

Analisa Tegangan pada *Vertical Subsea Gas Pipeline* Akibat Pengaruh Arus dan Gelombang Laut dengan Metode Elemen Hingga

Rafli Ramadani, Hari Prastowo, dan Sutopo Purwono Fitri.

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya, 60111 Indonesia

e-mail : h-prastowo@its.ac.id, sutopopf@its.ac.id

Abstrak — Pipa gas bawah laut merupakan salah satu cara utama yang paling cepat, aman, ekonomis, dan dapat diandalkan dalam pendistribusian gas dari *offshore*. Faktor tegangan pada jalur pipa gas bawah laut merupakan kunci utama dalam proses operasinya. Tegangan tersebut dapat disebabkan dari beban internal pada pipa ataupun beban eksternal yang berasal dari lingkungan dimana pipa tersebut beroperasi. Untuk mengetahui distribusi tegangan pada pipa akibat beban eksternal berupa arus dan gelombang laut maka dilakukan simulasi dengan metode Computational Fluid Dynamic (CFD) menggunakan software SOLIDWORKS untuk pembuatan obyek dan domain yang selanjutnya disimulasikan menggunakan software ANSYS FLUENT dan AQWA 14. Simulasi dilakukan pada pipa vertikal dimana dalam simulasi pipa tersebut dibagi menjadi tiga bagian. Pipa bagian atas memiliki panjang pipa sebesar 7700 mm pada garis air 15400 mm – 23000 mm, pipa bagian tengah memiliki panjang 7700 pada garis air 7700 mm – 15400 mm, dan pipa bagian bawah memiliki panjang 4650 mm untuk pipa lurus dan memiliki tambahan elbow 90° dengan jari-jari sebesar 3050 m berada pada garis air 0 mm – 7700 mm. Selanjutnya, simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan arus sebesar 0.48 m/s untuk potongan pipa bagian tengah dan 0.75 m/s untuk potongan pipa bagian bawah. Sedangkan untuk pipa bagian atas disimulasikan dengan periode gelombang sebesar 6.4 s dengan tinggi gelombang sebesar 2.3 m. dari hasil pemodelan dan simulasi didapatkan distribusi tegangan dan tegangan maksimum untuk setiap potongan pipa. Potongan pipa bagian bawah memiliki tegangan maksimum sebesar 1830.629 Pa. Potongan pipa bagian tengah memiliki tegangan maksimum sebesar 18.68415 Pa. potongan pipa bagian atas memiliki tegangan maksimum sebesar 6733.2 Pa. Dari ketiga simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa beban gelombang yang paling besar dampaknya untuk pipa vertikal tersebut. Umur sisa kelelahan untuk pipa vertikal adalah sebesar 65982173.7 tahun untuk $m = 4.0$ dan 9775722903 tahun untuk $m = 5.0$.

Kata Kunci - *vertical subsea gas pipeline*, analisa tegangan, *fatigue life*

I. PENDAHULUAN

Salah satu cara pendistribusian fluida gas dari *offshore* menuju ke konsumen di darat dalam hal ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yaitu dengan menggunakan pipa gas bawah laut sebagai media transportasinya. Pipa gas bawah laut merupakan salah satu cara utama yang paling cepat, aman, ekonomis, dan dapat diandalkan dalam pendistribusian gas dari *offshore* [1]. Faktor

tegangan pada jalur pipa gas bawah laut merupakan kunci utama dalam proses operasinya. Kelebihan tegangan pada belokan jalur pipa atau bagian-bagian yang lain yang disebabkan oleh tekanan dari dalam pipa ataupun beban yang didapat dari kondisi lingkungannya, dapat mengakibatkan kerusakan pada pipa dan pipa beroperasi pada kondisi yang berbahaya. Keadaan tersebut sangat tidak diinginkan dalam kondisi operasi distribusi, sehingga hal tersebut mendapatkan perhatian yang lebih.

Pada studi ini akan dianalisa mengenai tegangan pipa gas bawah laut vertikal yang berasal dari FSRU (*Floating Storage and Regasification Unit*) Jawa Barat menuju ke ORF (*Onshore Receiving Facility*) Muara Karang. Pipa gas bawah laut vertikal ini menjadi perhatian yang lebih dikarenakan posisinya yang mengantung dan menerima beban dari kondisi dinamis perairannya yaitu berupa arus dan gelombang laut. Tujuannya adalah untuk mengetahui tegangan serta distribusi tegangan pipa gas bawah laut vertikal dan juga setelah diketahui tegangan dari pipa bawah laut yang mendapat beban dinamis tersebut bisa dianalisa pula *fatigue life* nya. *Vertical subsea gas pipeline* yang akan dianalisa adalah milik PT. Nusantara Regas.

Teknologi yang semakin pesat memudahkan seorang insinyur teknik dalam melakukan suatu simulasi, diantara adalah software ANSYS yang dapat digunakan untuk melakukan suatu analisa dan simulasi tegangan pipa. ANSYS bekerja dengan metode Computational Fluid Dynamic (CFD) serta Finite Element Metode (FEM), dimana penyelesaiannya pada suatu obyek dilakukan dengan mensimulasikan aliran fluida yang mengenai suatu obyek benda. Peraturan yang digunakan adalah DNV OS F101 dan DNV RP C203.

II. DASAR TEORI

A. Pipa Bawah Laut

Subsea pipelines digunakan untuk transportasi fluida seperti minyak atau gas dalam jumlah besar dengan jarak tertentu melalui laut. Pada umumnya *subsea pipeline* digunakan untuk mengangkut produk hidrokarbon. Pipeline bekerja selama 24 jam dan hampir bekerja selama 365 dalam setahun [1].

Terdapat bagian pipa bawah laut yang disebut riser, yang merupakan pipa vertikal yang menghubungkan fasilitas di atas permukaan laut dengan pipa bawah laut. Bagian-bagian riser dimulai dari katup pada fasilitas di atas air sampai dengan

mengarah pada *elbow* di bawah laut yang menuju pada subsea pipelines [2].

B. Beban-beban pada Pipa Bawah Laut Vertical

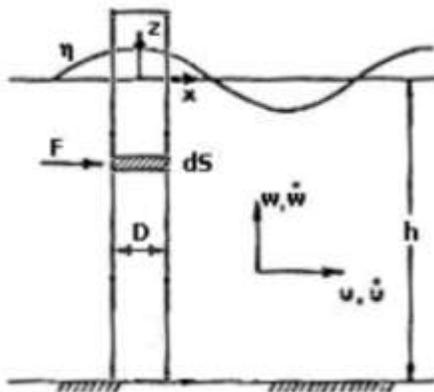
Pipa bawah laut vertikal atau yang sering dikenal dengan *riser* dalam operasinya menerima beban yang sangat banyak dan kompleks, yaitu meliputi Beban Lingkungan (*environmental loads*), Beban angin (*wind loads*), beban-beban hidrodinamika (*hydrodynamics loads*), *flow induced cyclic loads*, gerakan *platform*, dan kondisi beban rancang spesifik. Masing-masing jenis beban yang terjadi pada riser diakibatkan oleh jenis input pembebanan yang berbeda-beda [3].

C. Gaya Gelombang

Dalam analisa suatu pipa bawah laut perhitungan gaya gelombang air menjadi salah satu pekerjaan yang paling sukar karena sangat kompleksnya interaksi antara gelombang air dan pipa [4]. Gaya gelombang dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu :

1. Persamaan Morison

Persamaan ini digunakan ketika $D/L < 0.2$. Persamaan ini mengasumsikan bahwa terdiri dari gaya seret dan gaya inersia. Terdapat koefisien C_D dan C_M yang besarnya ditentukan dalam sebuah eksperimen. Ketika gaya seret lebih dominan dalam suatu analisa maka persamaan ini akan digunakan.



Gambar 1. Sketsa definisi gaya gelombang Morison pada silinder vertikal (Ignatius, 2007)

Persamaan Morison menyatakan bahwa gaya gelombang merupakan penjumlahan dari gaya seret yang muncul akibat kecepatan air dan gaya inersia akibat percepatan partikel air.

2. Teori Froude-Krylov

Ketika gaya inersia lebih besar daripada gaya seret namun ukuran struktur masih relative lebih kecil jika dibanding dengan panjang gelombang maka dapat digunakan teori Froude-Krylov. Kelebihannya adalah pada benda-benda yang simetris, dan koefisien gayanya lebih mudah untuk ditentukan.

3. Teori Difraksi

Teori difraksi digunakan ketika ukuran struktur sebanding dengan ukuran panjang gelombang, keberadaan struktur akan mengganggu medan gelombang yang datang di muka struktur. Kriteria aplikasi dari ketiga macam teori yang telah disajikan sebelumnya disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. kriteria aplikasi metode

No	kriteria	Metode yang Digunakan
1	$D/L < 0,2$	Persamaan Morison
2	$D/L > 0,2$	Teori Difraksi
3	$D/W > 0,2$	Teori Froude-Krylov

Dimana :

D = diameter struktur

L = Panjang gelombang

$$W = H / \tan \frac{2 \pi h}{L}$$

D. Tegangan-tegangan pada Pipa Bawah Laut

Gaya yang bekerja pada pipa baik gaya yang berasal dari internal pipa tersebut sendiri serta gaya lingkungan dari eksternal pipa dapat menimbulkan tegangan pada pipa. Contoh dari gaya internal yang berasal dari pipa itu sendiri adalah tekanan internal dan tegangan longitudinal. Gaya internal disebabkan oleh kondisi instalasi dan operasinya. Sedangkan gaya eksternal adalah tekanan hidrostatis yang berasal dari kondisi lingkungan pipa tersebut. Terdapat beberapa macam contoh macam-macam tegangan yang terjadi pada pipa bawah laut yaitu tegangan tangensial (*Hoop Stress*), *bending stress*, *poisson stress*, *thermal stress*.

E. Ansys Aqwa

Aqwa dapat mensimulasikan gelombang linier hidrodinamika pada suatu benda yang mengapung atau benda yang terpancang (kaku). Persamaan yang digunakan dalam simulasi tersebut adalah persamaan Morison yang divisualisasikan secara tiga dimensi radiasi dalam domain frekuensi. Analisa hidrostatis dan hidrodinamika juga dapat dilakukan oleh aqwa untuk suatu benda yang mengapung bebas pada permukaan suatu fluida. Aqwa dapat memperkirakan karakteristik keseimbangan dan stabilitas statis serta dinamis yang digabungkan dengan suatu konektor pada suatu benda di bawah beban lingkungannya. Beban lingkungan yang digunakan pada analisa tersebut contohnya adalah angin, gelombang, dan arus. Analisa statistik domain frekuensi yang digabungkan dari suatu benda terapung pada gelombang teratur ataupun tidak teratur juga dapat dilakukan oleh aqwa [5].

Gerakan pada suatu benda yang beroperasi pada gelombang regular ataupun non-regular dapat disimulasikan, dimana non linier Froude-Krylov dan gaya hidrostatisnya diestimasi pada permukaan gelombang yang datang. Selain itu suatu benda yang dikenai gelombang dari berbagai arah ataupun dari satu arah saja dapat disimulasikan dibawah orde satu dan orde dua eksitasi gelombang. Pendekatan secara konvolusi digunakan untuk memperhitungkan efek memori kekuatan radiasi. Beban gelombang pada suatu benda yang mengapung yang dihitung selama simulasi radiasi di aqwa dapat dipetakan ke analisa elemen hingga [5].

F. Ansys Fluent

Ansys FLUENT dapat memodelkan suatu masalah aliran fluida baik yang mampu mampat atau tak mampu mampat, serta laminar atau turbulen. Selain itu fluida yang bersifat steady state ataupun transient mampu juga dianalisa dengan menggunakan ansys FLUENT. Dengan menggunakan ansys FLUENT dapat diketahui parameter-parameter aliran yang

diinginkan. Distribusi tekanan, kecepatan aliran, laju aliran massa, distribusi temperatur, dan pola aliran fluida yang terjadi dapat diketahui pada tiap titik yang terdapat dalam sistem yang dianalisa.

ANSYS FLUENT menyediakan tiga formulasi solver, yaitu sebagai berikut :

- *Segregated*
- *Coupled implisit*
- *Coupled eksplisit*

Formulasi *solver segregated* dan *coupled* mempunyai perbedaan pada cara penyelesaian persamaan kontinuitas, momentum, dan energi serta persamaan spesies transport (jika diperlukan). *Solver segregated* menyelesaikan persamaan-persamaan yang terlibat secara bertahap (terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain), sementara *solver coupled* menyelesaikan semua persamaan secara bersamaan. Kedua formulasi *solver* menyelesaikan persamaan untuk besaran-besaran tambahan secara bertahap. *Solver coupled* implisit dan eksplisit mempunyai perbedaan pada cara melinierisasi persamaan-persamaan yang akan diselesaikan [6].

G. Penentuan Siklus Kelelahan dengan Pendekatan Palmgreen-Miner Rule

Berdasarkan DNV RP C 203 untuk menentukan sisa waktu operasi harus mencari dahulu tingkat kelelahan dengan persamaan [7] :

$$D_{fat} = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

Dimana :

D_{fat} : *Accumulated fatigue damage*

n_i : *Total number of stress cycles corresponding to the stress range*

N_i : *Number cycles to failure at stress range*

Untuk mendapatkan besarnya nilai n dan N maka diperlukan kurva S-N. perhitungan umur kelelahan ini mengacu pada DNV RP C 203. Melalui proses pemilihan jenis kurvanya dan kategori kurva S-N, maka nilai N dapat diperoleh melalui persamaan berikut (DNV RP C 203) :

$$\log N_i = \log a - m \log \Delta \sigma$$

Dimana :

$\Delta \sigma$: *stress range*

a : *intercept of the design S-N curve with the log N axis*

m : *negative inverse slope on the S-N Curve*

Nilai n dapat ditentukan dengan menggunakan grafik S-N yang ada pada DNV RP C 203 sesuai dengan nilai stress range. Peluang kejadian siklus tegangan pada nilai n berkisar 2% - 10%. Selain itu besarnya jumlah siklus tegangan n dapat dihitung dari persamaan berikut :

$$n_i = \frac{P_i \times H}{T_i}$$

Dimana :

P_i = frekuensi relative kejadian gelombang

T_i = periode (detik)

H = tinggi gelombang (m)

Kurva S-N yang digunakan nantinya sesuai dengan kategori masing-masing. Pemilihan jenis kurva S-N dan plotting tegangan dalam garfik kurva S-N dalam menentukan jumlah tegangan lelah yang terjadi pada struktur tersebut.

Pada perhitungan estimasi sisa waktu operasi harus dicari terlebih dahulu nilai rasio kelelahan kerusakan. Oleh karena itu, dalam penentuan rasio kelelahan kerusakan, semua komponen yang berasal dari sumber lainnya perlu dihitung lebih lanjut. Komponen tersebut meliputi adanya penambahan *safety factor* dan rasio *damage*.

Penentuan kurva S-N seperti gambar di atas berdasarkan pada struktur yang digunakan. Perlu adanya penyesuaian kurva S-N untuk mendapatkan grafik yang benar agar mendapatkan nilai jumlah siklus menuju gagal pada saat *stress range*.

H. Umur Kelalahan Pipa

Umur kelelahan suatu struktur dapat diperhitungkan setelah memperhitungkan siklus seluruh tegangan, dimana hal tersebut dilambangkan dengan variable T . melalui substitusi persamaan persamaan pada sub bab sebelumnya, diperoleh persamaan kegagalan sturktur akibat kelelahan sebagai berikut :

$$D = \frac{P_i \times T}{N_i \times T_i}$$

Selanjutnya dari hubungan persamaan di atas bisa diturunkan umur kelelahan struktur dengan satuan tahun dengan persamaan berikut :

$$T = \frac{1}{\left(\frac{P_i}{N_i T_i}\right)}$$

III. METODE PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam analisa ini adalah dengan menggunakan metode berbasis analisa dengan membuat geometri pipa vertikal yang kemudian dilakukan analisa tegangan akibat beban arus dan gelombang laut. Metodologi yang digunakan adalah sebagai berikut :

Identifikasi dan Perumusan Permasalahan

Penulisan skripsi ini diawali dengan mengidentifikasi dan merumuskan masalah mengenai pengerjaan yang akan dilakukan beserta batasan masalahnya. Hal ini bertujuan untuk menyederhanakan permasalahan sehingga mempermudah dalam pengerjaan skripsi. Dalam skripsi ini perumusan masalah yang diangkat adalah analisa tegangan yang terjadi pada pipa vertikal bawah laut, akibat beban arus dan gelombang, serta mengetahui *fatigue life* pipa tersebut.

Study Literatur

Study literatur dilakukan dengan pengumpulan referensi mengenai analisa tegangan pipa, beserta gaya-gaya yang bekerja pada pipa dan *code* spesifikasi yang digunakan saat proses analisa. Tujuannya adalah untuk memperkuat permasalahan sebagai dasar teori dalam melakukan analisa sehingga hasilnya mampu dipertanggung jawabkan. Literatur yang digunakan bisa didapat dari buku, jurnal, *paper*, dan tugas akhir.

Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada tugas akhir ini adalah data *subsea pipeline design* beserta dengan jalurnya sebagai acuan dalam analisa tegangan jalur pipa yang akan dilewati fluida

gas. Analisa tegangan pipa yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode elemen hingga yang ada pada software Ansys disertai dengan simulasi distribusi pipa vertikal pada pipa gas bawah laut dari FSRU Jawa Barat menuju ORF Muara Karang yang diakibatkan oleh arus dan gelombang laut. Berikut adalah parameter awal untuk pemodelan pembebanan arus :

- diameter dalam : 17.5 mm
- diameter luar : 610 mm
- radius elbow : 3050 mm
- panjang *middle part pipe* : 7700 mm
- panjang *lower part pipe* : 4650 mm

parameter awal untuk pemodelan pembebanan gelombang :

- diameter dalam : 17.5 mm
- diameter luar : 610 mm
- panjang *upper part pipe* : 7700 mm

serta parameter lain berupa kecepatan arus dan gelombang sebagai berikut :

- kecepatan arus
 - kedalaman 0 – 7700 mm : 0.75 m/s
 - kedalaman 7700 – 15400 mm : 0.48 m/s
- periode gelombang
 - kedalaman 15400 – 23000 mm : 6.4 s
- tinggi gelombang : 2.4 m

Pemodelan dan Simulasi

Simulasi diawali dengan pemodelan geometry sesuai dengan data parameter awal untuk setiap potongan bagian pipa pada kedalaman tertentu sesuai data parameter awal juga. Setelah dilakukan pembuatan geometri, langkah selanjutnya adalah meshing pada geometri tersebut untuk mendapat hasil yang mendekati aslinya. Selanjutnya adalah melakukan pengaturan input data untuk simulasi sesuai dengan data parameter awal untuk setiap pembebanan yaitu pembebanan arus dan gelombang. Setelah semua langkah tersebut dilakukan maka proses simulasi baru dapat dilakukan dan akan didapatkan distribusi tegangan untuk setiap geometri potongan pipa.

Perhitungan Fatigue Life

Setelah diketahui tegangan terbesar yang terjadi pada pipa maka selanjutnya yang dilakukan adalah menghitung *fatigue life* dari pipa tersebut. Perhitungan *fatigue life* didasarkan pada DNV RP C 203.

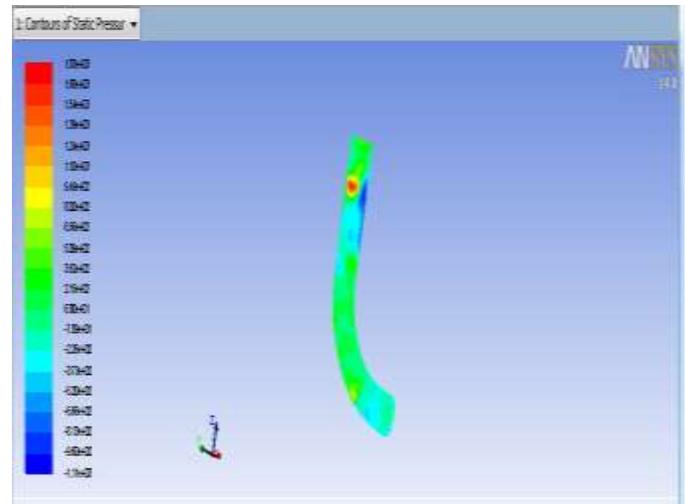
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi

- *lower part pipe*

Dari hasil simulasi diketahui beberapa kontur tekanan dan profil kecepatan yang menunjukkan kontur tegangan yang paling besar berada pada garis air 6020 mm dengan tegangan sebesar 1830.629 Pa. Bagian pipa yang mengalami tegangan terbesar tersebut adalah bagian yang langsung bertabrakan

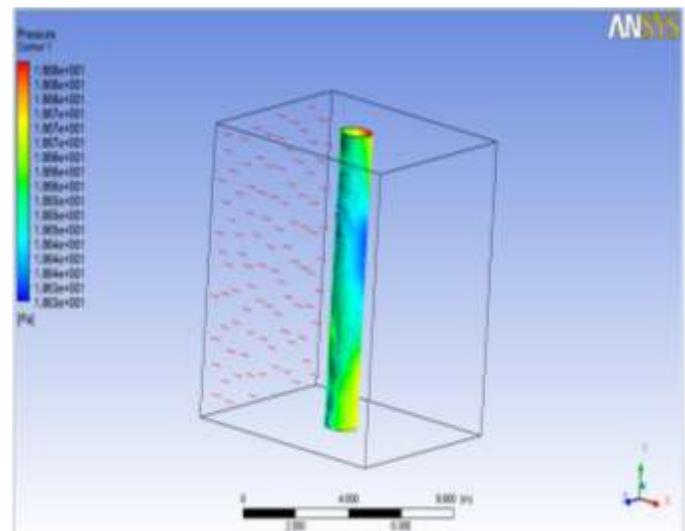
dengan arus laut sebesar 0.75 m/s. jika dilihat dari gambar maka letak tegangan tersebut berada di bagian atas potongan pipa bagian bawah, dan semakin ke bawah dari potongan semakin kecil pula arus laut, maka distribusi tegangannya juga semakin kecil. Tegangan terkecil yang terjadi pada potongan bagian bawah tersebut adalah sebesar 680 Pa.



Gambar 2 . Distribusi tegangan *lower part pipe*

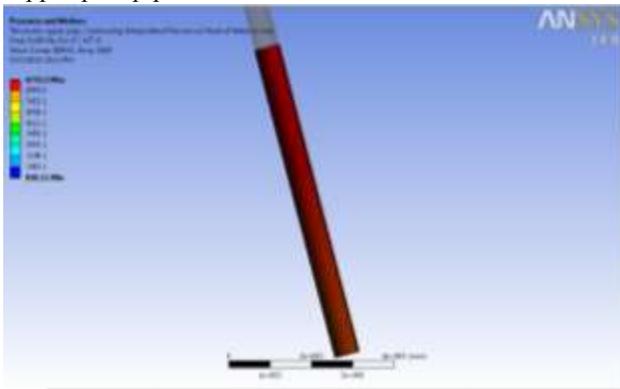
- *middle part pipe*

Dari hasil simulasi diketahui beberapa kontur tekanan dan profil kecepatan yang menunjukkan kontur tegangan yang paling besar berada pada garis air 15400 mm dengan tegangan sebesar 18.68415 Pa. bagian pipa yang mengalami tegangan terbesar tersebut adalah bagian yang langsung bertabrakan dengan arus laut sebesar 0.48 m/s. jika dilihat dari gambar maka bagian tersebut berada di bagian atas potongan pipa bagian atas, dan semakin ke bawah dari potongan tersebut kecepatan arus laut semakin kecil, maka distribusi tegangannya juga akan semakin kecil. Tegangan terkecil yang terjadi pada potongan bagian bawah tersebut adalah sebesar 18.63173 Pa.



Gambar 3. Distribusi tegangan *middle part pipe*

• upper part pipe



Gambar 4 . Distribusi tegangan upper part pipe

Jika dilihat dari gambar tersebut, semakin ke bawah maka distribusi tegangannya semakin kecil. Terbaca dari hasil simulasi tersebut tegangan maksimal yang terjadi pada potongan pipa bagian atas tersebut adalah sebesar 6733.2 Pa yang terletak pada bagian atas pipa tersebut. Hal tersebut dikarenakan bagian tersebut adalah bagian yang berhubungan langsung dengan gelombang laut. Tegangan minimal dari bagian pipa tersebut adalah sebesar 838.11 Pa, dimana terletak pada bagian pipa yang paling bawah. Hal tersebut dapat terjadi karena bagian bawah tersebut tidak langsung berhubungan dengan gelombang laut, melainkan hanya arus saja.

Perhitungan Fatigue Life

Dalam perhitungan sisa waktu operasi pipa, digunakan kurva S-N type B1.

1. untuk $N > 10^6$, maka $m = 5.0$ dan $\log a = 17.146$ (S-N curve B1). Stress range yang digunakan adalah sebesar 6.7332 MPa, maka :
 $\log N_i = \log a - m \log \Delta \sigma$
 $\log N_i = 17.146 - 5.0 \times \log 6.7332$
 $\log N_i = 17.146 - 5.0 \times 0.82822$
 $\log N_i = 13.0049$
 $N_i = 1.011346556 \times 10^{13}$

Diketahui dari data lingkungan perairan di Jakarta, peluang kejadian gelombang dari arah 45° adalah sebesar 1800 kali. maka umur kelelahannya adalah sebagai berikut :

$$T = \frac{1}{\frac{P_i}{N_i T_i}}$$

$$T = \frac{1}{\frac{1800/8573300}{1.011346556 \times 10^{13} \times 6.4}}$$

$$T = 3.0829 \times 10^{17} \text{ sekon}$$

$$T = 9775722903 \text{ tahun}$$

KESIMPULAN

Setelah melakukan beberapa simulasi dan analisa, maka ditarik kesimpulan mengenai beberapa hal yang telah menjadi hasil dari simulasi dan analisa

1. Pemodelan untuk pembebanan arus dapat dilakukan dengan pendekatan Computational Fluid Dynamic (CFD), yaitu dengan menggunakan ANSYS FLUENT, dan pemodelan untuk pembebanan gelombang dapat dilakukan dengan pendekatan elemen hingga (FEM), yaitu dengan menggunakan ANSYS AQWA.. Hasil - hasil simulasi yang telah dilakukan berdasarkan pembebanan arus dan gelombang adalah sebagai berikut :

- a) Simulasi dengan periode gelombang sebesar 6.4 sekon yang dilakukan untuk pipa bagian atas pada garis air 15400 mm – 23000 mm menghasilkan tegangan maksimum sebesar 6733.2 Pa.
 - b) Simulasi dengan kecepatan arus sebesar 0.48 m/s yang dilakukan untuk pipa bagian tengah pada garis air 7700 mm – 15400 mm menghasilkan tegangan maksimum sebesar 18.68415 Pa yang berada pada garis air 15400 mm.
 - c) Simulasi dengan kecepatan arus sebesar 0.75 m/s yang dilakukan untuk pipa bagian bawah pada garis air 0 mm – 7700 mm menghasilkan tegangan maksimum sebesar 1830.629 Pa yang berada pada garis air 6020 mm.
2. Dari ketiga simulasi yang telah disebutkan, pembebanan gelombang memiliki dampak yang cukup signifikan yang menghasilkan tegangan paling besar terhadap pipa daripada pembebanan arus.
 3. Dari hitungan fatigue life yang didasarkan pada DNV RP C203, didapatkan hasil bahwa fatigue life yang berdasar pada pembebanan gelombang dan arus dengan nilai m sebesar 5.0 adalah sebesar 9775722903 tahun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing yang bersedia memberikan waktunya untuk berdiskusi dan membantu dalam proses pengerjaan ini. Serta kepada keluarga, kerabat, dan teman-teman penulis yang telah membantu baik secara moril maupun materil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Soegiono. 2007. Pipa Laut. Surabaya, Airlangga University Press.
- [2] Bai Yong. 2003. Pipelines and Risers. Amerika.
- [3] Chakrabakti, S.K. 1987. Hydrodynamic Loads of Offshore Structure. Southampton, Boston : Computational Mechanics Publication
- [4] Sudarsono Ignatius. 2007. Pengaruh Beban Dinamik Terhadap Fatigue pada Marine Riser System. ITB, Bandung.
- [5] ANSYS, Inc. 2009. ANSYS AQWA Help in Workbench. Amerika.
- [6] ANSYS, Inc. 2009. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide. Amerika.
- [7] Det Norske Veritas As. 2010. DNV RP C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures. Norway.