

Analisis *Fatigue Life* Konstruksi Kapal Tanker 17500 DWT Menggunakan Metode *Simplified Fatigue Analysis*

Aryo Pangestu, Mohammad Nurul Misbah, dan Dony Setyawan
Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: mnmisbah@na.its.ac.id, dony@na.its.ac.id

Abstrak—Kebutuhan minyak dunia diprediksi akan mengalami peningkatan pada tahun 2023 menjadi 100.4 juta barel. Peningkatan kebutuhan minyak dunia ini diikuti dengan peningkatan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak. Maka dibutuhkan fasilitas penunjang proses eksplorasi dan eksploitasi minyak, seperti kapal *oil tanker*. Diharapkan kapal *oil tanker* sebagai fasilitas penunjang mampu beroperasi dalam jangka waktu yang optimal. Selama kondisi operasional, kapal mengalami beban kerja berulang yang disebabkan oleh kondisi lingkungan pelayarannya yang dapat membahayakan struktur konstruksi kapal. Oleh karena itu, dibutuhkan perhitungan *fatigue* terhadap konstruksi kapal yang salah satunya dengan menggunakan metode *simplified fatigue analysis*. Analisis *fatigue* dilakukan pada sambungan pembujur sisi, pembujur alas dalam, dan pembujur alas terhadap sekat melintang akibat pengaruh dari tekanan dinamis gelombang dan tekanan *sloshing* muatan searah melintang kapal yang dihitung menggunakan rumus pada *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker* (CSR). Analisis menggunakan variasi kondisi operasional muatan, yaitu $0.5h_{filling}$, $0.7h_{filling}$, dan $0.85h_{filling}$ di mana untuk tiap masing-masing besar pembebanan diaplikasikan pada model tiga ruang muat. Proses analisis dibantu menggunakan *software* elemen hingga untuk mendapatkan hasil analisis dari variasi pembebanan. Berdasarkan hasil analisis, tegangan terbesar untuk sambungan pembujur sisi terjadi ketika kondisi muatan $0.85h_{filling}$, yaitu sebesar 56.3 MPa. Sambungan pembujur alas dalam pada kondisi $0.7h_{filling}$, yaitu sebesar 53.4 MPa. Sambungan pembujur alas pada kondisi $0.85h_{filling}$, yaitu sebesar 59.1 MPa. Dari hasil tegangan tersebut, didapatkan *fatigue life* untuk tiap sambungan adalah 26.6 tahun untuk sambungan pembujur sisi, 42.5 tahun untuk sambungan pembujur alas dalam, dan 30.4 tahun untuk sambungan pembujur alas.

Kata Kunci—CSR, *Fatigue life*, Kapal tanker, *Simplified fatigue Analysis*.

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN minyak dunia setiap tahun mengalami kenaikan. Berdasarkan data dari *International Energy Agency* (IEA), pada tahun 2023 kebutuhan minyak dunia meningkat menjadi 100.4 juta barel [1]. Karena peningkatan kebutuhan minyak dunia yang meningkat, maka proses eksplorasi dan eksploitasi juga ikut meningkat sehingga diperlukan fasilitas penunjang yang cukup, salah satunya adalah kapal *oil tanker*. Selama pelayaran, kapal harus mampu bertahan terhadap beban kerja berulang yang terjadi selama pelayaran karena kondisi lingkungan.

Beban berulang yang terjadi secara terus menerus dapat mengakibatkan kelelahan pada struktur kapal. Beberapa insiden kecelakaan kapal akibat kelelahan pada struktur antara lain, M.V. Derbyshire pada tahun 1980 dan M.T.

Prestige pada tahun 2002. Pada tahun 2006, *International Association of Classification Societies* (IACS) mengembangkan regulasi terbaru untuk konstruksi kapal *tanker* dan *bulk carrier* yang bernama *Common Structural Rules* (CSR).

Karena beban berulang yang terjadi secara terus menerus dan dapat membahayakan struktur kapal, maka diperlukan analisis *fatigue* terhadap struktur konstruksi kapal. Terdapat beberapa metode dalam analisis *fatigue*, dalam penelitian ini digunakan metode *simplified fatigue analysis*.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis *fatigue* yang difokuskan pada sambungan antara pembujur sisi, pembujur alas dalam, dan pembujur alas terhadap sekat melintang akibat pengaruh tekanan dinamis gelombang dan tekanan *sloshing* muatan searah melintang kapal.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Fatigue*

Fatigue atau kelelahan adalah suatu proses penjumlahan siklus demi siklus kerusakan pada struktur yang terkena tegangan yang berfluktuasi, melalui beberapa tahap dimulai dari keadaan awal "crack free" sampai ke keadaan "failure" atau kegagalan. Parameter beban yang paling berpengaruh adalah komponen tegangan yang berfluktuasi atau biasa disebut sebagai rentang tegangan [2]. Ada dua tipe kelelahan, yaitu :

1. *Low-cycle fatigue*, terjadi untuk jumlah siklus rendah, kurang dari 5×10^3 siklus
2. *High-cycle fatigue*, terjadi untuk jumlah siklus tinggi

B. Metode *Simplified Fatigue Analysis*

Metode alternatif yang dikembangkan untuk prosedur perhitungan sederhana dari beban dan tegangan yang bersifat *long-term* dinamakan metode *simplified fatigue analysis*. *Loading case* yang berbeda menggabungkan berbagai efek dinamis lingkungan pada struktur lambung yang dipertimbangkan untuk perhitungan rentang tegangan yang ditujukan untuk menutupi kondisi terparah [2]. Beban yang termasuk adalah :

1. *Hull girder loads* (contohnya : *wave bending moment*, momen torsional, dan gaya geser)
2. Beban eksternal tekanan gelombang
3. Beban internal yang berubah-ubah

C. Beban pada Kapal

Pada penelitian ini, beban yang digunakan adalah tekanan dinamis gelombang dan tekanan *sloshing* muatan searah melintang kapal. Tekanan dinamis gelombang didapatkan

dengan menggunakan persamaan berikut [3] :

$$P_1 = 2f_{prob} f_{n1-p1} \left[\left(P_{11} + \frac{135B_{local}}{4(B+75)} - 1.2(T_{LC} - z) \right) f_1 + \frac{135B_{local}}{4(B+75)} f_2 \right]$$

(1)

$$P_2 = 26f_{prob} f_{n1-p2} \left[\left(\frac{B_{local}}{8} \theta + f_T C_b \frac{0.25B_{local} + 0.8C_{wv}}{14} \left(0.7 + \frac{2z}{T_{LC}} \right) \right) f_1 + \left(\frac{B_{local}}{8} \theta + f_T C_b \frac{0.25B_{local}}{14} \left(0.7 + \frac{2z}{T_{LC}} \right) \right) f_2 \right]$$

(2)

Dari kedua persamaan ini, diambil hasil yang terbesar dari perbandingan antara P₁ dan P₂. Sedangkan tekanan *sloshing* searah melintang kapal didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut[3] :

$$P_{sln-t} = 7\rho g f_{sln} \left(\frac{b_{sln}}{B} - 0.3 \right) GM^{0.75}$$

(3)

D. Gerakan Rolling Kapal

Gerakan *rolling* adalah gerakan rotasi kapal terhadap sumbu memanjang kapal. Untuk menghitung sudut *roll* kapal, digunakan rumus pendekatan sebagai berikut[3] :

$$\theta = \frac{50}{B+75} (1.25 - 0.025U_{roll}) f_{bk}$$

(4)

E. Konsep Metode Elemen Hingga

Prinsip dasar dari metode elemen hingga ini adalah memperlakukan suatu sistem sebagai gabungan elemen-

elemen kecil yang disebut *finite element*. Antar elemen digabungkan melalui titik-titik yang disebut *nodes* atau *nodal point* [4].

F. S-N Diagram

S-N diagram didapatkan dari percobaan material yang diberi beban tegangan yang berfluktuasi sesuai dengan regular sinusoidal [5]. Analisis elelahan berdasarkan pendekatan tegangan nominal, sambungan las dibagi menjadi beberapa kategori yang memiliki *basic data* diagram S-N [3]. Adapun *basic data* diagram S-N untuk tiap tipe sambungan berdasarkan CSR dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1 adalah bentuk diagram S-N untuk sambungan las.

G. Rentang Tegangan

Rentang tegangan atau *stress range* pada perhitungan berdasarkan CSR ini dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [3] :

$$S_e = 2\sigma_{2Ae}$$

(5)

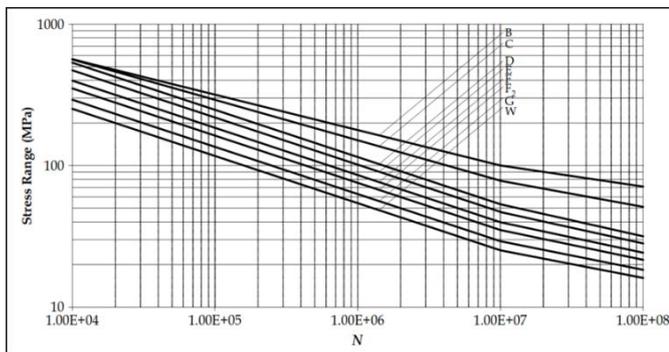
$$S_i = 2\sigma_{2Ai}$$

(6)

(5) adalah besar rentang tegangan untuk hasil pengaruh dari tekanan dinamis gelombang, sedangkan (6) adalah besar rentang tegangan untuk hasil pengaruh dari tekanan *transverse sloshing*. Karena *input* pembebanan pada analisis adalah kombinasi dari kedua beban, maka besar rentang tegangan yang terjadi adalah dua kali tegangan yang dihasilkan.

Tabel 1
Basic Data Diagram S-N

| Class | K ₁ | | | m | Standard Deviation | | K ₂ | S _q N/mm ² |
|-------|----------------|------------------|------------------|-----|--------------------|------------------|----------------|----------------------------------|
| | Log10 | log _e | log _e | | Log10 | log _e | | |
| B | 2.343E15 | 15.3697 | 35.3900 | 4.0 | 0.1821 | 0.4194 | 1.01E15 | 100.2 |
| C | 1.082E14 | 14.0342 | 32.3153 | 3.5 | 0.2041 | 0.4700 | 4.23E13 | 78.2 |
| D | 3.988E12 | 12.6007 | 29.0144 | 3.0 | 0.2095 | 0.4824 | 1.52E12 | 53.4 |
| E | 3.289E12 | 12.5169 | 28.8216 | 3.0 | 0.2509 | 0.5777 | 1.04E12 | 47.0 |
| F | 1.726E12 | 12.2370 | 28.1770 | 3.0 | 0.2183 | 0.5027 | 0.63E12 | 39.8 |
| F2 | 1.231E12 | 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 | 0.368E12 | 11.5662 | 26.6324 | 3.0 | 0.1846 | 0.4251 | 0.16E12 | 25.2 |



Gambar 1. Diagram S-N sambungan las menurut CSR.

H. Perhitungan Fatigue

Perhitungan kelelahan struktur *oil tanker* ini sesuai dengan penerapan aturan *Palmgren-Miner cumulative damage*. Ketika *cumulative fatigue damage ratio*, DM, memiliki nilai yang lebih besar dari 1, maka dapat dipastikan struktur tersebut mengalami kegagalan. Nilai DM dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut[3] :

$$DM_i = \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\zeta}}$$

(7)

Nilai DM dari persamaan di atas akan digunakan untuk menentukan umur kelelahan struktur sambungan dengan perhitungan umur kelelahan (*fatigue life*), yaitu:

$$FatigueLife = \frac{DesignLife}{DM}$$

(8)

Di mana *design life* menurut CSR adalah sebesar 25 tahun.

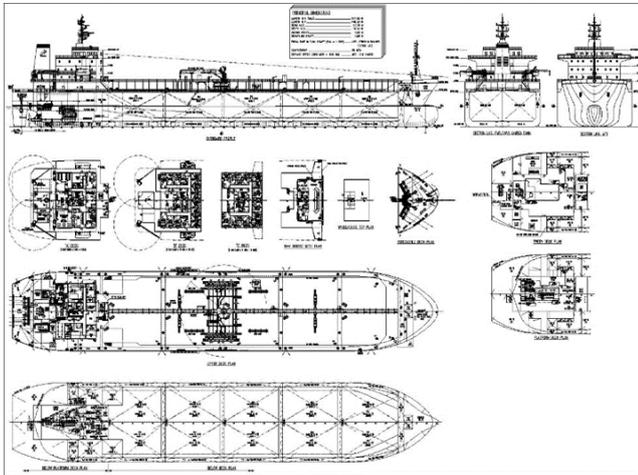
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Pengumpulan Data

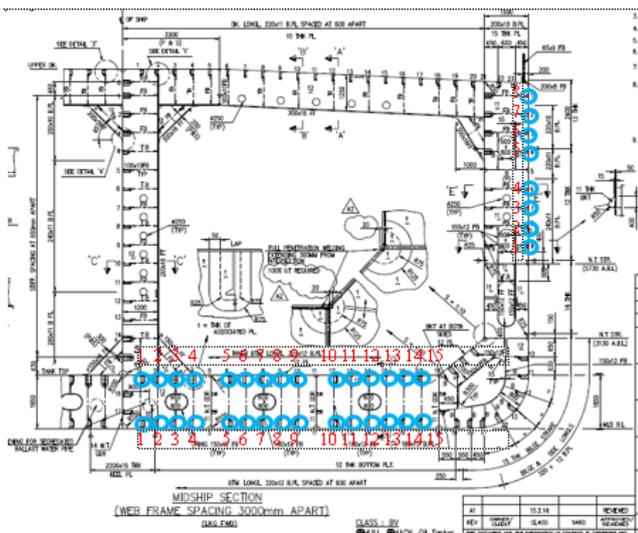
Dalam proses penelitian ini, diperlukan data-data pendukung sebagai dasar dalam membuat model untuk analisis elemen hingga. Data kapal yang digunakan adalah data kapal *tanker 17500 Double Hull LTDW* dengan ukuran utama kapal tersebut dijelaskan pada Tabel 2. Selain itu, data lain yang dikumpulkan adalah berupa gambar rencana umum pada Gambar 2 digunakan untuk penentuan ruang muat yang akan dimodelkan dan gambar *midship section* pada Gambar 3 digunakan sebagai acuan detail konstruksi dari ruang muat yang akan dimodelkan.

Tabel 2.
Data Ukuran Utama Kapal

| Deskripsi | Ukuran |
|------------------------------|------------------------|
| Displacement | (Δ) 17500 ton |
| Length Overall | (L_{OA}) 157.50 m |
| Length Between Perpendicular | (L_{PP}) 149.50 m |
| Breadth Moulded | (B) 27.70 m |
| Depth | (D) 12.00 m |
| Draught | (T) 7.00 m |
| Service Speed | (V_s) 13.00 knots |



Gambar 2. Rencana umum kapal tanker 17500 LTDW



Gambar 3. Midship section kapal tanker 17500 LTDW beserta titik tinjau analisis

Selain data berupa gambar, data yang dikumpulkan juga termasuk *intact stability booklet* dari kapal tanker ini.

B. Pembebanan

Beban yang akan digunakan pada analisis ini dihitung berdasarkan (1) dan (2) untuk tekanan dinamis gelombang dan (3) untuk tekanan *sloshing* arah melintang kapal. Besar tekanan dinamis gelombang dan tekanan *sloshing* arah melintang kapal ini dipengaruhi oleh ketinggian muatan. Oleh karena itu, variasi yang digunakan adalah ketinggian muatan, yaitu $0.5h_{filling}$, $0.7h_{filling}$, dan $0.85h_{filling}$ (muatan penuh). Untuk tiap kondisi pemuatan, ketinggian sarat kapal menjadi berbeda sehingga besarnya tekanan dinamis gelombang untuk tiap kondisi pemuatan berbeda. Besarnya sarat untuk kondisi $0.5h_{filling}$ dan $0.7h_{filling}$ didapatkan melalui interpolasi linear dengan batasan antara sarat kapal kosong dan sarat kondisi muatan penuh. Berdasarkan data *intact stability booklet*, sarat kapal kosong adalah sebesar 2.139 m dan sarat muatan penuh adalah 7 m. maka dilakukan interpolasi linear sehingga didapatkan tinggi sarat untuk kondisi $0.5h_{filling}$ dan $0.7h_{filling}$ secara berurutan adalah sebesar 4.99 m dan 6.142 m. Tabel 3 menunjukkan hasil rekapitulasi tekanan dinamis gelombang, sedangkan Tabel 4 menunjukkan rekapitulasi tekanan *transverse sloshing*.

C. Pemodelan

Dalam analisis *fatigue* pada penelitian ini dibantu dengan penggunaan *software* elemen hingga. Untuk itu, diperlukan model konstruksi. Model konstruksi yang dibuat adalah tiga ruang muat di bagian *midship* kapal. Model konstruksi ini memiliki panjang 65.25 m. Elemen yang digunakan adalah elemen *Shell 281* yang memiliki 8 *nodes* untuk pelat dan *Beam 189* yang memiliki 3 *nodes* untuk pembujur. Elemen ini dipilih untuk mendapatkan hasil tegangan yang lebih detail.

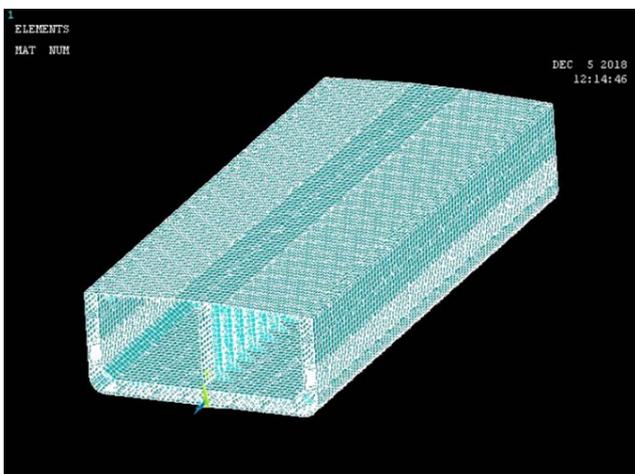
Material properties yang dimasukkan adalah sesuai dengan *material properties* baja A36 yang memiliki besar modulus *Young* 200 GPa, massa jenis 7850 kg/m^3 , dan *poisson ratio* 0.3. Kapal tanker ini memiliki jarak gading yaitu sebesar 0.6 m, 0.65 m, dan 0.75 m. Berdasarkan CSR ukuran elemen maksimum adalah sebesar 0.8, maka ukuran elemen yang digunakan adalah sebesar 0.6, 0.65, dan 0.75. Gambar 4 menunjukkan hasil *meshing* dari model tiga ruang muat.

Tabel 3.
Rekapitulasi Tekanan Dinamis Gelombang

| z (m) 0.5hfilling | P _{ex-amp} (kN/m ²) 0.5hfilling | z(m) 0.7hfilling | P _{ex-amp} (kN/m ²) 0.7hfilling | z(m) 0.85hfilling | P _{ex-amp} (kN/m ²) 0.85hfilling |
|-------------------|--|------------------|--|-------------------|---|
| 0 | 73.725 | 0 | 78.733 | 0 | 82.462 |
| 1.18 | 65.008 | 1.18 | 71.170 | 1.18 | 75.512 |
| 2.49 | 55.331 | 2.49 | 62.773 | 2.49 | 67.796 |
| 4.43 | 41.000 | 4.43 | 50.339 | 4.43 | 56.369 |
| 4.99 | 36.863 | 6.055 | 39.924 | 6.055 | 46.789 |
| 6.055 | 31.263 | 6.142 | 39.366 | 6.705 | 42.970 |
| 6.705 | 27.844 | 6.705 | 35.583 | 7 | 41.231 |
| 7.355 | 24.426 | 7.355 | 31.215 | 7.355 | 38.305 |
| 8.005 | 21.008 | 8.005 | 26.847 | 8.005 | 32.945 |
| 8.655 | 17.590 | 8.655 | 22.479 | 8.655 | 27.585 |
| 9.305 | 14.172 | 9.305 | 18.111 | 9.305 | 22.225 |
| 9.955 | 10.754 | 9.955 | 13.742 | 9.955 | 16.865 |
| 10.605 | 7.336 | 10.605 | 9.374 | 10.605 | 11.505 |
| 11.255 | 3.918 | 11.255 | 5.006 | 11.255 | 6.145 |
| 11.79 | 1.104 | 11.79 | 1.411 | 11.79 | 1.734 |
| 12 | 0.000 | 12 | 0.000 | 12 | 0.000 |

Tabel 4.
Rekapitulasi Tekanan *Transverse Sloshing*

| | h_{fill} (m) | f_{slh} | b_{tk-h} (m) | b_{slh} (m) | P_{slh-t} (kN/m ²) |
|----------------|----------------|-----------|----------------|---------------|----------------------------------|
| 0.05 h_{max} | 0.534 | 0.155 | 11.584 | 11.584 | 4.792 |
| 0.1 h_{max} | 1.068 | 0.28 | 12.091 | 12.091 | 9.997 |
| 0.15 h_{max} | 1.601 | 0.395 | 12.397 | 12.397 | 15.244 |
| 0.2 h_{max} | 2.135 | 0.5 | 12.397 | 12.397 | 19.296 |
| 0.25 h_{max} | 2.669 | 0.595 | 12.397 | 12.397 | 22.962 |
| 0.3 h_{max} | 3.203 | 0.68 | 12.397 | 12.397 | 26.243 |
| 0.35 h_{max} | 3.737 | 0.755 | 12.397 | 12.397 | 29.137 |
| 0.4 h_{max} | 4.270 | 0.82 | 12.397 | 12.397 | 31.645 |
| 0.45 h_{max} | 4.804 | 0.875 | 12.397 | 12.397 | 33.768 |
| 0.5 h_{max} | 5.338 | 0.92 | 12.397 | 12.397 | 35.505 |
| 0.55 h_{max} | 5.872 | 0.955 | 12.397 | 12.397 | 36.855 |
| 0.6 h_{max} | 6.406 | 0.98 | 12.397 | 12.397 | 37.820 |
| 0.65 h_{max} | 6.939 | 0.995 | 12.397 | 12.397 | 38.399 |
| 0.7 h_{max} | 7.473 | 1 | 12.397 | 12.397 | 38.592 |
| 0.75 h_{max} | 8.007 | 0.995 | 12.397 | 12.397 | 38.399 |
| 0.8 h_{max} | 8.541 | 0.98 | 12.397 | 12.397 | 37.820 |
| 0.85 h_{max} | 9.075 | 0.955 | 12.397 | 12.397 | 36.855 |
| 0.9 h_{max} | 9.608 | 0.92 | 12.397 | 12.397 | 35.505 |
| 0.95 h_{max} | 10.142 | 0.875 | 12.397 | 12.397 | 33.768 |



Gambar 4. Model tiga ruang muat bagian midship kapal *tanker* 17500 DWT

Kondisi batas yang ditetapkan oleh CSR diberikan pada *independent point* di kedua ujung model. *Independent point* adalah titik *neutral axis* dari model pada daerah tersebut. Untuk *nodes* di sekeliling didefinisikan sebagai *rigid link* [3].

Tabel 5.
Kondisi Batas

| Lokasi | Traslasi | | | Rotasi | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | δ_x | δ_y | δ_z | θ_x | θ_y | θ_z |
| Ujung belakang (semua elemen memanjang) | Rigid | - | - | - | Rigid | Rigid |
| Independent point ujung belakang | Link | - | - | - | Link | Link |
| Ujung depan (semua elemen memanjang) | Fix | - | - | - | - | - |
| Independent point ujung depan | Rigid | - | - | - | Rigid | Rigid |
| | Link | - | - | - | Link | Link |

D. Perhitungan *Fatigue Life*

Perhitungan *cumulative fatigue damage* harus dilakukan untuk mengetahui besar akumulasi kerusakan kelelahan akibat masing-masing kondisi pembebanan. Perhitungan *cumulative fatigue damage* sesuai dengan (7). Setelah nilai *cumulative fatigue damage* didapatkan, selanjutnya adalah menghitung *fatigue life* berdasarkan (8).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Tegangan

Tegangan yang didapatkan melalui *software* elemen hingga nantinya akan dilakukan analisis untuk tiap kondisi pemuatan dengan variasi *roll* kanan dan *roll* kiri.

1) Kondisi 0.5 $h_{filling}$

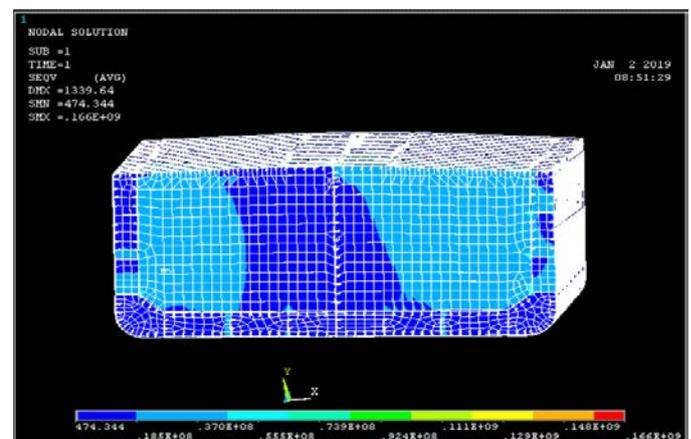
Sebelumnya dilakukan perhitungan sudut *roll* sesuai (4) dan didapatkan sudut *roll* sebesar 27.948°. Lalu dilakukan analisis dengan variasi gerakan *roll* kanan dan *roll* kiri dengan besar sudut *roll* yang sama. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan hasil *solving* kondisi 0.5 $h_{filling}$.

2) Kondisi 0.7 $h_{filling}$

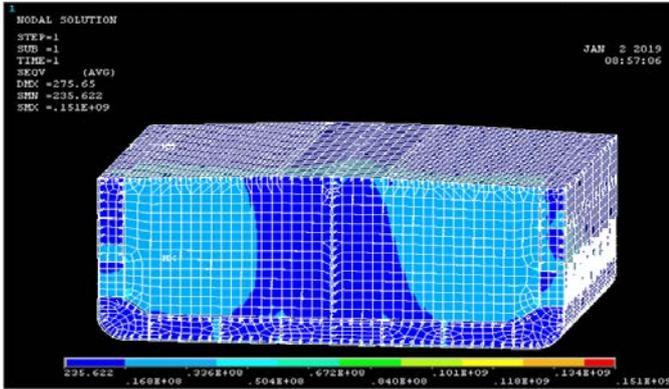
Sebelumnya dilakukan perhitungan sudut *roll* sesuai (4) dan didapatkan sudut *roll* sebesar 27.333°. Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan hasil *solving* kondisi 0.7 $h_{filling}$.

3) Kondisi 0.85 $h_{filling}$

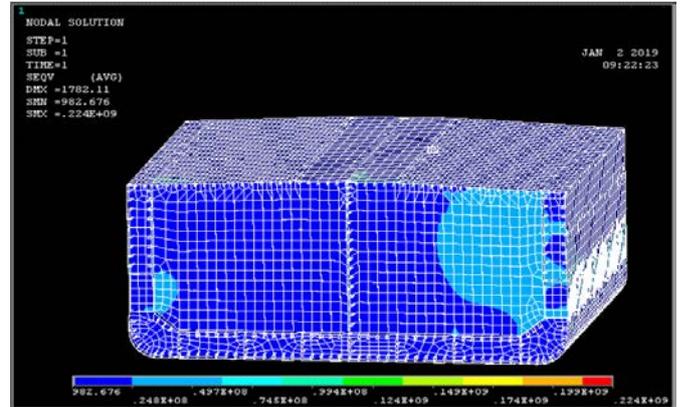
Sebelumnya dilakukan perhitungan sudut *roll* sesuai (4) dan didapatkan sudut *roll* sebesar 26.339°. Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan hasil *solving* kondisi 0.85 $h_{filling}$.



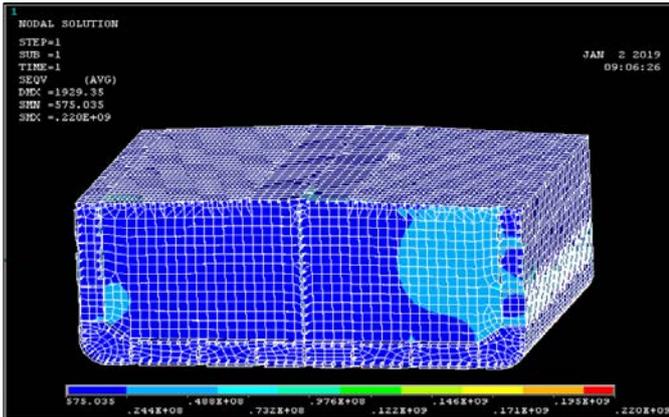
Gambar 5. Hasil *solving* pada kondisi 0.5 $h_{filling}$ *roll* kanan



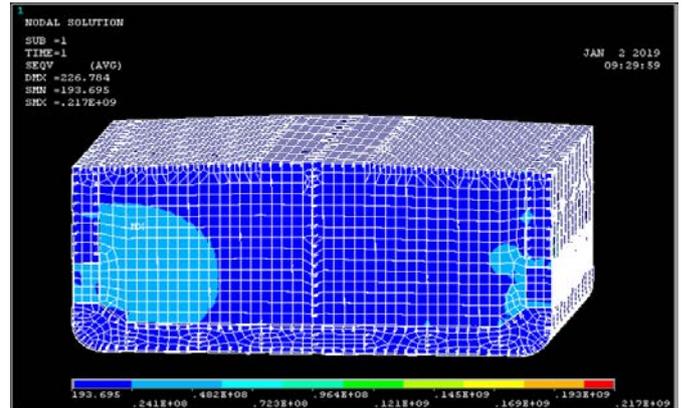
Gambar 6. Hasil *solving* pada kondisi $0.5h_{filling}$ roll kiri



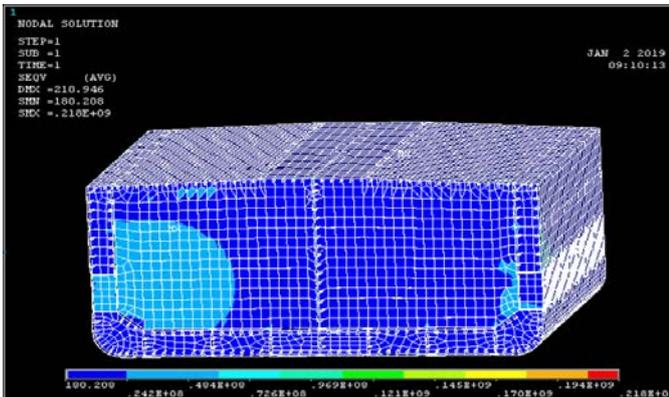
Gambar 9. Hasil *solving* pada kondisi $0.85h_{filling}$ roll kanan



Gambar 7. Hasil *solving* pada kondisi $0.7h_{filling}$ roll kanan



Gambar 10. Hasil *solving* pada kondisi $0.85h_{filling}$ roll kiri



Gambar 8. Hasil *solving* pada kondisi $0.7h_{filling}$ roll kiri

Tabel 6
Rekapitulasi Tegangan Maksimum (σ_{max})(kN/m²)

| Item | Starboard | Port | Starboard | Port | Starboard | Port |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | $0.5h_{filling}$ | $0.5h_{filling}$ | $0.7h_{filling}$ | $0.7h_{filling}$ | $0.85h_{filling}$ | $0.85h_{filling}$ |
| Pembujur Sisi | 54.8 | 53.95 | 55.45 | 55.2 | 56.3 | 56.1 |
| Pembujur Alas Dalam | 46.1 | 45.7 | 53.4 | 53.2 | 48.9 | 48.6 |
| Pembujur Alas | 54.7 | 54.1 | 57.1 | 57 | 59.1 | 59 |

Dari hasil *solving* yang didapatkan, dapat dilihat sebaran tegangan antara kondisi *roll* kanan dan *roll* kiri tidak sama. Hal ini terjadi karena pengaruh dari *web transverse* dari sekat memanjang yang dipasang di sisi sebelah kanan pelat sekat memanjang. Tabel 6 menunjukkan hasil rekapitulasi tegangan maksimum untuk tiap sambungan pada tiap kondisi pemuatan.

B. Perhitungan Cumulative Fatigue Damage

Perhitungan nilai *cumulative fatigue damage*, DM, didapatkan dengan menggunakan (7). Perhitungan DM ini

membutuhkan nilai rentang tegangan yang nilainya adalah dua kali tegangan yang dihasilkan menurut CSR. Pada penelitian ini, terdapat tiga kondisi operasional pembebanan, yaitu $0.5h_{filling}$, $0.7h_{filling}$, dan $0.85h_{filling}$. Sehingga nilai persentase kondisi operasional pembebanan diasumsikan dengan nilai sebagai berikut:

- $0.5h_{filling} = 20\%$
- $0.7h_{filling} = 30\%$
- $0.85h_{filling} = 50\%$

Nilai akumulasi dari ketiga persentase kondisi operasional pembebanan harus sebesar 100%. Tabel 7 menunjukkan hasil rekapitulasi nilai DM.

Tabel 7.
Rekapitulasi DM

| Item | DM | | | DM _{total} |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| | 0.5h _{filling} | 0.7h _{filling} | 0.85h _{filling} | |
| Pembujur Sisi | 0.860 | 0.918 | 0.986 | 0.940 |
| Pembujur Alas Dalam | 0.445 | 0.748 | 0.549 | 0.588 |
| Pembujur Alas | 0.688 | 0.792 | 0.894 | 0.822 |

C. Perhitungan Fatigue Life

Perhitungan *fatigue life* untuk tiap sambungan dilakukan ketika nilai DM didapatkan. *Fatigue life* dianggap memenuhi CSR ketika nilainya tidak kurang dari 25 tahun. Tabel 8 menunjukkan hasil rekapitulasi nilai *fatigue life*.

Tabel 8.
Rekapitulasi Fatigue Life

| Item | Fatigue Life | |
|---------------------|-------------------|---------------------------|
| | Fatigue Life (th) | Lokasi |
| Pembujur Sisi | 26.6 | Pembujur 4 Starboard Side |
| Pembujur Alas Dalam | 42.5 | Pembujur 1 Starboard Side |
| Pembujur Alas | 30.4 | Pembujur 1 Starboard Side |

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Untuk sambungan pembujur sisi, tegangan terbesar terjadi pada kondisi 0.85h_{filling} dengan besar 56.3 MPa.

2. Untuk sambungan pembujur alas dalam, tegangan terbesar terjadi pada kondisi 0.7h_{filling} dengan besar 53.4 MPa.
3. Untuk sambungan pembujur alas, tegangan terbesar terjadi pada kondisi 0.85h_{filling} dengan besar 59.1 MPa.
4. Nilai *fatigue life* terkecil untuk tiap sambungan adalah sebagai berikut :
 - a. Pembujur sisi sebesar 26.6 tahun.
 - b. Pembujur alas dalam sebesar 42.5 tahun.
 - c. Pembujur alas sebesar 30.4 tahun.
5. Umur kelelahan struktur konstruksi masih memenuhi persyaratan CSR sebesar 25 tahun.

B. Saran

1. Mengaplikasikan beban global, seperti *wave bending moment* baik horizontal maupun vertikal.
2. Memperhitungkan frekuensi *sloshing* muatan agar mendapatkan besar beban yang akurat untuk diaplikasikan pada model.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. E. A. (IEA), "Executive summary," 2018.
 [2] K. . Owen, F.H., & Jeom, *Ship structural analysis and design*. New Jersey: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
 [3] I. A. of C. S. (IACS), "Common structural rules for double hull oil tanker," 2014.
 [4] D. Logan, "A first course in the finite element method," University of Wisconsin, 2007.
 [5] W. Weibull, *Fatigue testing and analysis of results*. Oxford: Pergamon Press, 1961.