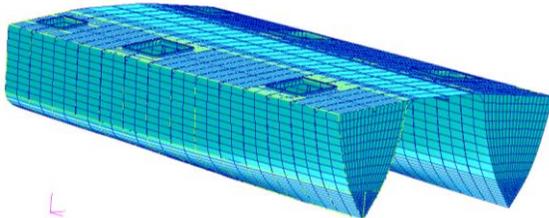
B. Langkah Pembuatan Model

• **Pembuatan Geometri**

Geometri pada model dilakukan dengan sistem down to up, yang dimaksud adalah geometri dibuat mulai dari node kemudian dibuat curve/garis kemudian pembuatan surface.

• **Meshing**

Meshing adalah membagi model menjadi elemen-elemen kecil yang seragam dengan tujuan agar analisa akan semakin detail pada setiap titik dalam keseluruhan model tersebut.



Gambar 1. Hasil Meshing katamaran dengan tiga kompartemen

• **Pembuatan Kategori Material**

Langkah selanjutnya setelah melakukan meshing pada model adalah melakukan input material yang akan digunakan pada model. Untuk material yang digunakan pada model kapal katamaran tugas akhir ini adalah Baja A516 grade 70.

C. Kondisi Batas (Constrain)

Pada pemodelan struktur pemberian kondisi batas (constraint) menjadi bagian yang penting sebelum dilakukan pembebanan karena kondisi batas ini berupa tumpuan yang berguna pada saat proses perhitungan agar proses perhitungan dapat dilakukan dan tegangan dapat ditampilkan. Jika tidak diberi kondisi batas maka gaya reaksi menjadi sangat besar sehingga tidak dapat ditampilkan oleh Nastran dan ini pun tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya [7]

Tabel 3.

Displacement pada boundary conditions

Boundary conditions	DISPLACEMENTS in directions (1)		
	X	Y	Z
Symmetry	free	fixed	free
Anti-symmetry	fixed	free	fixed

Tabel 4.

Rotasi pada boundary conditions

Boundary conditions	ROTATION around axes (1)		
	X	Y	Z
Symmetry	fixed	free	fixed
Anti-symmetry	free	fixed	free
(1) X, Y and Z directions and axes are defined with respect to the reference co-ordinate system in Ch 1, Sec 2, [4].			

D. Pemberian Kondisi Pembebanan

Pada proses pembebanan struktural ini dilakukan dengan mengambil data dari proses pembebanan sea pressure yang diberikan oleh rule. Jadi pembebanan yang dipakai adalah sea pressure, wave pressure, liquid pressure, inertial pressure yang

terdiri dari beberapa load case atau variasi muatan dan uniform cargoes pressure.

IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Tegangan Von Mises Tiap Sambungan

Tabel 5.
nilai tegangan pada sambungan 1

No Gading	Loadcase 1 kN/mm ²	Loadcase 2 kN/mm ²	Loadcase 3 kN/mm ²	Loadcase 4 kN/mm ²	Loadcase 5 kN/mm ²
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	2.74E-02	5.74E-02	1.30E-02	6.47E-03	4.49E-02
6	2.80E-03	6.10E-03	3.99E-03	4.19E-03	2.78E-03
7	4.27E-03	3.63E-03	3.94E-03	4.07E-03	4.45E-03
8	-	-	-	-	-
9	4.91E-03	4.14E-03	3.97E-03	4.18E-03	4.90E-03
10	8.65E-03	6.39E-03	7.38E-03	6.73E-03	8.65E-03
11	1.11E-02	8.57E-03	9.40E-03	8.60E-03	1.11E-02
12	9.27E-03	6.66E-03	7.89E-03	6.96E-03	9.26E-03
13	3.85E-03	3.67E-03	3.84E-03	3.75E-03	3.85E-03
14	-	-	-	-	-
15	5.93E-03	5.98E-03	6.26E-03	6.20E-03	5.93E-03
16	6.82E-03	4.89E-03	5.33E-03	4.69E-03	6.80E-03
17	-	-	-	-	-
Max	0.0274	0.0574	0.013	0.0086	0.0449

Tabel 6.

nilai tegangan pada sambungan 2

No Gading	Loadcase 1 kN/mm ²	Loadcase 2 kN/mm ²	Loadcase 3 kN/mm ²	Loadcase 4 kN/mm ²	Loadcase 5 kN/mm ²
3	-	-	-	-	-
4	6.80E-03	3.80E-02	5.58E-03	4.88E-03	7.34E-03
5	6.88E-03	4.28E-03	5.67E-03	4.79E-03	6.90E-03
6	5.16E-03	4.21E-03	4.74E-03	4.22E-03	4.85E-03
7	3.31E-03	3.59E-03	3.64E-03	3.69E-03	3.24E-03
8	2.77E-03	2.79E-03	2.90E-03	3.05E-03	2.77E-03
9	3.24E-03	2.78E-03	3.08E-03	3.16E-03	3.25E-03
10	3.27E-03	2.55E-03	3.04E-03	2.94E-03	3.27E-03
11	3.49E-03	2.71E-03	3.23E-03	3.05E-03	3.48E-03
12	4.10E-03	2.18E-03	3.13E-03	2.40E-03	4.08E-03
13	4.00E-03	1.44E-03	2.68E-03	1.61E-03	3.98E-03
14	3.29E-03	1.97E-03	2.47E-03	2.25E-03	3.27E-03
15	3.21E-03	3.31E-03	3.55E-03	3.77E-03	3.22E-03
16	2.97E-03	3.46E-03	3.56E-03	3.96E-03	2.99E-03
17	-	-	-	-	-
Max	0.00688	0.038	0.00567	0.00488	0.00734

Tabel 7.

nilai tegangan pada sambungan 3

No Gading	Loadcase 1 kN/mm ²	Loadcase 2 kN/mm ²	Loadcase 3 kN/mm ²	Loadcase 4 kN/mm ²	Loadcase 5 kN/mm ²
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	2.76E-02	5.74E-02	1.32E-02	1.30E-02	1.30E-02
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-
11	1.11E-02	8.57E-03	9.42E-03	9.41E-03	9.41E-03
12	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-
Max	0.0276	0.0574	0.0132	0.013	0.013

Tabel 8.
nilai tegangan pada sambungan 4

No Gading	Loadcase 1 kN/mm ²	Loadcase 2 kN/mm ²	Loadcase 3 kN/mm ²	Loadcase 4 kN/mm ²	Loadcase 5 kN/mm ²
3	-	-	-	-	-
4	6.00E-03	7.93E-03	5.81E-03	5.38E-03	5.88E-03
5	9.17E-03	4.46E-02	2.28E-02	8.12E-03	4.26E-02
6	3.31E-03	4.41E-03	3.09E-03	2.58E-03	3.49E-03
7	1.95E-03	1.21E-03	1.75E-03	1.69E-03	2.32E-03
8	1.95E-03	1.12E-03	1.71E-03	1.72E-03	2.14E-03
9	2.54E-03	1.32E-03	2.22E-03	1.95E-03	2.63E-03
10	3.16E-03	1.32E-03	2.48E-03	1.86E-03	3.18E-03
11	8.68E-03	2.57E-03	5.93E-03	2.82E-03	8.67E-03
12	3.59E-03	2.16E-03	2.88E-03	2.08E-03	3.62E-03
13	3.71E-03	1.58E-03	3.06E-03	2.48E-03	3.74E-03
14	3.93E-03	1.63E-03	3.01E-03	2.43E-03	3.94E-03
15	3.92E-03	1.75E-03	2.56E-03	4.25E-03	3.93E-03
16	3.57E-03	2.47E-03	1.90E-03	1.96E-03	3.57E-03
17	-	-	-	-	-
nilai Max	0.00917	0.0446	0.0228	0.00812	0.0426

Tabel 9.
nilai tegangan pada sambungan 5

No Gading	Loadcase 1 kN/mm ²	Loadcase 2 kN/mm ²	Loadcase 3 kN/mm ²	Loadcase 4 kN/mm ²	Loadcase 5 kN/mm ²
3	-	-	-	-	-
4	1.44E-02	1.16E-02	1.27E-02	1.05E-02	1.39E-02
5	1.50E-02	1.43E-02	1.43E-02	1.47E-02	1.65E-02
6	1.53E-02	1.02E-02	1.19E-02	1.13E-02	1.47E-02
7	1.29E-02	1.06E-02	1.14E-02	1.11E-02	1.30E-02
8	1.28E-02	1.06E-02	1.14E-02	1.09E-02	1.27E-02
9	1.41E-02	1.17E-02	1.25E-02	1.19E-02	1.41E-02
10	1.31E-02	1.06E-02	1.15E-02	1.09E-02	1.31E-02
11	9.20E-03	1.27E-02	1.06E-02	1.28E-02	1.26E-02
12	1.42E-02	1.06E-02	1.11E-02	1.01E-02	1.42E-02
13	1.49E-02	1.07E-02	1.23E-02	1.10E-02	1.49E-02
14	1.54E-02	1.09E-02	1.29E-02	1.13E-02	1.54E-02
15	1.65E-02	1.05E-02	1.29E-02	1.09E-02	1.65E-02
16	2.15E-02	1.11E-02	1.60E-02	1.24E-02	2.15E-02
17	-	-	-	-	-
nilai Max	0.0215	0.0143	0.016	0.0147	0.0215

Tabel 10.
nilai tegangan pada sambungan 6

No Gading	Loadcase 1 kN/mm ²	Loadcase 2 kN/mm ²	Loadcase 3 kN/mm ²	Loadcase 4 kN/mm ²	Loadcase 5 kN/mm ²
3	-	-	-	-	-
4	1.41E-02	1.12E-02	1.26E-02	1.11E-02	1.39E-02
5	1.17E-02	1.15E-02	7.95E-03	7.29E-03	1.50E-02
6	1.33E-02	6.05E-03	8.51E-03	7.44E-03	1.16E-02
7	1.15E-02	5.29E-03	7.16E-03	5.89E-03	1.14E-02
8	6.76E-03	4.28E-03	4.75E-03	4.88E-03	6.72E-03
9	9.29E-03	5.41E-03	6.40E-03	5.81E-03	9.27E-03
10	6.46E-03	4.82E-03	5.14E-03	5.37E-03	6.46E-03
11	8.69E-03	4.64E-03	5.33E-03	5.10E-03	8.69E-03
12	1.06E-02	4.33E-03	6.25E-03	4.55E-03	1.06E-02
13	1.09E-02	5.56E-03	6.72E-03	5.72E-03	1.09E-02
14	1.16E-02	6.47E-03	8.94E-03	7.10E-03	1.16E-02
15	1.13E-02	5.88E-03	8.42E-03	6.46E-03	1.13E-02
16	1.81E-02	8.91E-03	1.41E-02	1.06E-02	1.81E-02
17	-	-	-	-	-
nilai Max	0.0181	0.0115	0.0141	0.0111	0.0181

Tabel 11.
nilai tegangan pada sambungan 7

No Gading	Loadcase 1 kN/mm ²	Loadcase 2 kN/mm ²	Loadcase 3 kN/mm ²	Loadcase 4 kN/mm ²	Loadcase 5 kN/mm ²
3	-	-	-	-	-
4	1.89E-02	1.43E-02	1.85E-02	7.86E-03	8.61E-03
5	7.89E-03	1.12E-02	7.60E-03	5.98E-03	9.30E-03
6	1.91E-02	5.30E-03	1.47E-02	5.09E-03	2.06E-02
7	2.50E-02	3.32E-03	1.62E-02	4.92E-03	2.48E-02
8	2.43E-02	3.33E-03	1.58E-02	4.35E-03	2.43E-02
9	2.34E-02	2.76E-03	1.52E-02	3.68E-03	2.34E-02
10	2.38E-02	2.79E-03	1.51E-02	3.59E-03	2.38E-02
11	1.01E-02	3.55E-03	7.85E-03	4.13E-03	1.01E-02
12	3.08E-02	7.12E-03	2.18E-02	8.46E-03	3.08E-02
13	3.68E-02	9.78E-03	2.65E-02	1.16E-02	3.68E-02
14	3.84E-02	1.08E-02	2.82E-02	1.31E-02	3.38E-02
15	3.39E-02	9.71E-03	2.56E-02	1.22E-02	3.39E-02
16	2.47E-02	6.69E-03	1.88E-02	8.63E-03	2.47E-02
17	-	-	-	-	-
nilai Max	0.0384	0.0143	0.0282	0.0131	0.0368

Tabel 12.
nilai Dammage Cummulative pada sambungan 1

No.	Loadcase	Fatigue Damage (D) Palmgren - Miner's Weibull Distribution					
		STRESS	$DM = \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi})$				
		S N/mm ²	γ_i	$\gamma(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i)$	$\gamma(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i)$	$\mu =$	D
1	Loadcase 1	49.731	6.039E+00	3.308246666	30.45972256	0.46207	2.58E-02
2	Loadcase 2	104.181	2.483E+00	2.718699318	16.71763843	1.28983	6.63E-01
3	Loadcase 3	23.595	1.479E+01	3.311048736	30.67560059	0.10456	6.24E-04
4	Loadcase 4	15.609	2.430E+01	3.311048736	30.67560071	0.04576	7.91E-05
5	Loadcase 5	81.4935	3.336E+00	3.120804577	24.27208622	1.04439	2.57E-01
DM =							9.46E-01
Year =							2.64E+01

Tabel 13.
nilai Dammage Cummulative pada sambungan 2

No.	Loadcase	Fatigue Damage (D) Palmgren - Miner's Weibull Distribution					
		STRESS	$DM = \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi})$				
		S N/mm ²	γ_i	$\gamma(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i)$	$\gamma(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i)$	$\mu =$	D
1	Loadcase 1	12.4872	3.178E+01	3.311048736	30.67560068	0.02929	5.18E-05
2	Loadcase 2	68.97	4.077E+00	3.311048736	30.67560071	0.89340	2.66E-01
3	Loadcase 3	10.29105	4.009E+01	3.311048736	30.67560071	0.01989	1.97E-05
4	Loadcase 4	8.8572	4.801E+01	3.311048736	30.67560071	0.01473	9.30E-06
5	Loadcase 5	13.3221	2.940E+01	3.311048736	30.67560046	0.03333	7.16E-05
DM =							2.66E-01
Year =							9.38E+01

Tabel 14.
nilai Dammage Cummulative pada sambungan 3

No.	Loadcase	Fatigue Damage (D) Palmgren - Miner's Weibull Distribution					
		STRESS	$DM = \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi})$				
		S N/mm ²	γ_i	$\gamma(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i)$	$\gamma(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i)$	$\mu =$	D
1	Loadcase 1	31.878	1.042E+01	2.347684977	12.38908965	0.23468	8.98E-03
2	Loadcase 2	66.297	3.959E+00	0.805145283	1.511499705	0.76290	2.63E-01
3	Loadcase 3	15.246	2.763E+01	2.600805604	17.38577194	0.04413	1.85E-04
4	Loadcase 4	15.015	2.819E+01	2.600838445	17.38781864	0.04279	1.71E-04
5	Loadcase 5	15.015	2.819E+01	2.600838445	17.38781864	0.04279	1.71E-04
DM =							2.72E-01
Year =							9.19E+01

Tabel 15.
nilai Dammage Cummulative pada sambungan 4

No.	Loadcase	Fatigue Damage (D) Palmgren - Miner's Weibull Distribution					
		STRESS	$DM = \frac{\alpha_i \cdot N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi})$				
		S_i N/mm ²	η_i	$\gamma(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i)$	$\gamma(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i)$	$\mu_i =$	D
1	Loadcase 1	10.59135	4.471E+01	2.600945636	17.39539115	0.02128	2.99E-05
2	Loadcase 2	51.513	5.526E+00	0.599490924	0.914455142	0.79298	1.29E-01
3	Loadcase 3	26.334	1.341E+01	2.521688388	15.29069878	0.14612	3.15E-03
4	Loadcase 4	9.3786	5.251E+01	2.600945668	17.39539548	0.01669	1.63E-05
5	Loadcase 5	49.203	5.872E+00	1.470088675	4.498729128	0.55357	7.79E-02
						DM =	2.10E-01
						Year =	1.19E+02

Tabel 16.
nilai Dammage Cummulative pada sambungan 5

No.	Loadcase	Fatigue Damage (D) Palmgren - Miner's Weibull Distribution					
		STRESS	$DM = \frac{\alpha_i \cdot N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi})$				
		S_i N/mm ²	η_i	$\gamma(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i)$	$\gamma(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i)$	$\mu_i =$	D
1	Loadcase 1	39.0225	7.977E+00	2.594057023	17.10746475	0.28676	1.01E-01
2	Loadcase 2	25.9545	1.367E+01	2.600934187	17.39439044	0.12780	1.32E-02
3	Loadcase 3	29.04	1.179E+01	2.600844734	17.38821819	0.15997	2.32E-02
4	Loadcase 4	26.6805	1.318E+01	2.600925334	17.39370499	0.13505	1.52E-02
5	Loadcase 5	39.0225	7.977E+00	2.594057023	17.10746475	0.28676	1.01E-01
						DM =	2.53E-01
						Year =	9.88E+01

Tabel 17.
nilai Dammage Cummulative pada sambungan 6

No.	Loadcase	Fatigue Damage (D) Palmgren - Miner's Weibull Distribution					
		STRESS	$DM = \frac{\alpha_i \cdot N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi})$				
		S_i N/mm ²	η_i	$\gamma(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i)$	$\gamma(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i)$	$\mu_i =$	D
1	Loadcase 1	26.607	1.323E+01	2.600E+00	1.735E+01	0.87056	1.30E-01
2	Loadcase 2	16.905	2.410E+01	2.600945617	17.3953888	0.85859	3.28E-02
3	Loadcase 3	20.727	1.841E+01	2.600937163	17.3946311	0.86267	6.07E-02
4	Loadcase 4	16.317	2.526E+01	2.60094565	17.39539306	0.85803	2.95E-02
5	Loadcase 5	26.607	1.323E+01	2.60019613	17.35286263	0.87056	1.30E-01
						DM =	3.82E-01
						Year =	6.54E+01

Tabel 18.
nilai Dammage Cummulative pada sambungan 7

No.	Loadcase	Fatigue Damage (D) Palmgren - Miner's Weibull Distribution					
		STRESS	$DM = \frac{\alpha_i \cdot N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi})$				
		S_i N/mm ²	η_i	$\gamma(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i)$	$\gamma(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i)$	$\mu_i =$	D
1	Loadcase 1	56.448	5.186E+00	2.164E+00	1.777E+01	0.93972	4.04E-01
2	Loadcase 2	21.021	1.700E+01	2.577005683	30.66852569	0.86765	1.92E-02
3	Loadcase 3	41.454	7.516E+00	2.520693409	26.19522866	0.90755	1.54E-01
4	Loadcase 4	19.257	1.888E+01	2.600944068	30.67397507	0.86374	1.47E-02
5	Loadcase 5	54.096	5.458E+00	2.236082606	18.66068298	0.93509	3.54E-01
						DM =	9.46E-01
						Year =	2.64E+01

Tabel 19.
perhitungan Cummulative Damage untuk tiap sambungan

No.	Sambungan (connection)	umur kelelahan
1	Antara side girder dan balok geladak	26.4 tahun
2	Antara center girder dan balok geladak	93.8 tahun
3	Antara side girder dan sekat melintang	91.9 tahun
4	Antara girder dan wrang plat	119 tahun
5	Antara gading dan balok geladak (daerah tengah)	98.8 tahun
6	Antara gading dan balok geladak (daerah pinggir)	65.4 tahun
7	Antara gading dan inner bottom	26.4 tahun

V. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan menggunakan metode elemen hingga dengan permodelan dan analisa perhitungan manual, pembebanan dan kondisi batas sesuai dengan ketentuan RINA 2010 dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Perbedaan tegangan dengan analisa metode elemen hingga berdasarkan regulasi, terjadi karena perbedaan jenis pembebanan atau load case.
- Nilai tegangan von Mises untuk tiap sambungan dengan loadcase yang berbeda memiliki nilai yang berbeda pula untuk tiap jarak gading.
- Tegangan *von Mises* maksimum yang dianalisa dengan metode elemen hingga terdapat pada kondisi pembebanan Loadcase 2 yang terdapat pada sambungan 1 yaitu antara side girder dan balok geladak dan sambungan 3 yaitu antara side girder dan sekat melintang dengan nilai tegangan 57.4 N/mm², dibawah tegangan normal berdasarkan perhitungan rule yaitu 249.46 N/mm²
- Berdasarkan analisa umur kapal (fatigue life) struktur katamaran maka diperoleh umur terkecil yaitu 26.4 tahun untuk sambungan 1 yaitu antara side girder dan sambungan 7 antara gading dan inner bottom untuk seluruh loading condition.
- Dapat disimpulkan untuk konfigurasi struktur kapal katamaran cukup memenuhi untuk segi desain jika dilihat dari umur struktur yang lebih besar dari standar umur kapal yaitu 25 tahun. Namun harus dilakukan penguatan struktur di lokasi-lokasi tertentu yang dianggap kritis dan rawan terjadi kegagalan, agar umur dari struktur tersebut dapat bertambah sehingga mampu menjalankan tugas operasinya hingga waktu yang ditentukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Budie Santosa selaku dosen pembimbing Tugas Akhir dan Jurnal Ilmiah ini yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama pengerjaan Jurnal Ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- P.R. Couser, A.F. Molland, N.A. Armstrong, I.K.A.P. Utama, Calm Water Powering Prediction for High-Speed Catamarans, Proc. Of FAST 1997, Sydney (21-23 Juli 1997).
- H. Turner, A. Taplin, The resistance of large powered catamarans, Transactions SNAME, Vol. 76 (1968).
- M. Insel, A.F.T. Molland, An Investigation into the Resistance Components of High-Speed Displacement Catamarans, Transactions RINA, Vol. 134, (1992).
- M.T. Widodo, Kendalan Scantling Struktur Geladak Dan Dasar Pada Konversi Tanker Menjadi FPSO Terhadap Beban Kelelahan. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2010).
- Y. Bai, Marine Structural Design. Oxford : Elsevier Science Ltd. (2003).
- International Association of Classification Societies, Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker. London : IACS Council (2010).
- Registro Italiano Navale, Hull and Stability Genova-Italy : Rules for The Classification of Ships (2010).