

Desain Sistem Perpipaan di Area Pasang Surut Air Laut untuk Mencegah Terjadinya Potensi *Buckling*

Husni Dhiyanul Haq.^{1*}, George Endri Kusuma², Priyo Agus Setiawan³

Program Studi D-IV Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia^{1*,2}

Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia²

Email : husnideyhaq@gmail.com^{1*}; kusuma.george@gmail.com^{2*}; aguspriyo@gmail.com^{3*}

Abstract - Storage tank project is a pipeline construction project from storage tanks to jetty. Research on this project was carried out to prevent buckling potential, because there is no support system on the pipeline that will be designed plus the soil is only able to withstand 8ton/25m² load. This research is connected from above ground pipe, then crossing road with a depth of 2.1 meters, above sea floor with tidal conditions, and above ground pipe before flexible jetty. This research uses manual stress calculation and pipe modeling with CAESAR II Software and modeling above sea floor pipe used ANSYS Software. The results calculation of wall thickness minimum obtained is 0.029 in with schedule 20 and ID 8,125 in. From the results of Buoyancy calculation, the lift force of length is -1.397 lb / in. The maximum distance of pipe span is 12.7 m with the support number are 6. From manual calculations, the pipeline has a total longitudinal stress with a value of 18833.49 psi which still below the allowable stress of 18900 psi. The wave Impact of modeling section pipeline in ANSYS affected by tides have maximum deformation of 20.47 mm and a maximum Equivalent von-Mises stress of 13304.3 psi

Kata kunci : API 1102, ASME B31.4, Crossing Road, Sea Floor Pipe, Stress Analysis

Nomenclature

Bp	Gaya angkat [lb]
E	Modulus elastisitas pipa [psi]
F	Faktor desain sesuai 49 Code of Federal Regulation Part 192.111. [9]
Fb	Gaya angkat per satuan panjang [lb/inch]
I	Momen Inertia pipa [in ⁴]
L	Allowable pipe span [feet]
LA	Luas daerah [m ²]
Ls	Panjang support profil wf [m]
Ls'	Panjang support U-Ditch [m]
Seff	Tegangan Efektif [psi]
SL	Tegangan Longitudinal [psi]
t	Minimum wall thickness [in]
v	Poisson's ratio
w	Berat pipa dan fluida [kg]
Wtm	Daya Dukung Tanah Maksimum [ton]
Wsupport	Berat support [kg/m]
wu	Lebar U-ditch [m]
Ww	Berat isi pipa per satuan panjang [lbf/inch]
YWF	Berat support dan pipa terhadap tanah profil WF [Ton]
Δ	Allowable deflection [in]

1. PENDAHULUAN

Pipeline atau jaringan pipa adalah suatu sistem perpipaan untuk sarana transportasi penyalur fluida dari satu tempat ke tempat lain. Salah satu fluida tersebut adalah *crude palm oil* (CPO). Suatu proyek

storage tank dibangun dengan rancangan *pipeline* dari *storage tank* menuju *jetty*. *Jetty* berfungsi untuk mengurangi pendangkalan alur oleh sedimen pantai dan sebagai *pipe rack* sistem perpipaan untuk fluida CPO. Sedangkan, *storage tank* berfungsi untuk menyimpan CPO tersebut. Penelitian yang dilakukan memiliki desain panjang pipa sekitar 74 meter. Desain tersebut meliputi pipa diletakkan *aboveground*, *buried pipe*, dan pipa diletakkan di *sea floor*. Potensi *upheaval buckling* disebabkan oleh beberapa faktor yaitu *initial imperfection*, properti tanah, tipe beban, dan *pipe Stiffness* [8]. Awal *local buckling failure* disebabkan karena adanya penambahan strain concentration factor yang menjadikan suatu *pipeline* memiliki *low cycle fatigue* dan *lateral buckling capacity* [7]. Saat *pipeline* berada di area *sea floor*, air laut yang pasang akan menenggelamkan pipa dan pipa mengalami potensi terjadinya *buckling* karena gelombang air laut. Desain *pipeline* tersebut harus memenuhi kriteria ASME B31.4 *Pipeline System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*.

Tugas akhir ini dilakukan untuk analisa adanya potensi *buckling* desain sistem perpipaan *above sea floor* pada proyek *storage tank* di Pelabuhan Tanjung Perak. *Pipeline* memiliki temperatur desain 60°C dan temperatur operasi 55°C serta pressure 116 psi. Analisa *buckling* pada *pipeline* bawah laut yang mengangkut fluida CPO menjadi fokus penelitian dikarenakan *pipeline* masih dapat terombang-ambing arus laut saat dalam kondisi operasi jika *support* yang dipasang tidak sesuai dengan ketentuan dan beban

tanah yang mana tanah hanya mampu menahan berat 8ton/25m². Analisa ini meliputi analisa beban tanah, peletakan *support*, dan analisa potensi terjadinya *buckling* serta solusi agar sistem perpipaan terhindar dari potensi terjadinya *buckling*.

2. METODOLOGI

2.1 Prosedur Penelitian

Desain sistem perpipaan ini adalah setelah *flexible pipe* menuju *underground pipeline* setelah itu menuju *sea floor* yang mana terkena gelombang pasang dan surut hingga pipa sebelum *flexible jetty*. Desain perpipaan ini menggunakan pipa 8 in schedule 20 dengan desain temperatur 60^oC dan pressure 8 bar. Pipa ini mengalirkan fluida *crude oil*. Untuk pertimbangan pemilihan material pipa harus didasarkan pada jenis fluida yang akan ditransportasikan, beban, temperatur, dan mode kerusakan yang mungkin selama proses instalasi dan operasi [1]. Material yang digunakan dalam desain adalah API 5L Grade B. Perhitungan pada desain sistem perpipaan di area pasang surut air laut ini meliputi analisa minimal *wall thickness*, analisa *buoyancy force*, analisa jenis, jumlah, dan posisi *support*, analisa beban tanah, analisa tegangan pada pipa, serta analisa *wave impact*.

2.2 Minimum Wall Thickness

Penentuan ketebalan pipa dalam desain sangatlah penting karena ketebalan pipa yang dibutuhkan untuk sebuah desain dipengaruhi oleh besar kecilnya tekanan dan *allowable stress* material yang digunakan. Berikut persamaan untuk mencari minimum *wall thickness* berdasarkan [4] :

$$t = \frac{Pi \times D_o}{2 \times S \times E_j} \quad (1)$$

2.3 Support

Maximum allowable span untuk pipa horizontal dibatasi oleh 3 faktor yaitu tegangan bending, defleksi vertical, dan natural frekuensi. Dengan menghubungkan frekuensi natural dan batasan defleksi, *allowable pipe span* dapat ditentukan dari nilai terendah antara perhitungan support berdasarkan tegangan bending dan defleksi [12].

2.4 Pipe Span

Jarak antar *support* diambil yang terkecil dihitung berdasarkan *limitation of stress* dan *limitation of deflection* dengan menggunakan persamaan 2 dan 3. Sedangkan untuk jarak antar *span* menggunakan persamaan 4.

Based on Limitation of Stress

$$L = \sqrt{\frac{0.4 Z S_h}{w}} \quad (2)$$

Based on Limitation of Deflection

$$L = \sqrt[4]{\frac{\Delta E I}{13.5 w}} \quad (3)$$

Number of Span.

$$\text{Number of span}(NOS) = \frac{L_{\text{pipa}}}{L} \quad (4)$$

2.5 Analisa Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah adalah kekuatan tanah untuk menahan suatu beban yang bekerja di atasnya. Perhitungan untuk berat *support* dan pipa terhadap tanah profil Wf (Ton) menggunakan persamaan 5, persamaan 6 digunakan untuk menghitung panjang *support* U-ditch (m), dan persamaan 7 digunakan untuk menghitung berat *support* dan pipa terhadap tanah *support* U-ditch (Ton).

$$Y_{wf} = (W_{\text{support}} \times L_s \times NOS) + W \quad (5)$$

$$L'_s = wu + t_1 + t_2 \quad (6)$$

$$Y_U = (W_{\text{support}} \times L'_s \times NOS) + W \quad (7)$$

Sedangkan untuk menentukan beban tanah agar tanah dapat menahan berat pipa dan *support* dapat menggunakan persamaan 8 untuk luas daerah tanah dan *support* (m²) dan persamaan 9 untuk daya dukung tanah maksimum (ton). Dimana W'_t adalah daya dukung tanah per meter (ton).

$$L_A = L_{\text{pipa}} \times L_s \quad (8)$$

$$W_{tm} = W'_t \times L_A \quad (9)$$

2.6 Analisa Buoyancy Force

Pipeline yang melewati *sea floor* memiliki kemungkinan gaya angkat jika berat pipa dan berat tanah lebih kecil dari berat air yang tergantikan. Hasil perhitungan nilai berat air yang tergantikan akan menentukan *pipeline* memiliki *uplift force* atau *downward force* [6].

$$F_b = W_w - (W_p + W_c) \quad (10)$$

$$B_p = F_b \cdot L \quad (11)$$

2.7 Tegangan pada Crossing highway

Pipa sedalam 2.1 m yang melewati *crossing highway* dengan lebar jalan 3.8 m tidak boleh lebih dari *allowable stress* sesuai dengan API 1102.

$$S_{eff} \leq SMYS \times F \quad (12)$$

2.8 Analisis Tegangan Longitudinal

Tegangan longitudinal merupakan jumlah (Total) tegangan ekspansi *thermal*, tegangan *circumferential (hoop)*, *bending moment*, dan *axial force* [3]. Untuk mencari perhitungan tegangan longitudinal dapat digunakan persamaan 13. Dimana v adalah *poisson's ratio*.

$$S_L = S_E + v S_H + \frac{M}{Z} + F_a / A \quad (13)$$

2.9 Kriteria Penerimaan Tegangan Pipeline

Rancangan *pipeline*, harus aman dari tegangan-tegangan yang terjadi pada *pipeline*, hal ini bertujuan untuk menghindari kegagalan (*Overstress*) saat *pipeline* beroperasi. Berdasarkan ASME B31.4 tabel 403.2.1-1., terdapat kriteria tegangan yang diijinkan meliputi *Specified Yield Strength*, *Weld Joint*, dan nilai *Allowable Stress*. Sedangkan pada ASME B31.4 tabel 403.3.1-1 terdapat kriteria tegangan ijin untuk pipa restrained maupun *unrestrained pipe*, meliputi *allowable hoop stress*, *allowable expansion stress*, *longitudinal stress*, penambahan *longitudinal stress* dari *sustain load* dan *occasional load*, serta *effective stress*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisa Minimum Wall Thickness

Berdasarkan persamaan 1 diperoleh *allowable stress* 17.500 psi dengan ketebalan 0.029 in. Jika dilihat pada API 574, 2009, tabel 1 maka didapatkan schedule 20 dengan ID 8.125.

3.2 Support

Dari hasil perhitungan didapatkan *based on limitation of stress* 26.65 mm, sedangkan *based on limitation of deflection* 12.7 mm. Jarak antar penyangga pada perhitungan tersebut berdasarkan batasan tegangan dan batasan defleksi maksimal diambil yang lebih kecil [10], yaitu *based on limitation of deflection* sebesar 12.7 m. Maka dengan persamaan 4, support diketahui berjumlah 6. Pada *above sea floor* sepanjang 60 m, maka support yang digunakan sejumlah 5 buah. Peletakan 5 buah *support* tersebut pada software Caesar II hanya sebatas pada *above sea floor* dan *support underground* dimodelkan juga dari software Caesar dengan *underground pipe modeler* (gambar 1). Posisi *support* tersebut harus disesuaikan dengan berat tanah yang terdapat pada lapangan. Pada analisa beban tanah, karena berat *support* dan pipa terhadap tanah profil WF adalah 4.7 ton sedangkan daya dukung tanah maksimum adalah 9.6 ton, maka *support* sebanyak 5 buah aman untuk dipasang pada bagian atas tanah tersebut. Untuk analisa beban tanah *support* U-ditch digunakan persamaan 7 didapatkan hasil berat *support* u-ditch 8.3 ton. Berat tanah yang dapat menopang berat *support* U-Ditch dan pipa dihitung berdasarkan persamaan 9 yaitu daya dukung tanah maksimum 21.94 ton. Karena Berat *support* dan pipa terhadap tanah *support* u-Ditch didapatkan nilai 8.3 ton, sedangkan daya dukung tanah maksimum didapatkan hasil 21.94 ton, maka *support* u-ditch sebanyak 5 buah aman untuk dipasang pada bagian atas tanah tersebut.

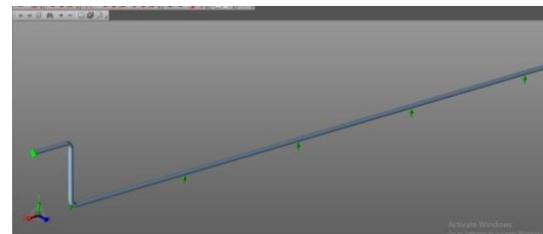
3.2 Analisa Buoyancy Force

Analisa *buoyancy force* dapat dihitung menggunakan persamaan 10 dan 11. Sehingga didapatkan hasil, gaya angkat persatuan panjang -

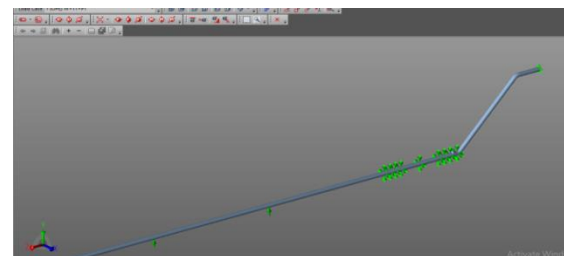
1397 lb/inch dan gaya angkat sebesar -3300 lb. Gaya angkat per satuan panjang yang dihasilkan bernilai *negative*. Maka *pipeline* memiliki *downward force* yang mengakibatkan *pipeline* tidak mengalami *floating* atau *buckling*.

3.4 Hasil Simulasi Software Caesar

Nilai tegangan pada pipa *above sea floor* yang diakibatkan oleh beban operasi terbesar berada pada node 30 dengan nilai tegangan sebesar 18873.82 psi. Tegangan yang diakibatkan oleh beban operasi memenuhi kriteria ASME B3.4 dimana tegangan yang ditimbulkan akibat beban operasi sebesar 25.200 psi. Sedangkan tegangan yang diakibatkan oleh beban ekspansi sebesar 19669.79 psi. Tegangan yang diakibatkan oleh beban ekspansi telah memenuhi kriteria ASME B3.4 dimana tegangan yang ditimbulkan akibat beban ekspansi adalah sebesar 31500 psi. *Pipeline* dimodelkan pada software *Caesar II*. Hasil *modeling* dapat dilihat pada gambar 1 a dan b.



(a) Above sea floor pipe dan above ground



(b) Above ground pipe dan buried pipe
 Gambar 1 Hasil modeling Caesar II

Berdasarkan data hasil simulasi software Caesar dengan tegangan yang diakibatkan oleh beban operasi dan ekspansi pada kondisi temperatur operasi serta beban sustain dan hasil perhitungan manual ditunjukkan pada tabel 1.

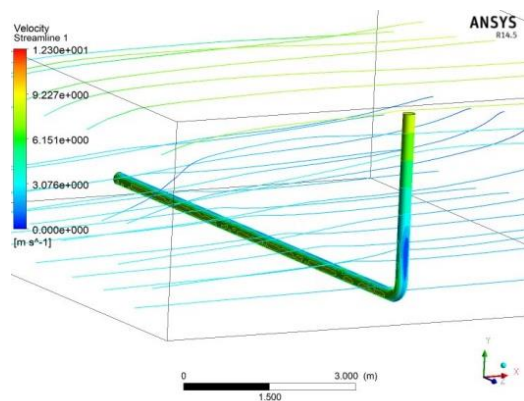
Tabel 1. Stress Report Caesar Software

No	Load Case	Stress (psi)	Allowable stress (psi)	Status
1	Operating	18873.82	31500	Accept
2	Sustained	6642.61	18900	Accept
3	Expantion	19669.79	25200	Accept

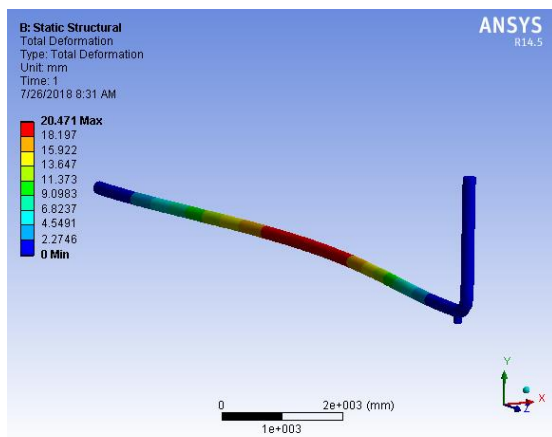
3.5 Hasil Simulasi Software ANSYS

Bagian pipa yang mengalami tegangan terbesar adalah bagian yang langsung bertabrakan dengan arus

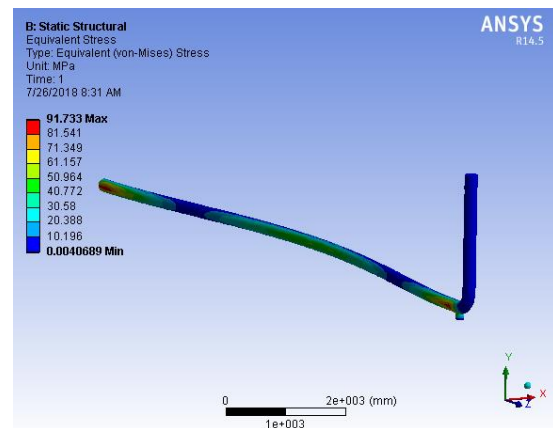
laut [11]. Pada gambar 2a menunjukkan bahwa pipa paling atas menerima tekanan besar akibat terkena gelombang arus air laut sedangkan semakin kebawah semakin kecil pula arus laut sehingga tekanan yang diterima pipa juga semakin kecil. Pada gambar 2b menunjukkan hasil dari software ANSYS nilai *total deformation* terbesar yang dialami pipa terletak pada bagian tengah sebesar 20.47 mm dengan *stress* 50.96 MPa atau 7391.12 psi. Sedangkan dari gambar 2c didapatkan *Equivalent von-Mises Stress* terbesar adalah 91.73 MPa atau 13304.3 psi yang terletak pada bagian ujung pipa yang diberi *support*. Pada bagian yang terdeformasi tersebut merupakan potensi terjadinya lateral buckling yaitu buckling ke arah samping karena *velocity inlet* dari arah -x sehingga deformasi terjadi ke arah x.



(a) Distribusi Kecepatan Fluida pada Pipa



(b) Total Deformasi Pipa



(c) Equivalent von-Mises Stress
 Gambar 2 Hasil Simulasi Software ANSYS

3.6 Analisa Tegangan Crossing Highway

Perhitungan tegangan *crossing highway* dilakukan agar desain yang dibuat tidak melebihi *allowable stress* sesuai dengan [2]. pada persamaan 12 maka dilakukan pengecekan tegangan efektif, didapatkan nilai sebesar 7241.63 psi dan $SMYS \times F = 21000$ psi. Sehingga desain pipeline masih aman terhadap tegangan yang terjadi.

$$S_{eff} \leq SMYS \times F = 7241.63 \text{ psi} \leq 21000 \text{ psi}$$

3.7 Analisa Tegangan Longitudinal

Tegangan longitudinal diperoleh dari jumlah (Total) tegangan ekspansi *thermal*, tegangan *circumferential* (hoop), *bending moment*, dan *axial force*. Digunakan persamaan 13 untuk menghitung tegangan longitudinal. Menghitung tegangan tekuk dan aksial mengacu pada rumus di buku [5].

Tabel 2. Hasil Perhitungan Manual dan Software Caesar II

NO	Stress (psi)	Perhitungan Manual	Hasil Software Caesar II
1	Hoop	2001	1740.45
2	Ekspansi	10168.47	19669.79
3	Bending	7266.48	5753.69
4	Axial	798.24	953.73
5	Longitudinal	18833.49	26899.35

Pada tabel 2 menunjukkan *stress report* antara perhitungan manual dan software Caesar II. Hasil tegangan aksial sebesar 798.24 psi dan tegangan tekuk sebesar 7266.48 psi. Didapatkan juga tegangan longitudinal sebesar 18833.49.

3.8 Analisa Equivalent Combined Stress

Pada pipa kondisi *restrained* tegangan longitudinal dan *circumferential* dapat digabung sesuai dengan *maximum shear stress theory* dan *maximum distortion energy* yang dihitung dengan menggunakan persamaan 28 dan persamaan 29. Didapatkan hasil *maximum shear stress theory* sebesar 15966.39 psi dan *maximum distortion energy* sebesar 17054.75 psi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan, analisa, dan pemodelan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Minimal *wall thickness* yang didapat adalah 0.029 in sehingga berdasarkan API 574 tabel 1 dipilih *schedule 20* dan *inside diameter* 8.125 in.
- Dari hasil perhitungan, jarak maksimum antar *support* pada desain *pipeline* adalah 12.7 m dengan jumlah *support* 6 yaitu 1 pada *above ground* dan 5 pada *above sea floor*. Sedangkan untuk analisa beban tanah yang hanya mampu menahan beban 8 ton/25m² menunjukkan bahwa berat *support* dan pipa terhadap tanah profil WF adalah 4.7 ton. Daya dukung tanah maksimum adalah 9.6 ton. Karena hasil dari Berat *support* dan pipa terhadap tanah profil WF lebih kecil dari daya dukung tanah maksimum, maka *support* sebanyak 5 buah *support* dapat dipasang pada bagian atas tanah tersebut. Begitu juga dengan hasil perhitungan tipe *support* U-ditch yaitu berat *support* dan pipa terhadap tanah tipe *support* U-Ditch sebesar 9.1 ton, sedangkan daya dukung tanah maksimum 21.89 ton. Karena hasil dari Berat *support* dan pipa terhadap tanah *support* U-Ditch lebih kecil dari daya dukung tanah maksimum, maka *support* sebanyak 5 *support* U-Ditch juga dapat dipasang pada bagian atas tanah tersebut. Jadi pemilihan jenis *support* terhadap tanah untuk pipa *above sea floor* dapat digunakan *support* profil WF tipe 200x150 dengan berat 30.6 kg/m atau *support* U-ditch tipe wxhxL= U 100x120x120 dengan berat 945 kg/1.2 m²
- Dari hasil perhitungan, nilai *Buoyancy force* atau gaya angkat per satuan panjang bernilai negatif yaitu -1.397 lb/inch. Sehingga *pipeline* memiliki *downward force* yang mengakibatkan *pipeline* tidak mengalami floating atau *buckling*.
- Berdasarkan hasil perhitungan tegangan *crossing highway*, didapatkan tegangan efektif, $S_{eff} = 6430.66$ psi dan $SMYS \times F = 21000$ psi maka rancangan *pipeline* pada kondisi *buried pipe* mampu dilalui oleh kendaraan berat yaitu truk *Tandem*. Hal tersebut karena tegangan efektif yang didapat lebih kecil dari *allowable stress*.

- Desain awal dengan elbow 45° sistem perpipaan menggunakan software Caesar mengalami over *stress* pada kondisi operating dan *expansion* dengan nilai *operating stress* terbesar adalah 124188.5 psi dan *expansion stress* terbesar adalah 116548.2 psi. Oleh karena itu dilakukan desain ulang dengan mengganti elbow 45° menjadi elbow 90°. Sehingga didapatkan operating *stress* terbesar 18873.82 psi dan *expansion stress* terbesar adalah 19669.79 psi. Hasil tersebut kurang dari *allowable operating stress* 31500 psi dan *allowable expansion stress* 25200 psi. Untuk perhitungan manual tegangan longitudinal didapatkan hasil 18833.49 yang juga masih lebih kecil dari *allowable stress*nya yaitu 18900 psi. Berdasarkan *allowable stress* ASME B31.4 dan software Caesar, *stress* baik perhitungan manual atau software tidak memiliki *stress* yang berlebih sehingga tegangan pada desain *pipeline* adalah aman.
- Gelombang air laut memberikan dampak terhadap pipa karena perbedaan kedalaman. Pipa paling atas menerima tekanan lebih besar daripada pipa bagian bawah karena adanya gelombang air laut yang langsung menabrak permukaan pipa. Dari hasil simulasi didapatkan deformasi pada pipa sebesar 20.47 mm dengan besar tegangan 7391.12 psi. Sedangkan *allowable stress* pada pipa berdasarkan B31.4 adalah 25200 psi. Oleh karena itu tegangan pada pipa yang mengalami deformasi masih lebih kecil dari pada *allowable stress*, sehingga pipa masih dalam kondisi aman atas terjadinya potensi lateral *buckling*.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu dalam pembuatan penelitian ini. Pihak yang dimaksud adalah:

1. Kedua orang tua yang telah memberikan dukungan materi, motivasi, kasih sayang, do'a, dan nasehat hidup bagi penulis.
2. Bapak George Endri Kusuma, selaku dosen pembimbing I yang selalu memberi pengarahan dan bimbingan selama pengerjaan jurnal tugas akhir.
3. Bapak Priyo Agus Setiawan, selaku dosen pembimbing II yang selalu memberi pengarahan dan bimbingan selama pengerjaan jurnal tugas akhir.
4. Pembimbing dari PT WELTES proyek TNU yang namanya tidak bisa disebutkan satu persatu.
5. Keluarga besar Program Studi Teknik Perpipaan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abidin, Zenal. 2008. *Analisis On Bottom Stability dan Instalasi Pipa Bawah Laut di Daerah Shore Approach*. Bandung: Digilib.
- [2] API 1102. 2007. *Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways*
- [3] API 574. 2009. *Inspection Practices for Piping System Components*
- [4] ASME B31.4. 2009. *Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*
- [5] Chamsudi, Ahmad. 2005. *Diktat – Piping Stress Analysis*
- [6] Fahmi, Asywida, Mardi S., dan Adi W.H. (2016). *Analisis Potensi Upheaval Buckling Di 10"-Ch-Pg-032 Trunkline Dari Spg Kuang Ke Spg Pakugajah Pada Pakugajah Development Project (PGDP)*. 1nd Conference of Piping Engineering and its Application. Surabaya: PPNS
- [7] Liu, M. dan C. Cross. 2018. *Subsea Pipeline Lateral Buckling Design-Strain Concentration or strain capacity reduction factors*. Journal of offshore mechanics and arctic engineering. ASME Digital Collection
- [8] Mondal, Bipul Chandra dan Ashutosh Sutra Dhar. 2017. *Upheaval buckling of surface-laid offshore pipeline*. Applied Ocean Research 66, Canada
- [9] PHMSA. 2015. *Pipeline Safety Regulations 49 CFR Part 192*
- [10] Prasetyo, A.F., George E.K., dan Daisy D.K.R.A. (2017). *Analisa Redesain Support Pipeline Aboveground KM 00.950 – KM 01.100 Jalur Balongan – Mundu di Pesisir Balongan*. 2nd Conference of Piping Engineering and its Application. Surabaya: PPNS.
- [11] Ramadani, Rafli. dkk. 2015. *Analisa Tegangan pada Vertical Subsea Gas Pipeline Akibat Pengaruh Arus dan Gelombang Laut dengan Metode Elemen Hingga*. Vol 4 no 2. Surabaya : Jurnal Teknik ITS.
- [12] Kannappan, Sam, P.E. 1986. *Introduction to Pipe Stress Analysis*. A Wiley-Interscience Publication