

Analisa Pengaruh *Water Hammer* Terhadap Nilai *Strees* Pipa Pada Sistem *Loading-Offloading* PT.DABN

Tri Adi Siswanto, Hari Prastowo, dan Beni Cahyono

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: triadi_siswanto@yahoo.com

Abstrak—Jalur pipa (pipeline) merupakan media yang digunakan sebagai alat transportasi fluida (cair atau gas), *mixed of liquid, solid* dan *fluid-solid mixture*. Ada beberapa tahap penting dalam siklus suatu jalur perpipaan yang digunakan sebagai alat transportasi minyak atau gas: desain, konstruksi, operasional dan pemeliharaan, dan terakhir perbaikan. Operasional merupakan proses kemungkinan terbesar terjadinya kegagalan pada suatu jalur perpipaan. Salah satu kegagalan yang mungkin terjadi adalah fenomena *water hammer*. *Water hammer* adalah sebuah fenomena terjadinya kenaikan tekanan yang disebabkan oleh terhenti atau dihentikannya aliran di dalam pipa secara mendadak. Hal ini bisa disebabkan oleh operasional penutupan katup yang dilakukan secara tiba-tiba. Pada paper ini akan dijelaskan kajian mengenai pengaruh kenaikan tekanan yang terjadi karena adanya fenomena *water hammer* terhadap nilai tegangan jalur perpipaan di sisi *discharge*. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa kenaikan tekanan akibat fenomena *water hammer* sangat mempengaruhi naiknya nilai tegangan pada pipa. Hasil analisa menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi ketika fenomena *water hammer* masih dapat diterima, tetapi kenaikan tekanan ketika terjadi fenomena *water hammer* melebihi dari batas yang diizinkan sehingga perlu dilakukan prosedur penutupan katup yang sesuai untuk menjaga agar pada saat dioperasikan pipa dalam kondisi aman.

Kata Kunci—Jalur Pipa, *Water Hammer*, Tegangan Pipa

I. PENDAHULUAN

SEBAGAI perusahaan yang bergerak dibidang penyimpanan dan trading BBM, PT. DABN harus tetap bisa menjaga harga yang kompetitif, mutu yang terjaga, dan jaminan kontinuitas supply. Untuk memperoleh jaminan kontinuitas supply, jalur perpipaan harus dapat memberikan performa yang maksimal sehingga kontinuitas dapat terpenuhi. Untuk itu perlu dilakukan analisa mengenai kemampuan pipa menahan tekanan pada saat operasional. Ini untuk mengetahui apakah *stress* yang terjadi ketika jalur pipa dioperasikan masih dapat diterima atau tidak.

Analisa dilakukan pada sisi tekan (*discharge*) jalur pipa *offloading* yang terpasang di PT. DABN.

II. TINJAUAN PUSATAKA

Jalur perpipaan (*pipeline*) merupakan bagian yang sangat penting di dalam industri minyak dan gas. Jalur perpipaan berfungsi sebagai media mengalirnya fluida dari satu tempat ke

TABEL 1.1.

STANDARD DESAIN, KONSTRUKSI DAN PEMELIHARAAN

Onshore	
ASME B31.4	Oil pipelines
ASME B31.8	Gas pipelines
IGE/TD/1	Gas pipelines
PD 8010	Oil and gas pipelines
AS 2885	Oil and gas
Offshore	
ASME B31.4	Oil pipelines
ASME B31.8	Gas pipelines
IGE/TD/1	Gas pipelines
PD 8010	Oil and gas pipelines
AS 2885	Oil and gas

tempat lainnya. Fluida yang mengalir di dalamnya dapat berupa cair atau gas yang mempunyai tekanan dan temperature tertentu. Pada umumnya material yang digunakan sebagai jalur perpipaan pada industri minyak dan gas terbuat dari metal yang memiliki karaktersitik tertentu, sehingga pada saat dioperasikan jalur perpipaan harus dijamin dalam kondisi aman.

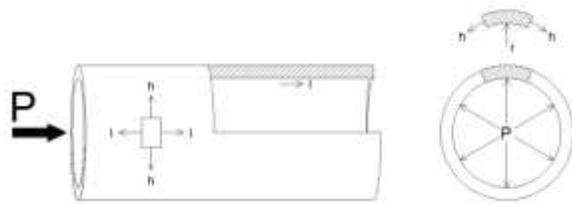
A. Jalur Pipa

Jalur pipa (*pipeline*) merupakan media yang digunakan sebagai alat transportasi fluida (*liquid* atau *gas*), *mixed of liquid, solid* dan *fluid-solid mixture*. Ada beberapa tahap penting dalam siklus suatu jalur perpipaan yang digunakan alat transportasi minyak atau gas: desain, konstruksi, operasional dan pemeliharaan, dan terakhir perbaikan. Oleh karena itu ada beberapa hal yang harus diperhatikan pada desain suatu jalur pipa (*pipeline*), hal-hal tersebut adalah sebagai berikut:

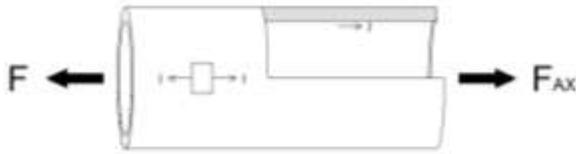
- *Standard* harus sesuai dengan tujuan jalur pipa dibuat.
- Pemilihan jenis pipa dan material yang digunakan.
- *Routing* jalur pipa harus dilakukan sebaik mungkin untuk meminimalisasi kebutuhan pipa tanpa mengganggu dan mengurangi keandalan jalur pipa.
- Perhitungan dan pemilihan ketebalan dinding pipa harus menjamin jalur pipa dapat dioperasikan secara maksimal dan aman.

B. Standard

Di dalam perencanaan jalur perpipaan diperlukan suatu standard yang digunakan sebagai acuan perencanaan. Standard

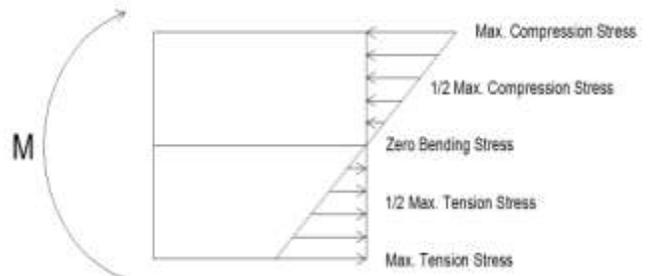


Gambar 1. Stress yang terjadi pada pipa



Gambar 2. Axial stress

yang terjadi dapat disebabkan karena anchor atau karena tersambungnyanya pipa dengan sebuah *equipment*. Perlu



Gambar 3. Bending stress

yang banyak digunakan khususnya, untuk jaringan pipa minyak dan gas di seluruh dunia adalah diperlihatkan pada tabel 1.1.

C. *Beban-Beban Pada Jalur Pipa*

Pipa menerima beban baik akibat berat pipa itu sendiri, berat fluida di dalamnya, akibat tekanan dari dalam pipa (*internal pressure*), temperature fluida, angin maupun gempa bumi. Beban pada pipa dapat dibagi menjadi beberapa kondisi pembebanan:

- Sustained load
- Operating load
- Intermitten load

D. *Sustained Load*

Sustained load adalah kombinasi dari *weight load* dan beban yang dihasilkan oleh *internal pressure*. Beban yang timbul karena berat (*weight load*) dibagi menjadi dua kategori, *dead load* dan *live load*.

Arah beban yang ditimbulkan karena berat pipa dan/ atau berat fluida di dalam pipa mengarah ke tanah sehingga untuk pipa yang terpasang di atas permukaan harus dilengkapi dengan pendukung yang berfungsi sebagai penyangga.

Beban yang dihasilkan oleh *internal pressure* yang bekerja pada jalur perpipaan dihasilkan dari tekanan fluida di dalam pipa. Sehingga beban ini tergantung dari tekanan yang bekerja pada saat pengoperasian jalur perpipaan.

Besarnya *sustained load* dapat dihitung berdasarkan persamaan dari ASME B31.3 sebagai berikut :

$$S_L = \frac{PD}{4.t_w} + \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z} \tag{1}$$

E. *Operating Load*

Pada saat jalur perpipaan beroperasi akan timbul beberapa beban yang sebagian besar berupa beban dinamis, contohnya beban diakibatkan oleh kecepatan aliran, tekanan operasi dari pompa, penurunan tekanan, dan *water hammer*. Selain beban dinamis, beban yang timbul karena pengoperasian jalur perpipaan adalah *thermal load*. Beban ini ditimbulkan akibat diluarnya expansion atau contraction suatu pipa yang mengalami pemuaian ataupun pengkerutan akibat temperature fluida yang mengalir di dalamnya. Penahanan (*restriction*)

diperhatikan bahwa *thermal load* bersifat siklus, artinya jika anchor dilepas atau fluida dihentikan mengalir, maka hilang pula beban yang ditimbulkannya.

F. *Intermitten Load*

Intermitten load tidak selalu terjadi pada jalur perpipaan sepanjang waktu. Beban ini hanya terjadi pada kondisi tertentu, contohnya saat dilakukan pengujian tekanan, beban angin, beban gempa, *water hammer*, dan lain-lain. Meskipun beban ini tidak sering terjadi, hal ini harus tetap dipertimbangkan dalam perancangan suatu jalur perpipaan karena beban ini mungkin memiliki pengaruh terbesar pada struktur.

G. *Tegangan Pada Pipa*

Stress yang terjadi pada jalur perpipaan dapat dilihat pada gambar 1. Dari gambar 1. ditunjukkan bahwa pada saat pipa dialiri fluida bertekanan, maka pipa akan mengalami *stress*. *Stress* yang terjadi pada pipa tersebut adalah:

- h : *Hoop stress* (arahnya melingkar pipa)
- l : *Longitudinal stress* (memanjang pipa), dan
- r : *Radial stress* (tegak lurus dinding pipa).

H. *Hoop Stress (Tegangan Tengensial)*

Tegangan tangensial adalah tegangan yang ditimbulkan oleh tekanan internal (*internal pressure*) yang bekerja secara tangensial dan nilainya tergantung dari tebal dinding pipa.

- Tegangan tangensial karena beban dari dalam pipa (*stress due to internal load*)

Besarnya tegangan tangensial yang terjadi karena *internal load* dapat dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102 sebagai berikut:

$$S_{Hi} = \frac{PD}{2.t_w} \tag{2}$$

- Tegangan tangensial karena beban tanah (*stresses due to earth load*)

Besarnya tegangan tangensial yang terjadi karena beban tanah yang menimbun jalur perpipaan terpendam dapat dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102 sebagai berikut:

$$S_{He} = K_{He} \cdot G_{He} \cdot E_e \cdot \gamma \cdot D \tag{3}$$

Keterangan :

- K_{He} : Stiffness factor for circumferential stress from earth load
- B_c : Burial factor for circumferential stress
- E_c : Excavation factor for circumferential
- γ : Unit weight of soil

$$S_B = \frac{M.c}{i} = \frac{M}{Z} \tag{5}$$

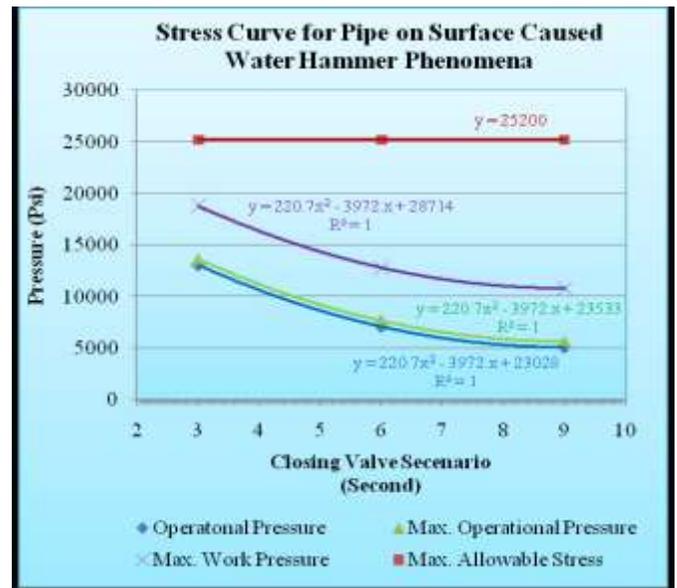
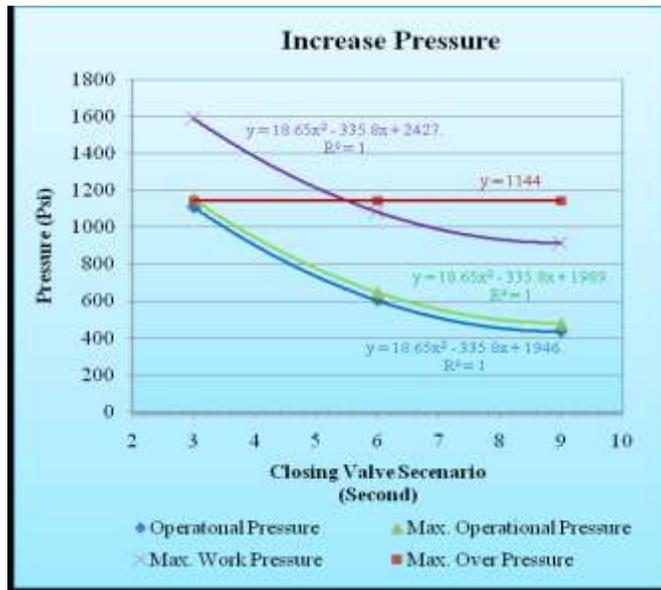
- Tegangan longitudinal karena beban dari dalam pipa

TABEL 2

Operation	Inlet Pressure	Increase Pressure		
		3 Sec.	6 Sec.	9 Sec.
OP	99,5634	1106,99	603,281	435,375
MOP	142,233	1149,66	645,950	478,045
MAWP	580,151	1587,58	1083,86 8	915,963

TABEL 3

Operat.	Hoop Stress			Accep. Criteria
	3 Sec.	6 Sec.	9 Sec.	
OP	13096,18	7137,027	5150,642	25200
MOP	13600,98	7641,824	5655,438	25200
MAWP	18781,70	12822,550	10836,165	25200



D : Outside Diameter of pipe

I. Longitudinal Stress

Tegangan longitudinal adalah tegangan yang kerja secara longitudinal atau searah sumbu pipa. Tegangan longitudinal terdiri dari Tegangan Aksial (*Axial Stress*), Tegangan Tekuk (*Bending Stress*), dan Tegangan Longitudial (*Longitudinal Stress*).

- Tegangan Aksial (*Axial Stress*)

Tegangan aksial adalah tegangan yang terjadi karena adanya gaya yang bekerja searah dengan sumbu pipa.

Besarnya nilai dari tegangan aksial (*axial stress*) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$S_{AX} = \frac{F_{AX}}{A} \tag{4}$$

- Tegangan Tekuk (*Bending Stress*)

Tegangan tekuk adalah tegangan yang terjadi karena adanya moment yang bekerja pada ujung-ujung pipa.

Besarnya nilai dari tegangan tekuk (*bending stress*) dihitung menggunakan persamaan berikut:

Besarnya *longitudinal stress* yang terjadi karena *internal pressure* dapat dihitung menggunakan persamaan dari ASME B31.3 sebagai berikut:

$$S_L = \frac{P D}{4.t_w} \tag{6}$$

- Tegangan longitudinal karena beban kendaraan (*longitudinal stress due to highway vehicular load*)

Besarnya *longitudinal stress* yang terjadi karena beban kendaraan yang melintasi jalur perpipaan terpendam dapat dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102 sebagai berikut:

$$S_{Lh} = K_{Lh} \cdot G_{Lh} \cdot R \cdot L \cdot F_i \cdot w \tag{7}$$

- Tegangan longitudinal karena beban termal (*longitudinal stress due to thermal load*)

Besarnya *longitudinal stress* yang terjadi karena temperatur fluida kerja dapat dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102 sebagai berikut:

$$S_{LT} = E_s \alpha_T (T_2 - T_1) \tag{8}$$

J. Radial Stress

Nilai dari tegangan radial yang ditimbulkan karena adanya tekanan dari dalam pipa bervariasi pada dinding dalam pipa dan dinding luar pipa. Nilai tegangan radial terbesar (maksimum) terjadi pada dinding dalam pipa, sedangkan nilai tegangan radial terkecil (minimum) terjadi pada dinding luar pipa. Besarnya *radial stress* dapat dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102, sebagai berikut:

$$S_R = - P \tag{9}$$

Keterangan :

S_R : Radial stress

P : Internal pressure

K. Principal Stress

Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui *stress* efektif yang akan diterima oleh pipa. *Stress* efektif di peroleh dari penjumlahan seluruh *stress* yang terjadi pada pipa, dimana dirumuskan sebagai berikut :

- Max. Circumferential stress

Besarnya *maximum circumferential stress* dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102 sebagai berikut :

$$S_1 = S_{He} + S_{Hi} + S_{Hh} \tag{10}$$

- Max. Longitudinal Stress

Besarnya *maximum longitudinal stress* dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102 sebagai berikut :

$$S_2 = \Delta S_L - E_s \alpha_T (T_2 - T_1) + V_s \times (S_{He} + S_{Hi}) \tag{11}$$

- Max. Radial stress

Besarnya *maximum radial stress* dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102 sebagai berikut :

$$S_3 = - P \tag{12}$$

- Total Effective Stress

Besarnya *total effective stress* dihitung menggunakan persamaan dari API RP 1102 sebagai berikut :

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2} [(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2]} \tag{13}$$

L. Water hammer

Fenomena *water hammer* terjadi pada fluida yang bersidat tak termampatkan (*incompressible*). Terjadinya fenomena *water hammer* berpengaruh pada naiknya tekanan yang dapat menyebabkan sebuah pipa pecah. Ada beberapa hal-hal yang dapat menyebabkan terjadinya fenomena *water hammer*, antara lain:

- Penutupan katup secara tiba-tiba
- Pada waktu pertama kali pompa dinyalakan
- Terbloknnya jalur pipa

Untuk menghitung kenaikan tekanan karena terhentinya aliran pada saat operasional katup digunakan persamaan sebagai berikut :

$$P = \frac{0,07 \times v \times L}{t} + P_i \tag{14}$$

III. ANALISA

A. Basic Data

a. Pipe and Operation Characteristics

Outside diameter	: 6,625	inch
Operating pressure	: 99,563	psi
Max. Operating pressure	: 142,233	psi
Max. Working pressure	: 580,151	psi
Steel Grade	: API5L Grd. B	
SMYS	: 35000	psi
Design factor	: 0,720	
Longitudinal joint factor	: 1,00	
Installation temperature	: N/A	
Max. operating temperature	: N/A	
Min. operating temperature	: N/A	
Temperature derating factor	: N/A	
Wall thickness	: 0,280	inch
Pipe Weight Per-Unit Length	: 18,99	lb/ft
Total length	: 4556,801	ft
Fluid Density	: 51,953	lb/ft ³

b. Installation and site characteristics

Depth	: 6	ft
Bored diameter	: 8,625	inch
Soil type	: Loose sand	
Modulus of soil reaction	: 0,500	ksi
Resilient modulus of soil	: 10	ksi
Unit weight of Soil	: 0,069	lb/in ³
Type of longitudinal weld	: ERW	
Design wheel load	: 10	kips
Pavement type	: Flexible	

c. Other pipe steel properties

Young's modulus	: 29500	ksi
Poisson's ratio	: 0,300	
Coeff. of thermal expansion	: 6×10^{-6}	per ^o F

B. Kenaikan Tekanan Kareana Fenomena Water Hammer

Berdasarkan persamaan (14) diperoleh kenaikan tekanan yang diakibatkan karena terjadinya fenomena *water hammer* sebagai berikut:

Dapat diamati dari hasil perhitungan dan grafik yang disajikan, bahwa pada saat jalur perpipaan diperasikan pada *maximum work pressure* dengan sekenario penutupan katup 3 detik menghasilkan tekanan sebesar 1587,586 psi. Kenaikan yang disebabkan oleh fenomena *water hammer* ini melebihi dari batas kenaikan tekanan yang diizinkan yaitu sebesar 1144 psi.

C. Stress pada Pipa di Atas Permukaan Tanah

Berikut ini adalah hasil perhitungan *stress* pipa di atas permukaan tanah saat terjadi fenomena *water hammer*.

Dapat diamati dari hasil perhitungan dan grafik yang telah disajikan, nilai *hoop stress* terbesar pada saat terjadi fenaomena *water hammer* adalah 18781,7 psi, yang terjadi ketika tekanan pada jalur perpipaan naik dari 580,151 psi menjadi 1587,6 psi. Besarnya *stress maximum* yang diizinkan adalah 25200 psi, sehingga nilai *hoop stress* yang disebabkan

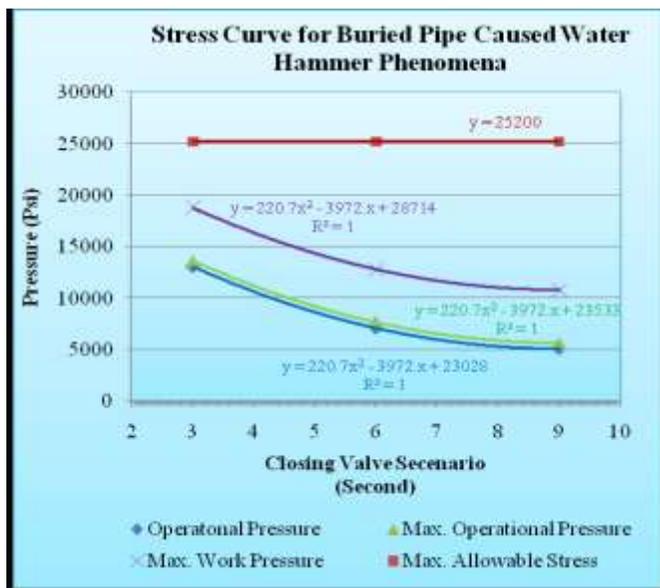
karena terjadinya fenomena *water hammer* saat jalur perpipaan dioperasikan masih dapat diterima

D. Stress pada Pipa Terpendam

Berikut ini adalah hasil perhitungan *stress* pipa terpendam saat terjadi fenomena *water hammer*. Perhitungan dilakukan pada saat jalur perpipaan dioperasikan dengan kondisi *operational pressure* (99,563 psi), *max. operational pressure* (142,233 psi), dan *max. work pressure* (580,151 psi), dengan spesifikasi pipa yang digunakan mengacu pada API 5L Grade B diameter 6 inch.

TABEL 4
HOOP STRESS

Operat.	Hoop Stress			Accep. Criteria
	3 Sec.	6 Sec.	9 Sec.	
OP	13096,18	7137,027	5150,642	25200
MOP	13600,98	7641,824	5655,438	25200
MAWP	18781,70	12822,550	10836,165	25200



Dapat diamati dari hasil perhitungan dan grafik yang telah disajikan, nilai *hoop stress* terbesar pada saat terjadi fenaomena *water hammer* adalah 18781,7 psi, yang terjadi ketika tekanan pada jalur perpipaan naik dari 580,151 psi menjadi 1587,6 psi. Besarnya *stress maximum* yang diizinkan adalah 25200 psi, sehingga nilai *hoop stress* yang disebabkan karena terjadinya fenomena *water hammer* saat jalur perpipaan dioperasikan masih dapat diterima.

Nilai *effective stress* terbesar pada saat terjadi fenaomena *water hammer* adalah 20706,592 psi, yang terjadi ketika tekanan pada jalur perpipaan naik dari 580,151 psi menjadi 1587,6 psi. Besarnya *stress maximum* yang diizinkan adalah 25200 psi, sehingga nilai *effective stress* yang disebabkan karena terjadinya fenomena *water hammer* saat jalur perpipaan dioperasikan masih dapat diterima.

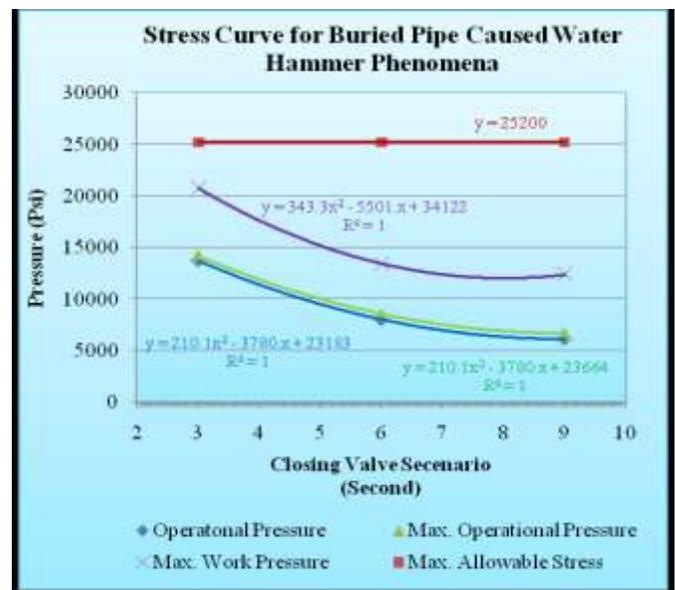
E. Stress pada elbow 90°

Berikut ini adalah hasil perhitungan *stress* pada *elbow 90°* terpendam saat terjadi fenomena *water hammer*. Perhitungan dilakukan pada saat jalur perpipaan dioperasikan dengan kondisi *operational pressure* (99,563 psi), *max. operational pressure* (142,233 psi), dan *max. work pressure* (580,151 psi), dengan spesifikasi pipa yang digunakan mengacu pada API 5L Grade B diameter 6 inch.

Dapat diamati dari hasil perhitungan dan grafik yang telah disajikan, nilai *hoop stress* terbesar pada saat terjadi fenaomena *water hammer* adalah 18781,7 psi, yang terjadi ketika tekanan pada jalur perpipaan naik dari 580,151 psi menjadi 1587,6 psi. Besarnya *stress maximum* yang diizinkan adalah 25200 psi,

TABEL 5
EFFECTIVE STRESS.

Operat.	Effective Stress			Accep. Criteria
	3 Sec.	6 Sec.	9 Sec.	
OP	31,63	52,502	75,351	25200
MOP	12,08	42,408	54,679	25200
MAWP	06,59	71,198	15,487	25200



sehingga nilai *hoop stress* yang disebabkan karena terjadinya fenomena *water hammer* saat jalur perpipaan dioperasikan masih dapat diterima.

Nilai *effective stress* terbesar pada saat terjadi fenaomena *water hammer* adalah 20706,592 psi, yang terjadi ketika tekanan pada jalur perpipaan naik dari 580,151 psi menjadi 1587,6 psi. Besarnya *stress maximum* yang diizinkan adalah 25200 psi, sehingga nilai *hoop stress* yang disebabkan karena terjadinya fenomena *water hammer* saat jalur perpipaan dioperasikan masih dapat diterima.

IV. KESIMPULAN

Dari analisa hasil perhitungan yang mengacu pada API RP 1102, ASME B31.3, dan ASME B31.4 yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

- Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, besarnya penambahan nilai *internal pressure* yang terjadi karena adanya fenomena *water hammer* adalah 1007,435 psi. Besarnya *internal pressure* yang terjadi ketika jalur perpipaan dioperasikan pada tekanan 580,151 psi adalah

TABEL 6
HOOP STRESS

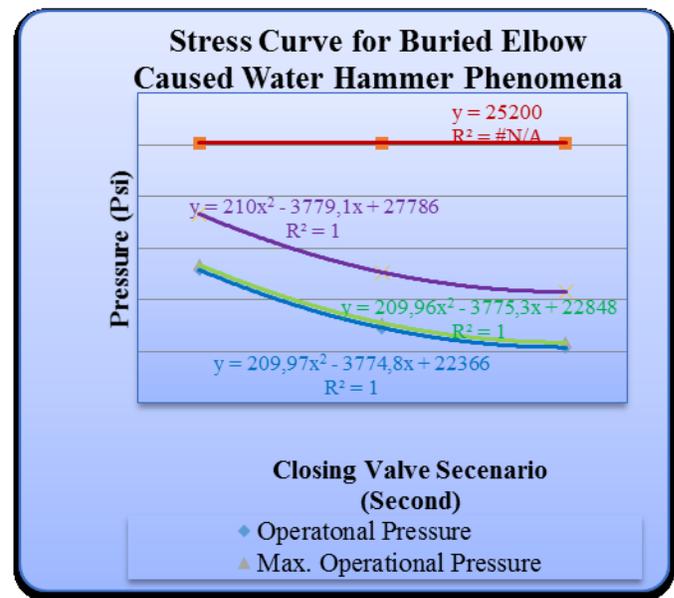
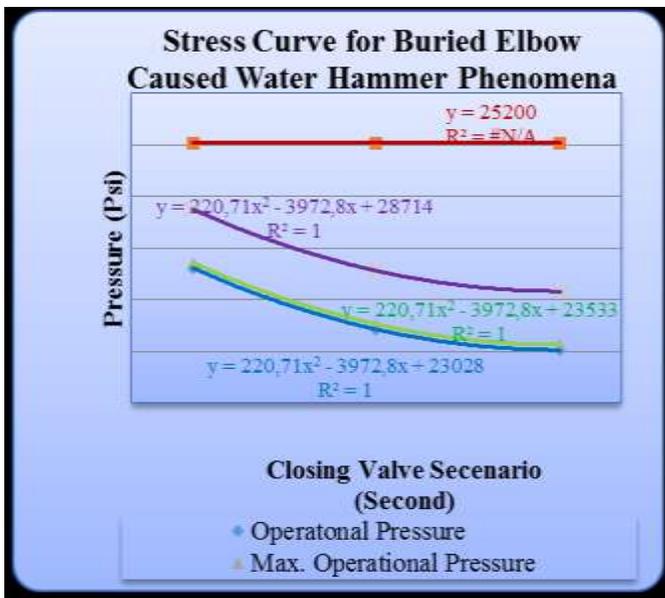
Operat.	Hoop Stress			Accep. Criteria
	3 Sec.	6 Sec.	9 Sec.	
OP	13096,184	7137,027	5150,642	25200
MOP	13600,981	7641,824	5655,438	25200
MAWP	18781,707	12822,55	10836,165	25200

1587,586 psi. Dengan nilai kenaikan tekanan maksimum yang diizinkan sebesar 1144 psi, sehingga kenaikan tekanan yang terjadi akibat fenomena *water hammer* tidak dapat diterima dan perlu evaluasi ulang.

- Nilai tegangan terbesar pada jalur perpipaan di atas permukaan ketika terjadinya fenomena *water hammer* adalah 18781,707 psi, nilai ini terjadi ketika *inlet pressure*

TABEL 7
EFFECTIVE STRESS

Operat.	Effective Stress			Accep. Criteria
	3 Sec.	6 Sec.	9 Sec.	
OP	31,74	76,739	11,246	25200
MOP	11,57	54,616	76,871	25200
MAWP	38,83	71,681	84,557	25200



mengalami kenaikan tekanan sebesar 1587,586 psi. Dengan nilai tegangan maksimum yang diizinkan sebesar 25200 psi, tegangan yang terjadi pada jalur perpipaan (*on surface*) di PT. DABN untuk masing pembebanan masih di bawah dari tegangan maksimum yang diizinkan sehingga jalur perpipaan tersebut cukup aman untuk dioperasikan.

psi, nilai ini terjadi ketika *inlet pressure* mengalami kenaikan tekanan sebesar 1587,586 psi. Dengan nilai tegangan maksimum yang diizinkan sebesar 25200 psi, tegangan yang terjadi pada elbow 90° terpendam (*buried*) di PT. DABN untuk masing pembebanan masih di bawah dari tegangan maksimum yang diizinkan sehingga elbow 90° tersebut cukup aman untuk dioperasikan.

- Nilai tegangan terbesar pada jalur perpipaan terpendam ketika terjadinya fenomena *water hammer* adalah 19172,207 psi, nilai ini terjadi ketika *inlet pressure* mengalami kenaikan tekanan sebesar 1587,586 psi. Dengan nilai tegangan maksimum yang diizinkan sebesar 25200 psi, tegangan yang terjadi pada jalur perpipaan (*buried*) di PT. DABN untuk masing pembebanan masih di bawah dari tegangan maksimum yang diizinkan sehingga jalur perpipaan tersebut cukup aman untuk dioperasikan.
- Nilai tegangan terbesar pada elbow 90° terpendam ketika terjadinya fenomena *water hammer* adalah 18781,707

- Dari perhitungan dan analisa yang telah dilakukan terdapat kondisi dimana kenaikan tekanan yang ditimbulkan oleh fenomena *water hammer* melebihi dari kenaikan tekanan yang diizinkan. Sehingga direkomendasikan untuk :
 - Mengurangi tekanan yang masuk kedalam sistem perpipaan dengan menambahkan *fitting regulator*.
 - Perencanaan operasional penutupan katup dilakukan dengan baik, tidak kurang dari 6 detik.

DAFTAR REFERENSI

[1]. API 5L. 2004. *Specification For Pipe Line*.

- [2]. API RP 1102. 2007. *Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways*.
- [3]. ASME B31.3. 2008. *Process Piping*
- [4]. ASME B31.4. 2002. *Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*.
- [5]. D. Alkazraji. *Quick Guide To Pipeline Engineering*. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington Cambridge Cb21 6ah. England
- [6]. McAlister. E.W. *Pipeline Rules of Thumb Handbook*. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. United States of America