

ANALISIS *FATIGUE* PADA PIPA BAWAH LAUT MENGGUNAKAN PEMBEBANAN DALAM DOMAIN WAKTU

Lukman Ramadhan

Program Studi Sarja Teknik Kelautan, FTSL, ITB

Lr.lukmanramadhan@gmail.com

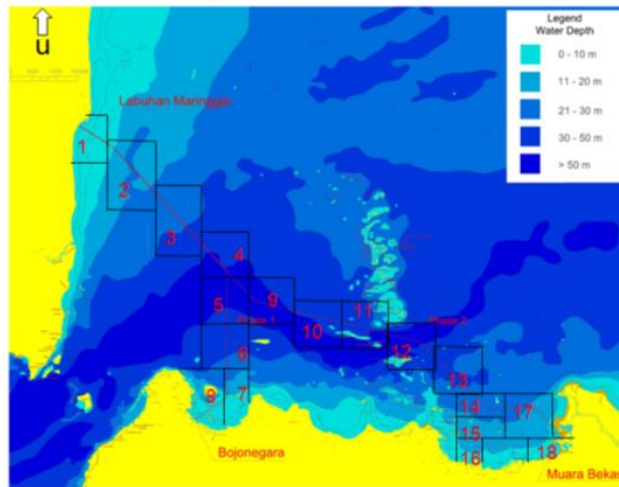
Kata Kunci : *fatigue, free span, oscillation, damage, deterministic*

ABSTRAK

Dalam transportasi gas di lautan, fasilitas-fasilitas penunjang yang dibutuhkan pun berbeda, salah satunya adalah *subsea pipeline* (pipa bawah laut). Selama proses transpor gas berlangsung, *subsea pipeline* terpengaruh oleh berbagai fenomena lingkungan bawah laut. Daerah *free span* pada pipa bawah laut yang terkena beban hidrodinamis yang bersifat siklik suatu ketika akan mengalami kelelahan, fenomena ini akan mengakibatkan kegagalan *fatigue*. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk menghitung umur *fatigue* pada pipa *free span* pada zona 11 jalur pipa *South Sumatera – West Java* dengan data pembebanan dalam domain waktu dimana analisa umur *fatigue* yang dilakukan menggunakan metode *simplified* dan *general deterministic fatigue analysis*. Dalam pengerjaannya, dihitung tegangan yang diakibatkan beban lingkungan berupa gelombang dan arus. Selanjutnya dihitung damage *fatigue* akibat tegangan yang dihasilkan oleh beban siklik tersebut. Proses analisis ini memberikan hasil berupa umur *fatigue* pipa *free span* yang ditinjau. Kesimpulan yang didapat pada Tugas Akhir ini adalah umur *fatigue* pipa *free span* akibat pembebanan arus dan gelombang secara akumulatif pada arah *cross-flow* adalah 23 tahun dan 156,2 tahun pada arah *in-inline*

PENDAHULUAN

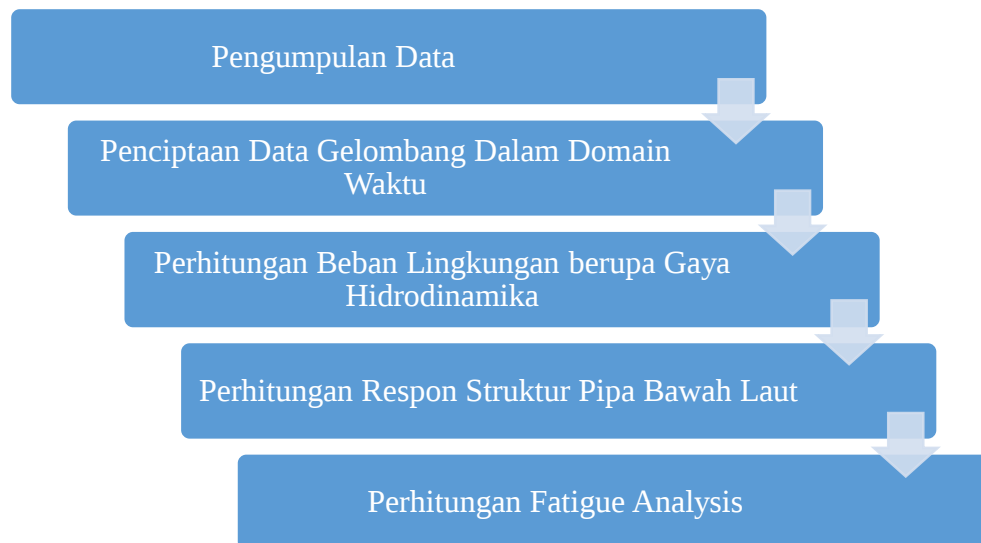
Selama proses transpor gas, pipa bawah laut terutama pada *free span* terpengaruh beban siklik yang akan mengakibatkan kegagalan *fatigue* setelah waktu tertentu. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk menghitung umur *fatigue* pipa *free span* di zona 11 pada jalur pipa bawah laut *South Sumatera- West Java* milik PGN dengan data pembebanan dalam domain waktu. Zonasi jalur pipa dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Zonasi Jalur Pipa Bawah Laut SSJ
Sumber: Dokumen PGN

TEORI DAN METODOLOGI

Langkah-langkah pengerjaan dalam Tugas Akhir ini dapat dilihat pada Gambar 2.



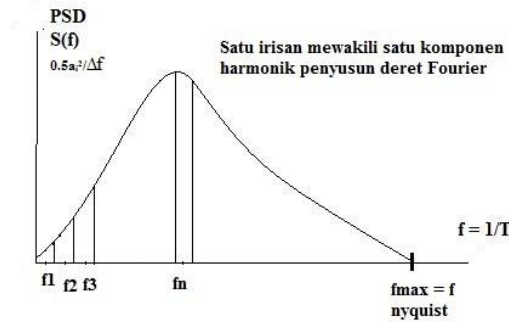
Gambar 2 Langkah Pengerjaan

Setelah data terkumpul, beban lingkungan berupa kecepatan arus yang dimiliki berupa seri waktu selama 10 tahun. Sedangkan data tinggi gelombang berupa tinggi (H) dan periode (T) signifikan. Karena dibutuhkan data gelombang dalam domain waktu maka dilakukan invers fourier transform dari spektrum

gelombang teoritis untuk H_s dan T_s yang dimiliki sehingga didapatkan seri waktu elevasi muka air laut. Spektrum gelombang teoritis yang digunakan adalah fully developed wind waves spectrum yang dinyatakan pada persamaan berikut.

$$S(f) = 0.257 H_s^2 T_s^{-4} f^{-5} \exp[-1.03(T_s f)^{-4}]$$

Definisi spektrum gelombang untuk proses invers fourier transform diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Definisi Spektrum Gelombang Teoritis

Setiap irisan pada spektrum gelombang merupakan komponen harmonik penyusun deret Fourier. Persamaan harmonik untuk komponen ke-n adalah sebagai berikut

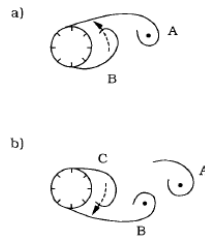
$$\eta = a_n \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} t + \phi_n\right)$$

Penjumlahan dari semua komponen merupakan seri waktu elevasi muka air. Persamaan seri waktu elevasi muka air dapat dilihat berikut ini.

$$\eta(t) = \sum a_n \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} t + \phi_n\right)$$

Setelah diketahui seri waktu beban lingkungan gelombang dan arus yang bekerja pada pipa, dapat dilakukan perhitungan gaya hidrodinamika yang bekerja pada pipa.

Untuk gaya arus pada pipa diakibatkan osilasi akibat *vortex*. Sebuah silinder pada aliran fluida steady akan terpengaruh fenomena *vortex shedding* untuk nilai-nilai $Re > 40$. Ketika nilai Re melebihi 40, pola aliran menjadi tidak stabil dan menyebabkan munculnya pelepasan *vortex* pada bagian atas dan bawah pipa seperti diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Ilustrasi Mekanisme *Vortex Shedding*

Sumber: Naess, Almar. *Fatigue Handbook Offshore Steel Structures*. TAPIR:1985

Gaya angkat positif akibat *vortex shedding* yang terjadi berhubungan dengan *vortex* pada bagian bawah pipa, sedangkan gaya angkat negatif berhubungan dengan *vortex* pada bagian atas pipa. Kedua *vortex* tersebut juga mengakibatkan gaya drag sementara.

Frekuensi *vortex shedding* ketika di normalkan dengan kecepatan aliran fluida dan diameter silinder, menjadi fungsi dari Reynolds number:

$$St = St(Re)$$

$$St = \frac{f_v D}{U}$$

Dimana:

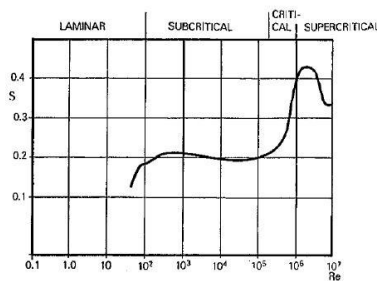
St = Strouhal number

f_v = frekuensi *vortex shedding*

D = diameter pipa

U = kecepatan aliran fluida

Gambar 5 memperlihatkan hubungan St dengan Re.



Gambar 5 Grafik St vs Re

Sumber :Det Norske Veritas. 1981. *Rules for Submarine Pipeline System*

Gaya angkat akibat *vortex shedding* berosilasi dengan frekuensi sebesar frekuensi *vortex shedding*, f_v , sedangkan gaya *drag* berosilasi dengan frekuensi dua kali lipat frekuensi *vortex shedding*.

Sifat dari perilaku osilasi yang terjadi sangat kompleks sehingga dibutuhkan model respons untuk menentukan respons yang dialami suatu struktur tertentu.

Untuk gaya akibat gelombang pada arah *in-line* dapat menggunakan persamaan Morison sebagai berikut.

$$f = C_M \rho V \frac{du}{dt} + \frac{C_D}{2} \rho A_p u |u|$$

Dimana:

C_D = koefisien seret

$$C_D = C_{D,0} \left(\frac{k}{D} \right) * \Psi_{KC,\alpha} * \Psi_{prox} * \Psi_{trench} * \Psi_{viv}$$

C_M = koefisien inersia

$$C_M = C_{M,0} \Psi_k \Psi_{prox} \Psi_{trench}$$

ρ = massa jenis fluida

A_p = luas proyeksi struktur

u = kecepatan partikel fluida

V = volume struktur tercelup

$\frac{du}{dt}$ = percepatan partikel fluida

Gaya gelombang juga mengakibatkan gaya *cross-flow* pada silinder. Gaya angkat tersebut mulai muncul ketika parameter Keulegan-Carpenter (KC) number mencapai nilai sebesar 6. KC dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$KC = \frac{u_m T}{D}$$

dimana:

KC = Keulegan-Carpenter number

u_m = kecepatan aliran maksimum fluida

D = diameter silinder

T = periode aliran

Besar gaya yang terjadi dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$F_L = \frac{C_L}{2} \rho A_p u^2$$

Dimana:

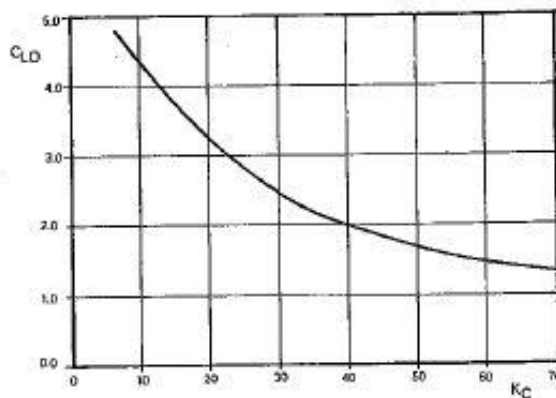
F_L = gaya angkat

C_L = koefisien angkat

ρ = massa jenis fluida

A_p = luas proyeksi struktur

u = kecepatan partikel fluida arah horizontal



Gambar 6 Grafik C_L vs K_C

Sumber: Det Norske Veritas. 1981. *Rules for Submarine Pipeline System*

Pada arah *in-line* gaya gelombang yang merupakan beban siklik akan mengakibatkan pipa bergetar dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi gelombang. Sedangkan untuk arah *cross-flow* lift frequency N_L meningkat seiring dengan bertambahnya K_C . Nilai N_L untuk berbagai rentang K_C tertentu dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Hasil Observasi dari Percobaan Williamson (1985)

KC regime	KC range	Reynolds number Re	Normalized fundamental lift frequency (= the number of oscillations in the lift per flow cycle) $N_L = \frac{f_L}{f_\infty}$
Single pair	$7 < KC < 15$	$1.8 - 3.8 \times 10^3$	2
Double pair	$15 < KC < 24$	$3.8 - 6.1 \times 10^3$	3
Three pairs	$24 < KC < 32$	$6.1 - 8.2 \times 10^3$	4
Four pairs	$32 < KC < 40$	$8.2 - 10 \times 10^3$	5

Sumber : Chakrabarti, S.K. 1987. Hydrodynamics of Offshore Structures. Great Britain: Henry Ling Ltd.

Dalam perhitungan umur *fatigue*, pipa *free span* dapat ditinjau sebagai balok diantara dua tumpuan pada umumnya. Setelah mendapatkan besar beban yang diterima oleh pipa akibat gaya gelombang, dapat dilakukan analisis statika sederhana untuk mencari gaya dalam maksimal pada pipa. Untuk mendapatkan pengaruh dinamik akibat beban gelombang, perpindahan statik perlu dikalikan terlebih dahulu dengan dynamic amplification factor (Ds) untuk mendapatkan perpindahan dinamik.

$$D_s = \frac{X}{X_{static}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$$

Dimana:

$$r = \frac{\Omega}{\omega}$$

$$\xi = \text{damping ratio} = 0.02$$

Sedangkan untuk beban lingkungan akibat arus, Osilasi resonan dengan amplitudo yang besar dapat terjadi ketika frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi natural struktur. Hal ini dinyatakan oleh *reduced velocity*

$$V_R = \frac{u}{f_N D}$$

Dimana:

u = kecepatan aliran fluida

f_N = frekuensi natural pipa

D = diameter pipa

Sifat dari perilaku osilasi yang terjadi sangat kompleks sehingga dibutuhkan model respons untuk menentukan respons yang dialami suatu struktur tertentu. *Vortex induced oscillation* terjadi pada rentang nilai V_R tertentu dan amplitudo osilasinya merupakan fungsi dari parameter kestabilan K_s :

$$K_s = \frac{2m\delta}{\rho D^2}$$

Dimana:

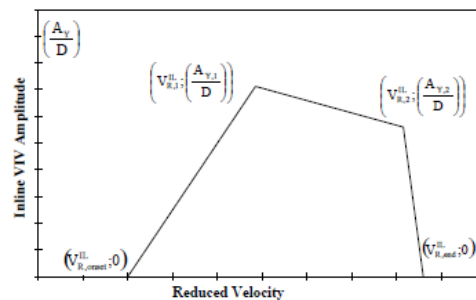
m = massa per unit panjang

δ = logarithmic decrement of structural damping

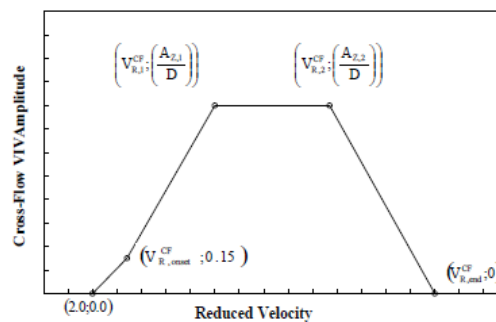
ρ = fluid density

D = diameter pipa

Hubungan antara K_s dengan amplitudo osilasi maksimum dapat di konstruksi dengan prinsip model respons pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7 Grafik *Inline Response Amplitude vs Vr*



Gambar 8 Grafik *Crossflow Response Amplitude vs Vr*

Sumber: Det Norske Veritas. 2006. *Recommended Practice RP-F105 Free spanning Pipelines*

Setelah mendapatkan gaya dalam berupa momen lentur maksimum untuk beban gelombang dan berupa amplitudo repons untuk beban arus, selanjutnya dilakukan perhitungan tegangan akibat momen lendutan.

$$M = \frac{12EI\Delta}{L^2}$$

Dimana:

M = gaya dalam momen pada pipa

E = modulus young pipa

I = inersia pipa

Δ = amplitudo respons

L = panjang bentang pipa

$$S_L = \frac{M_b c}{I}$$

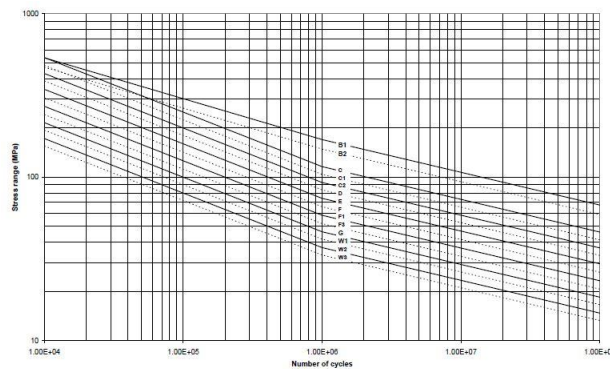
Dimana:

S_L = tegangan longitudinal

M_b = momen lendutan pada pipa

c = jarak dari sumbu netral ke titik yang diperhatikan

Selanjutnya setelah mendapatkan tegangan yang terjadi pada pipa, analisa *fatigue* dilakukan dengan menentukan jumlah siklus yang dibutuhkan untuk mengakibatkan kegagalan *fatigue* pada range tegangan tertentu (N). Hubungan antara stress range dengan N yang dikenal sebagai kurva SN dapat dilihat pada Gambar 9 yang merupakan hasil dari eksperimen.



Gambar 9 Grafik Kurva SN

Sumber: Det Norske Veritas.2010. *Recommended Practice RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures*

Setelah mendapatkan nilai N, selanjutnya dicari damage *fatigue* yang disebabkan. Metode untuk menghitung damage akibat gelombang acak dikenal dengan metode Miner's Rule. Miner's Rule dinyatakan dalam persamaan berikut

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots$$

Dimana:

D = *fatigue damage*

n_i = jumlah siklus pada stress range ke-i

N_i = jumlah siklus pada stress range ke-i yang dibutuhkan untuk mencapai kegagalan

Selanjutnya umur *fatigue* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$T_{life} = \frac{T_{exposure}}{Damage}$$

HASIL DAN ANALISA

Analisis *fatigue* yang dilakukan untuk pipa *free span* dengan panjang *free span* 90m dan tinggi 0.5m di zona 11 jalur pipa SSWJ menghasilkan umur *fatigue* akibat beban gelombang dan arus arah *in-line* dan *cross-flow*. Umur *fatigue* yang didapatkan berdasarkan *general deterministic analysis* dimana beban adalah acak sepanjang T_{exposure} dan *simplified deterministic analysis* dimana beban adalah seragam sepanjang T_{exposure}.

Dengan menggunakan langkah-langkah pengerjaan seperti yang sudah dibahas, didapatkan hasil perhitungan yang diringkaskan sebagai berikut.

Tabel 2 Ringkasan Hasil Perhitungan Umur *Fatigue* Akibat Gelombang

Hasil Deterministic Fatigue Analysis Zona 11 Jalur Pipa SSWJ			
NO.	Metode Analisis	Fatigue Life (years)	
		In Line	Cross Flow
1	Simplified Deterministic Fatigue Analysis	796.9	-
2	General Deterministic Fatigue Analysis	165.124493	-

Tabel 3 Ringkasan Hasil Perhitungan Umur *Fatigue* Akibat Arus

Hasil Deterministic Fatigue Analysis Zona 11 Jalur Pipa SSWJ			
NO	Metode Analisis	Fatigue Life (years)	
		In Line	Cross Flow
1.00	Simplified Fatigue Analysis	467.90	172.50
2.00	General Deterministic Fatigue Analysis	2892.63	22.96

Tabel 4 Ringkasan Umur *Fatigue* Akibat Penjumlahan *Damage* Arus dan Gelombang

Hasil Perhitungan Analisis Fatigue Akibat Gelombang dan Arus			
No.	Metode Analisis	Fatigue Life (years)	
1	Simplified Fatigue Analysis	294.90	172.50
2	General Deterministic Fatigue Analysis	156.21	22.96

Dari hasil perhitungan umur *fatigue* dapat diambil analisis bahwa :

1. Kedekatan antara frekuensi beban lingkungan yang bekerja dan frekuensi natural struktur berpengaruh besar terhadap perhitungan umur *fatigue*
2. Semakin dekat frekuensi beban lingkungan dengan frekuensi natural pipa, semakin besar *fatigue damage* yang ditimbulkan.
3. Semakin besar beban lingkungan yang bekerja, semakin besar *fatigue damage* yang ditimbulkan.
4. Dari hasil perhitungan umur *fatigue* akibat beban gelombang, *general deterministic fatigue analysis* memberikan hasil umur *fatigue* yang lebih pendek. Hal ini dikarenakan adanya beban-beban gelombang yang mengakibatkan *damage* yang lebih besar daripada gelombang signifikan masuk dalam perhitungan. Walaupun, probabilitas kejadian gelombang-gelombang tersebut lebih kecil, namun *damage* yang dihasilkan tetap signifikan.

5. Dalam kasus perhitungan tugas akhir ini, beban akibat gelombang tidak menyebabkan *fatigue damage* arah *cross-flow*. Hal ini disebabkan nilai KC yang kecil (kurang dari 5) sehingga tidak terjadi gaya arah vertikal.
6. Dari hasil perhitungan umur *fatigue* akibat beban arus, *general deterministic fatigue analysis* memberikan hasil umur *fatigue* yang lebih pendek pada arah *cross-flow*. Pada arah *in-inline*, frekuensi kecepatan arus signifikan mendekati frekuensi natural pipa yang diekspresikan dengan nilai V_r signifikan mendekati nilai V_r yang menyebabkan amplitudo respons maksimum.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil analisa *fatigue* pada pipa *free span* di zona 11 jalur pipa South Sumatera - West Java milik PGN, maka dapat diambil kesimpulan-kesimpulan :

1. Pada analisis *fatigue* akibat pembebanan gelombang, hasil umur *fatigue* yang dipakai adalah yang didapatkan dari metode *deterministic fatigue analysis*.
2. Pada analisis *fatigue* akibat pembebanan arus, hasil umur *fatigue* yang dipakai adalah yang didapatkan dari metode *deterministic fatigue analysis*.
3. Umur *fatigue* pipa *free span* akibat pembebanan gelombang pada arah *in-line* adalah 165.124 tahun. dan tidak mengalami *fatigue damage* pada arah *cross-flow*.
4. Umur *fatigue* pipa *free span* akibat pembebanan arus pada arah *cross-flow* adalah 23 tahun dan 2890 tahun pada arah *in-inline*
5. Umur *fatigue* pipa *free span* akibat pembebanan arus dan gelombang secara akumulatif pada arah *cross-flow* adalah 23 tahun dan 156,2 tahun pada arah *in-inline*
6. Pada kedalaman 30m, untuk arah *in-line* beban gelombang menyebabkan *damage fatigue* yang lebih besar daripada beban arus. Sedangkan pada arah *cross-flow*, *fatigue damage* hanya disebabkan arus.

Untuk pengembangan lebih lanjut maka penulis memberikan saran yaitu:

1. Dapat dilakukan penelitian mengenai jarak frekuensi pembebanan dengan frekuensi natural pipa minimal agar *simplified fatigue analysis* berlaku.
2. Dapat dilakukan analisis *fatigue* pada pipa *free span* dengan kasus berbagai macam kedalaman untuk mengetahui pengaruh beban gelombang dan arus terhadap kedalaman.

3. Dapat ditambahkan pengaruh parameter tanah dan coating dalam analisis *fatigue* pipa *free span*.
4. Dapat dibandingkan dengan analisis *fatigue* untuk pembebanan dalam domain frekuensi

DAFTAR PUSTAKA

American Petroleum Institute. 1999. *Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines API Recommended Practice 1111*

Bai, Yong. 2001. *Pipeline and Risers*, Elsevier Ocean Engineering Book Series

Chakrabarti, S.K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Great Britain: Henry Ling Ltd.

Det Norske Veritas. 1981. *Rules for Submarine Pipeline System*

Det Norske Veritas. 2006. *Recommended Practice RP-F105 Free spanning Pipelines*

Det Norske Veritas. 2010. *Recommended Practice RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures*

Goda, Yoshimi. 2000. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Lukman, Ricky Tawekal. *Bangunan Lepas Pantai 2*. Diktat Kuliah ITB.

Naess, Almar. 1985. *Fatigue Handbook Offshore Steel Structures*. TAPIR.

Platform, Pipeline and Subsea Technology - *Fatigue Design*

Salim, Hang Tuah, *Mekanika Gelombang*, Diktat Kuliah ITB.

Setio, Herlien D. *Analisis Struktur III*, Diktat Kuliah ITB

Sumer, B. Mutlu; Jorgen Fredsoe. 2006. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures (Revised Edition)*. World Scientific