

Analisis *Fatigue Life* pada *Bracket Oil Tanker* dengan Beban *Sloshing*

Muhamad Gifari Rusdi, M. Nurul Misbah, dan Totok Yulianto

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

e-mail: mnmisbah@na.its.ac.id

Abstrak—Umur kelelahan (*fatigue life*) dari struktur kapal tanker dapat dianalisis dengan menggunakan pendekatan-pendekatan standar pada *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker*. Analisis dilakukan dengan metode elemen hingga yang difokuskan pada konstruksi *bracket* kapal tanker 17500 LTDW. Konstruksi *bracket* merupakan salah satu penopang yang esensial pada kapal sehingga perlu diketahui letak *bracket* dengan tegangan paling besar untuk dihitung nilai umur kelelahannya. Kapal ini dimodelkan dengan menggunakan *finite element software*. Bagian yang dimodelkan adalah tiga ruang muat di *midship*. *Fatigue life* yang dianalisa merupakan pengaruh dari beban *sloshing* muatan tangki (beban internal). Kondisi pembebanan dilakukan pada 4 macam tinggi pengisian muatan yaitu ketinggian 0.3h, 0.6h, 0.7h, dan 0.95h, dan masing-masing kondisi mempunyai variasi dari *roll angle motion* yang dihitung sesuai persamaan-persamaan dalam *CSR*. Tegangan pada *bracket* diambil dari salah satu *web frame* yang mempunyai tegangan terbesar di setiap kondisi pembebanannya untuk dianalisa *fatigue life*nya. Hasil menunjukkan bahwa *bracket* dengan tegangan paling besar terjadi pada sambungan *bracket* pada *web frame* nomor 4 pada ruang muat belakang. Umur kelelahan pada masing-masing kondisi adalah 450 tahun pada Kondisi 1 (0.3h), 84 tahun pada Kondisi 2 (0.6h), 76 tahun pada Kondisi 3 (0.7h), dan 137 tahun pada Kondisi 4 (0.95h). Umur kelelahan paling rendah terdapat pada kondisi pembebanan 3 dengan tinggi muatan 0.7h yaitu sebesar 76 tahun.

Kata Kunci—*CSR*, *bracket*, analisa tegangan, *fatigue life*.

I. PENDAHULUAN

TEKNOLOGI eksplorasi dan eksploitasi minyak semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan minyak yang berdampak pada semakin pesatnya pencarian sumber minyak di laut dalam. Oleh karena itu dibutuhkan kapal – kapal pengangkut minyak baik mentah maupun produk dari *drilling site* atau *extraction point* ke tempat penyulingan atau daratan. Salah satunya, yakni dengan menggunakan *oil tanker*.

Agar dapat bertahan selama masa operasinya, suatu struktur konstruksi didesain untuk mampu bertahan dari berbagai beban kerja yang dialaminya. Secara prinsip, selama beban kerja yang dialami tidak melewati batas maksimum yang ditentukan maka kegagalan struktur tidak akan terjadi. Namun apabila beban tersebut diberikan berulang-ulang secara terus-menerus, walaupun beban yang diberikan berada di bawah batas maksimum desain, maka perhatian khusus perlu diberikan.

Untuk menghindari kegagalan akibat kelelahan selama masa pengoperasian suatu struktur maka perlu dilakukan

analisa kelelahan (*fatigue*). Pada studi ini, fokus analisis dilakukan pada konstruksi *bracket* karena *bracket* dianggap sebagai salah satu penopang yang esensial. Oleh karena itu, perlu diketahui letak *bracket* dengan tegangan paling besar dan besar *fatigue life*nya. Nilai tegangan akan diperoleh berdasarkan analisa tegangan yang dilakukan dengan metode numerik elemen hingga.

Regulasi yang akan dipakai sebagai acuan adalah *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker (2014)*. Pada *CSR* dijabarkan cukup jelas dan lengkap mengenai aturan-aturan tentang perhitungan *fatigue*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Analisis Kelelahan

Kelelahan (*fatigue*) sangat mempengaruhi retak (*crack*) yang terjadi pada struktur detail sambungan [1]. Kelelahan (*fatigue*) telah menjadi hal yang dipertimbangkan dalam kekuatan kapal yang sudah beroperasi lama maupun kapal yang baru beroperasi. Dalam penelitian sebelumnya, Kurnianto [2] telah melakukan penelitian tentang perkiraan umur konstruksi FPSO konversi dari tanker dengan analisis *fatigue* dengan dua metode yaitu *deterministic* dan *simplified*. Hasil menunjukkan bahwa metode *simplified* lebih akurat. Metode *simplified* adalah metode perhitungan *fatigue* dengan mempertimbangkan probabilitas dari kejadian gelombang yang terdistribusi secara acak, dengan adanya faktor *Weibull Shape Parameter*. Faktor *weibull* digunakan dalam perhitungan *fatigue* menurut *CSR*.

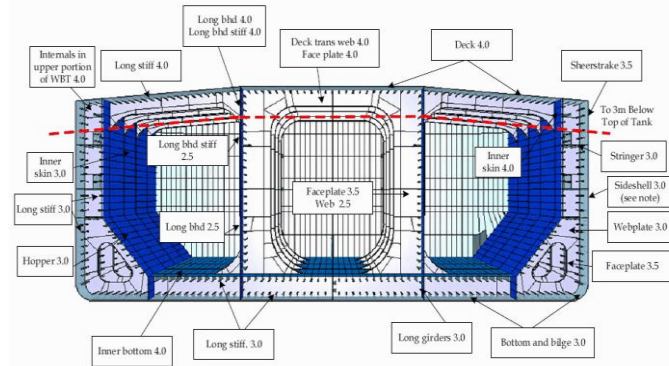
Septiana [3] telah melakukan perhitungan perkiraan *fatigue life* dari *bracket* kapal tanker berdasarkan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker*. Kapal tersebut merupakan kapal tanker *single hull* yang dihitung umur kelelahan *bracket*nya menggunakan beban statis dan dinamis akibat muatan tangki dan gelombang. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan beban yang berbeda yaitu beban *sloshing* tangki dengan persamaan pendekatan berdasarkan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker (2014)*.

Anwar [4] telah melakukan analisa *sloshing* pada tangki LNG akibat pengaruh gerakan *heaving* dan *pitching* kapal pada gelombang reguler. Analisa dilakukan dengan menggunakan frekuensi *sloshing* yang sama dengan frekuensi gerakan kapal pada kondisi *heaving* dan *pitching* secara bersamaan (*coupled*). Sehingga dapat ditentukan lokasi tekanan terbesar yang terjadi dalam dinding tangki membran

kapal LNG pada ketinggian cairan 30%, 50%, dan 80% tinggi tangki. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan asumsi frekuensi *sloshing* adalah sama dengan frekuensi gerakan kapal tanpa melibatkan beban dinamis gelombang.

B. Faktor Korosi

Tebal pelat yang ada pada struktur harus ditambahkan faktor korosi. Penambahan faktor korosi berbeda pada tiap-tiap bagian karena beban yang diterima berbeda. Perhitungan menggunakan tebal aktual ditambahkan $-0.5t_{corr}$.



Gambar 1. Corrosion Addition (CSR, 2014)

C. Pembebanan

Menurut CSR [5], beban dibagi menjadi 4 macam, yaitu beban statis, beban dinamis, beban *sloshing*, dan beban *impact*. Namun dalam penelitian ini hanya menggunakan beban *sloshing* muatan dengan variasi tinggi muatan dan pengaruh akibat gerak *rolling* kapal tanpa melibatkan beban dinamis gelombang air laut.

1) *Beban Sloshing*

$$P_{slh-t} = 7 \rho g f_{slh} \left(\frac{b_{slh}}{B} - 0.3 \right) GM^{0.75} \quad \text{kN/m}^2 \quad (1)$$

P_{slh-t} adalah beban *sloshing* tangki dalam kN/m^2

2) *Roll Motion*

$$U_{roll} = \frac{2.30 r_{roll-yr}}{\sqrt{GM}} \quad \text{secs} \quad (2)$$

U_{roll} adalah *natural roll period* dalam detik (*secs*)

$$\theta = \frac{50}{B + 75} (1.25 - 0.025 U_{roll}) f_{bk} \quad \text{rads} \quad (3)$$

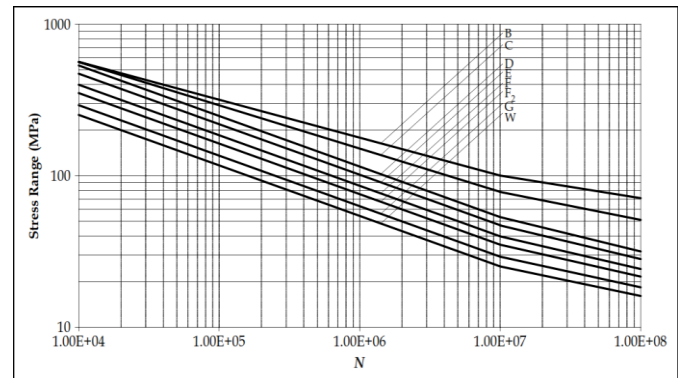
θ adalah sudut dari *natural roll period* dengan satuan radian (*rad*).

Beban *sloshing* akibat gerakan muatan searah melintang merupakan nilai yang konstan untuk tiap tinggi pengisian muatan dimulai dari 0.05 hmax sampai 0.95 hmax dengan kenaikan setiap 0.05 hmax. Dalam studi ini variasi kondisi tinggi pengisian muatan yang digunakan dibagi menjadi 4 kondisi pembebanan yaitu, 0.3h, 0.6h, 0.7h, dan 0.95h. Sedangkan untuk sudut *roll* θ (*roll angle*) dari *natural roll period* kapal yang digunakan adalah 30° .

D. Kurva S-N

Hubungan antara rentang tegangan dan jumlah kejadian (*cycle*) untuk mengalami kegagalan struktur adalah fungsi dari tipe sambungan, lingkungan, dan ketebalan pelat. Untuk analisis kelelahan berdasarkan pendekatan tegangan nominal, sambungan las dibagi menjadi beberapa klas. Tiap klas memiliki desain kurva S-N yang berbeda. Pada struktur sambungan las, S-N diagram merupakan cara paling umum yang digunakan dalam menentukan kapasitas kelelahan. S-N diagram menunjukkan hubungan antara rentang tegangan (*S*) dari tegangan nominal terhadap jumlah siklus yang dialami untuk mencapai kegagalannya (*N*). Jumlah siklus kegagalan diperoleh berdasarkan pengujian beban amplitudo konstan terhadap material yang diujikan hingga terjadi kegagalan [6].

Kekuatan sambungan las dengan kekuatan kelelahan dicirikan dengan kurva S-N yang memberikan hubungan rentang tegangan yang terjadi pada suatu detil struktur dan jumlah siklus beban amplitudo konstan untuk kegagalan.



Gambar 1. Kurva S-N Sambungan Las

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. *Pengumpulan Data*

Pengumpulan data bertujuan untuk memperoleh data primer dan/atau data sekunder yang berkaitan dengan kasus yang akan dikaji dalam studi ini. Kapal yang digunakan sebagai kajian dalam studi ini adalah kapal Tanker *Double Hull* 17.500 LTDW. Data ukuran utama kapal tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran Utama Kapal Tanker 17500 LTDW

Description	Quantity
Displacement (Δ)	17500 Ton
Length Overall (L_{OA})	157.50 m
Length Perpendicular (L_{PP})	149.50 m
Breadth Moulded (B)	27.70 m
Depth (D)	12.00 m
Draft (T)	7.00 m
Service Speed (V_S)	13.0 Knots

B. *Pemodelan*

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan pada 3 ruang muat di daerah midship dengan menggunakan *finite element software*. Setelah dibuat 3 ruang muat, material properties

dimasukkan pada model (tebal pelat, ukuran profil, modulus elastisitas, jenis baja). Kemudian dilakukan pembuatan model yang meliputi:

- 1) *Keypoint*
- 2) *Line*
- 3) *Area*
- 4) *Meshing*
- 5) *Kondisi batas*

Setelah model selesai, kemudian dilakukan perhitungan tegangan akibat beban yang diinputkan pada model.

C. Perhitungan Kelelahan

Perhitungan *fatigue* dari struktur kapal tanker ini berdasarkan penerapan aturan *Palmgren-Miner Cumulative Damage* dimana ketika *fatigue damage ratio*, DM memiliki nilai lebih dari 1 maka dapat dipastikan bahwa struktur tersebut tidak diterima atau mengalami kegagalan. Perhitungan *cumulative fatigue damage* dilakukan untuk mengetahui besar akumulasi kerusakan kelelahan akibat masing-masing kondisi pembebanan.

Dihitung DM_i untuk tiap kondisi pembebanan baik tanpa *rolling* maupun dengan *rolling*. Setelah itu menjumlahkan keseluruhan *cumulative fatigue damage* DM yang timbul. Kemudian umur kelelahan dari suatu struktur sambungan lasan pada *bracket* dapat dihitung nilainya.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Pembebanan 1

Kondisi Pembebanan 1 adalah input beban pada model dengan tinggi pengisian muatan 0.3h serta variasi sudut *roll* 30° kiri dan kanan. Hasil tegangan kondisi pembebanan 1 ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2.

Hasil Tegangan Kondisi Pembebanan 1

Kondisi muatan	Sambungan	Frame	σ MAX (N/mm ²)
tanpa <i>roll angle</i>	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	35.1
<i>roll angle</i> θ 30° kiri	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	33.7
<i>roll angle</i> θ 30° kanan	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	33.3

B. Kondisi Pembebanan 2

Kondisi Pembebanan 2 adalah input beban pada model dengan tinggi pengisian muatan 0.6h serta variasi sudut *roll* 30° kiri dan kanan. Hasil tegangan kondisi pembebanan 2 ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3.

Hasil Tegangan Kondisi Pembebanan 2

Kondisi muatan	Sambungan	Frame	σ MAX (N/mm ²)
tanpa <i>roll angle</i>	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	50
<i>roll angle</i> θ 30° kiri	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	49.8
<i>roll angle</i> θ 30° kanan	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	50.5

C. Kondisi Pembebanan 3

Kondisi Pembebanan 3 adalah input beban pada model dengan tinggi pengisian muatan 0.7h serta variasi sudut *roll* 30° kiri dan kanan. Hasil tegangan kondisi pembebanan 3 ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4.

Hasil Tegangan Kondisi Pembebanan 3

Kondisi muatan	Sambungan	Frame	σ MAX (N/mm ²)
tanpa <i>roll angle</i>	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	50.8
<i>roll angle</i> θ 30° kiri	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	51.4
<i>roll angle</i> θ 30° kanan	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	52

D. Kondisi Pembebanan 4

Kondisi Pembebanan 4 adalah input beban pada model dengan tinggi pengisian muatan 0.95h serta variasi sudut *roll* 30° kiri dan kanan. Hasil tegangan kondisi pembebanan 4 ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5.

Hasil Tegangan Kondisi Pembebanan 4

Kondisi muatan	Sambungan	Frame	σ MAX (N/mm ²)
tanpa <i>roll angle</i>	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	44.3
<i>roll angle</i> θ 30° kiri	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	45.2
<i>roll angle</i> θ 30° kanan	<i>bracket</i> dengan <i>web frame</i>	4	44.4

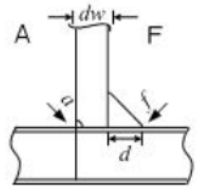
E. Faktor Konsentrasi Tegangan

Faktor konsentrasi tegangan terjadi pada detil struktur akibat adanya diskontinuitas seperti lubang atau retakan. Semua faktor konsentrasi tegangan yang berpengaruh pada kondisi sambungan harus diperhatikan dan dimasukkan ke dalam perhitungan. Faktor-faktor konsentrasi tegangan seperti K_{gl} , K_{gh} , K_{df} , serta K_{dA} harus diperhitungkan untuk menentukan nilai faktor konsentrasi tegangan total K.

Untuk mendapatkan rentang tegangan yang digunakan dalam menghitung *cumulative fatigue damage*, maka tegangan maksimum pada sambungan pada semua kondisi pembebanan harus dikalikan dengan faktor konsentrasi tegangan K sesuai dengan Tabel 6. sehingga akan didapatkan rentang tegangan S_{Ri} .

Tabel 6.

Faktor Konsentrasi Tegangan

Tipe Sambungan	Class	SCF			
		K_{gl}	K_{gh}	K_{df}	K
	F2	1.05	1.05	1.1	1.21275

F. Kurva S-N

Berdasarkan kurva S-N yang terdapat dalam *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker*, nilai K_2 bergantung pada *class* sambungan struktur yang digunakan. Perhitungan menggunakan pendekatan kurva S-N dilakukan untuk mendapatkan nilai K_2 yang digunakan sebagai input untuk menghitung nilai *cumulative fatigue damage* DM_i . Nilai K_2 berdasarkan kurva S-N pada *CSR* ditunjukkan seperti pada Tabel 7.

Tabel 7.
Data Class Sambungan Kurva S-N pada CSR

Class	m	K_2	S_q
B	4	1.01E+15	100.2
C	3.5	4.23E+13	78.2
D	3	1.50E+12	53.2
E	3	1.04E+12	47.0
F	3	6.30E+11	39.8
F2	3	4.30E+11	35.0
G	3	2.50E+11	29.2
W	3	1.60E+11	25.2

Sambungan yang dianalisis dalam penelitian ini termasuk kedalam *class* F2, maka nilai K_2 yang digunakan adalah 4.3×10^{11}

G. Cumulative Fatigue Damage

Setelah melakukan analisis tegangan dan kemudian mengalikan tegangan maksimum dengan faktor konsentrasi tegangan K, maka selanjutnya dilakukan perhitungan akumulasi kerusakan akibat kelelahan (*cumulative fatigue damage*). Tegangan yang digunakan adalah nilai tegangan maksimum pada tiap kondisi pembebanan karena pada nilai tegangan yang paling tinggi sangat rawan terjadinya retak awal yang dapat berakibat pada retak menjalar.

$$DM_i = \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \tag{4}$$

Dimana:

- N_L = jumlah *cycle* pada umumnya memiliki nilai 0.6×10^8 dan 0.8×10^8 *cycles* untuk *design life* 25 tahun
- $f_0 = 0.85$, faktor yang diambil dari perhitungan *non sailing time for operations* seperti saat *loading* dan *unloading*, perbaikan, dan lain-lain
- $U = 0.788 \times 10^9$, *design life* dalam detik untuk *design life* 25 tahun
- L = panjang konstruksi dalam meter
- m = parameter kurva S-N
- K_2 = parameter kurva S-N
- $\alpha_1 = 0.5$ untuk kondisi *full load*
- $\alpha_2 = 0.5$ untuk kondisi *normal ballast*
- S_{Ri} = *stress range* pada probabilitas *level of* 10^{-4} dalam N/mm^2
- $N_R = 10000$, jumlah *cycle* berdasarkan *level of* 10^{-4}
- ξ = *weibull probability distribution parameter*

Γ = *gamma function*

μ_i = koefisien diambil dari kurva S-N

$$\mu_i = 1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)} \tag{5}$$

$$v_i = \left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^\xi \ln N_R \tag{6}$$

S_q = nilai tegangan pada *intersection* kurva S-N dalam N/mm^2

$\Delta m = 2$, *slope* dari kurva S-N

$\gamma(a, x)$ = *incomplete gamma function*

Tabel 8.

Cumulative Fatigue Damage		
Kondisi Pembebanan	Sambungan	DM_i
Kondisi 1	Bracket dengan <i>webframe</i>	0.055500961
Kondisi 2	Bracket dengan <i>webframe</i>	0.296959750
Kondisi 3	Bracket dengan <i>webframe</i>	0.329873761
Kondisi 4	Bracket dengan <i>webframe</i>	0.183145353

H. Umur Kelelahan (Fatigue Life)

$$Fatigue\ life = \frac{Design\ life}{DM} \text{ years} \tag{7}$$

Umur kelelahan yang didapat harus mendekati atau melebihi besar dari *design life* kapal. Berdasarkan *CSR*, kriteria *design life* untuk konstruksi kapal adalah 25 tahun. Dengan menggunakan persamaan tersebut maka akan didapat umur kelelahan dari setiap sambungan struktur untuk tiap kondisi pembebanannya.

Tabel 9.
Fatigue Life Struktur

Kondisi Pembebanan	DM_i	Fatigue Life (Tahun)
Kondisi 1	0.035969106	450
Kondisi 2	0.199522899	84
Kondisi 3	0.222369543	76
Kondisi 4	0.121330148	137

Dari perhitungan umur kelelahan pada Tabel 9. diatas dapat diketahui bahwa umur konstruksi *bracket* yang terendah terdapat pada kondisi 3 dengan umur kelelahan sebesar 76 tahun. Namun, umur kelelahan tersebut masih memenuhi kriteria yang disyaratkan oleh *CSR* yaitu lebih dari 25 tahun.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah dilakukan percobaan dan penelitian dari ketiga kondisi pembebanan model maka kesimpulan dari Studi ini adalah sebagai berikut:

1. Lokasi tegangan yang paling tinggi rata-rata terjadi pada sambungan *bracket* di *webframe* nomor 4;
2. Nilai umur kelelahan (*fatigue life*) pada *bracket* untuk masing-masing kondisi pembebanan, yaitu:
 - a) Pada kondisi tinggi pengisian muatan 0.3h umur kelelahannya adalah 450 tahun
 - b) Pada kondisi tinggi pengisian muatan 0.6h umur kelelahannya adalah 84 tahun
 - c) Pada kondisi tinggi pengisian muatan 0.7h umur kelelahannya adalah 76 tahun
 - d) Pada kondisi tinggi pengisian muatan 0.95h umur kelelahannya adalah 137 tahun
3. Umur kelelahan dapat mencapai 450 tahun dikarenakan asumsi frekuensi yang digunakan adalah frekuensi gerakan kapal tanpa adanya frekuensi *sloshing* dalam tangki dan tekanan hidrostatik gelombang;
4. *Fatigue life* struktur yang dianalisa memenuhi persyaratan *CSR* yaitu lebih dari 25 tahun.

Beberapa hal yang dapat disajikan sebagai saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini digunakan pembebanan lokal statis muatan. Namun pada kondisi sebenarnya terjadi berbagai macam pembebanan yang dialami struktur

konstruksi kapal. Untuk mendapatkan hasil yang lebih valid dan akurat maka penelitian ini dapat dikembangkan dengan menambah pembebanan dinamis.

2. Perlu dilakukan pemeriksaan UT (*ultrasonic*) berkala untuk mengetahui laju pengurangan pelat pertahun sehingga tebal pelat kapal yang digunakan sebagai input adalah tebal pelat kapal terbaru.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terkait dengan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] & J. M. C. G.E. Horn, Y.K. Chen, *Safehull Fatigue Assessment of Ship Structural Details*. New York: American Bureau of Shipping, 1999.
- [2] P. Kurnianto, "Perkiraan Umur Konstruksi FPSO Konversi dari Tanker dengan Analisis Fatigue," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2012.
- [3] D. Septiana, "Perkiraan Fatigue Life pada Bracket Kapal Tanker Berdasarkan Common Structural Rules," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2012.
- [4] M. A. Syaiful, "Simulasi Sloshing pada Dinding Tanki Tipe Membran Kapal LNG Akibat Gerakan Heaving dan Pitching di Gelombang Reguler," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2013.
- [5] IACS, *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers*. Italy: RINA, 2014.
- [6] K. P. Owen, F. H., & Jeom, *Ship Structural Analysis and Design*. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineer, 2010.