

Simulasi dan Uji Kemampuan Sistem Perpipaan Pemadam Kebakaran di Perumahan Salonsa, Sorowako, Sulawesi Selatan dalam Menghadapi Fenomena *Water Hammer* Menggunakan *Software* AFT IMPULSE 7 dan CAESAR II

Raka Aditya Nugraha dan Nur Ikhwan
 Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ikhwan@me.its.ac.id

Abstrak—Sistem perpipaan pemadam kebakaran di perumahan Salonsa merupakan fasilitas yang vital, sistem ini tidak boleh rusak/gagal karena sistem harus bisa digunakan pada tiap waktu. Sistem perpipaan harus mampu bertahan dari fenomena *water hammer* yang menyebabkan fluktuasi tekanan. Akan dilakukan simulasi menggunakan *software* AFT Impulse dengan skenario *valve hydrant* ditutup dengan cepat, dan pompa yang mati mendadak, simulasi dilakukan untuk mengetahui efek dari fenomena *water hammer* pada sistem perpipaan. Simulasi kedua menggunakan *software* CAESAR II untuk mengetahui pembebanan yang terjadi di sepanjang sistem perpipaan pada kondisi tekanan normal dan ekstrim. Simulasi bertujuan untuk mengetahui apakah sistem perpipaan yang sudah ada dapat bertahan saat terjadi fenomena *water hammer*, simulasi juga bertujuan memberikan saran dan masukan untuk meningkatkan keamanan operasinya dari sistem perpipaan pemadam kebakaran yang sudah ada.

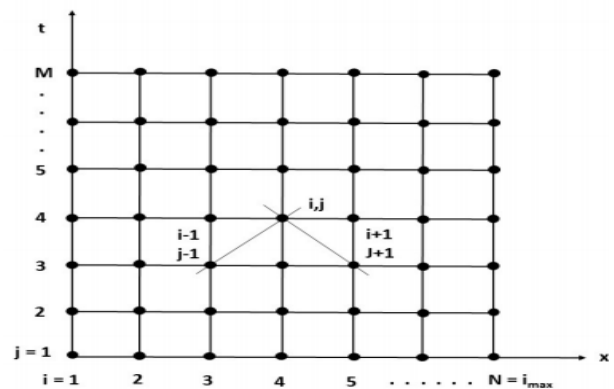
Kata Kunci—Hydrant, Fluktuasi, Tekanan, Pembebanan.

I. PENDAHULUAN

SISTEM perpipaan pemadam kebakaran pada perumahan Salonsa merupakan fasilitas yang vital. Sistem perpipaan ini harus bisa digunakan setiap waktu, oleh sebab itu sistem harus mampu bertahan dari segala macam kemungkinan yang dapat menyebabkan kegagalan sistem seperti fenomena *water hammer*. Fenomena ini menghasilkan kenaikan dan fluktuasi tekanan yang besar sehingga dapat merusak sistem perpipaan. Simulasi perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem perpipaan. Simulasi menggunakan *software* AFT Impulse 7.0 untuk mengetahui efek dari fenomena *water hammer* terhadap sistem perpipaan. Simulasi menggunakan dua skenario yaitu skenario *valve hydrant* ditutup dalam waktu singkat dan skenario pompa mati mendadak. Simulasi dilakukan sebanyak 28 kali tiap skenario. Simulasi kedua menggunakan *software* CAESAR II untuk mengetahui besarnya pembebanan yang terjadi di sepanjang sistem perpipaan yang disebabkan oleh tekanan internal. Tekanan yang digunakan pada simulasi ini yaitu tekanan operasional 500 kPa dan 1000 kPa, dan tekanan maksimum yang dihasilkan dari skenario AFT Impulse.

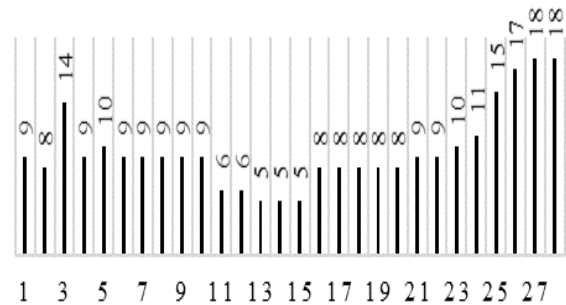
A. Tahap Telaah

Perumusan masalah yang menjadi dasar dilakukannya simulasi ini adalah sebagai berikut:



Gambar 1. *Computational mesh/grid with index for MOC*. Sumbu x merupakan selisih panjang pipa, sumbu x merupakan selisih waktu.

KETINGGIAN



Gambar 2. Grafik ketinggian hydrant di perumahan Salonsa. Terdapat 28 hydrant, semakin besar angkanya maka semakin jauh pula lokasi hydrant dari sumber aliran (rumah pompa).

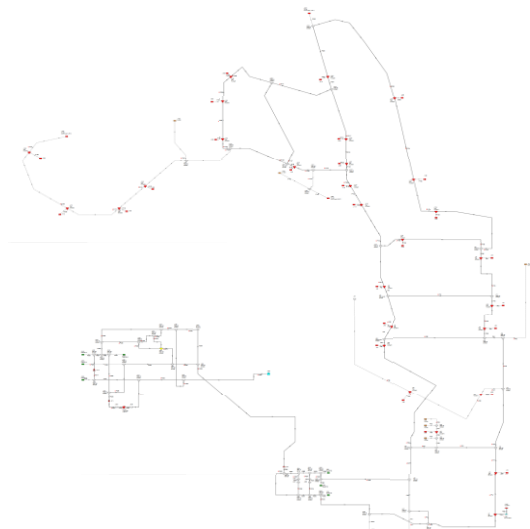
- Apakah asumsi tekanan akibat fenomena *water hammer* yang digunakan untuk mendesain sistem perpipaan pada tahun 1980 sudah benar
- Apakah sistem yang sudah ada mampu bertahan dalam menghadapi fenomena *water hammer* yang mungkin terjadi.
- Apakah diperlukan penambahan komponen maupun *support* pada sistem perpipaan.

B. Batasan Masalah

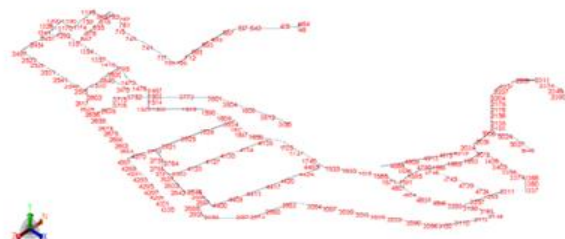
Berdasarkan permasalahan yang harus diselesaikan di atas maka perlu adanya pembatasan masalah serta ruang

Tabel 1.
Ukuran Pipa yang Digunakan Pada Sistem Perpipaan

NPS (in)	Outside Diameter	Schedule Number		wall thickness	Inside Diameter	Inside Area	Metal Area
		a	b				
4 in	4.5 in	40	std	0.237	4.026	12.73	3.17
6 in	6.625 in	40	std	0.28	6.065	28.89	5.58
8 in	8.625 in	40	std	0.322	7.981	50	8.4
10 in	10.75 in	40	std	0.365	10.02	78.9	11.91
12 in	12.75 in	40	std	0.406	11.938	113.1	14.58



Gambar 3. Skema permodelan sistem perpipaan di perumahan Salonsa menggunakan software AFT Impulse 7.0. Titik berwarna merah merupakan lokasi hydrant berada.



Gambar 4. Skema permodelan sistem perpipaan di perumahan Salonsa menggunakan software CAESAR II.

lingkupnya agar hasil simulasi yang didapat sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, batasan masalah yang ada yaitu:

1. Faktor luar (gempa bumi, badai, banjir) diabaikan.
2. Tidak ada perpindahan panas antara fluida dengan lingkungan.
3. Tidak ada partikel solid dalam fluida.
4. Fluida berupa air.
5. Fluida yang mengalir bersifat *incompressible*.
6. Temperatur fluida 30 derajat selsius
7. Sistem perpipaan yang dibahas hanya sebatas yang terletak di perumahan Salonsa.
8. Hanya pompa hydrant yang menyala.
9. Debit aliran pompa adalah 1000 gal/min

C. Tujuan

Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui kemampuan dari sistem perpipaan yang sudah ada dalam menerima pembebanan yang dihasilkan pada kondisi operasional normal dan ekstrim akibat *water hammer*.

D. Manfaat

Manfaat yang dapat diperoleh dari penulisan skripsi ini antara lain:

1. Sebagai referensi untuk memahami fenomena *water hammer* yang terjadi pada sistem perpipaan.
2. Sebagai referensi untuk mengetahui penambahan komponen dan *support* yang diperlukan untuk meningkatkan keamanan sistem.
3. Sebagai referensi untuk meningkatkan keamanan operasional sistem perpipaan kedepannya dalam agar mampu menghadapi kemungkinan terburuk.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Water Hammer

Water hammer adalah gelombang tekanan atau gelombang yang terjadi ketika adanya perubahan momentum secara tiba-tiba dari suatu fluida (gerakan suatu fluida secara tiba-tiba dipaksa untuk berhenti atau berubah arah) di dalam ruang tertutup [1]. Hal ini diakibatkan oleh padamnya listrik, penutupan valve secara cepat ataupun terjadi kegagalan operasi pada pompa itu sendiri. Fenomena water hammer terjadi ketika gelombang tekanan berbalik arah menuju pompa distribusi.

B. Metode Karakteristik Water Hammer

Penyelesaian persamaan yang tepat untuk kondisi transient pada sistem dengan kondisi batas yang kompleks adalah dengan menggunakan metode karakteristik. Metode karakteristik digunakan untuk menentukan hubungan antara langkah waktu dan langkah jarak [2]. *Computational mesh/grid with index for MOC*. Sumbu x merupakan selisih panjang pipa, sumbu x merupakan selisih waktu dapat dilihat pada Gambar 1.

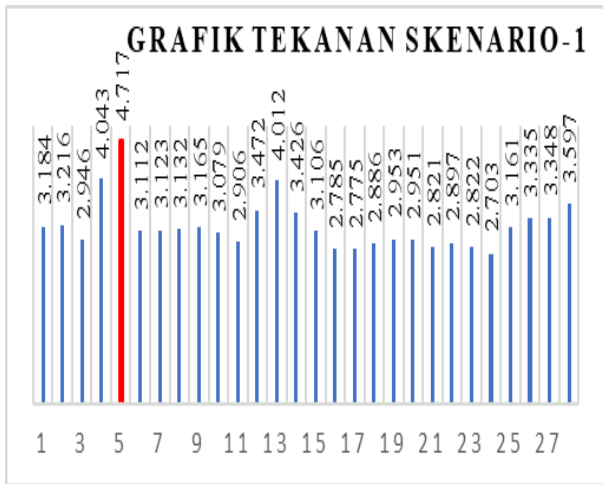
Persamaan momentum dan persamaan kontinuitas yang akan diselesaikan dengan bantuan metode karakteristik adalah sebagai berikut:

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{f|V|V}{2D} = 0 \tag{1}$$

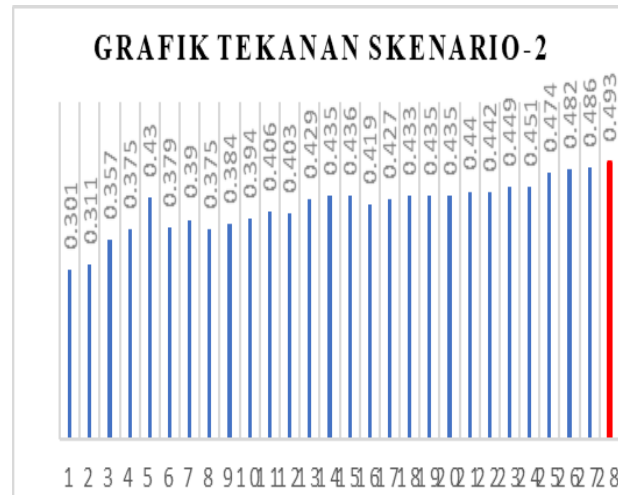
$$L_2 = \frac{\partial P}{\partial t} + \rho c^2 \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$(V_G - V_A) + \frac{1}{\rho c} (P_G - P_A) + \frac{f}{2D} \Delta t \cdot V_A |V_A| = 0 \tag{2}$$

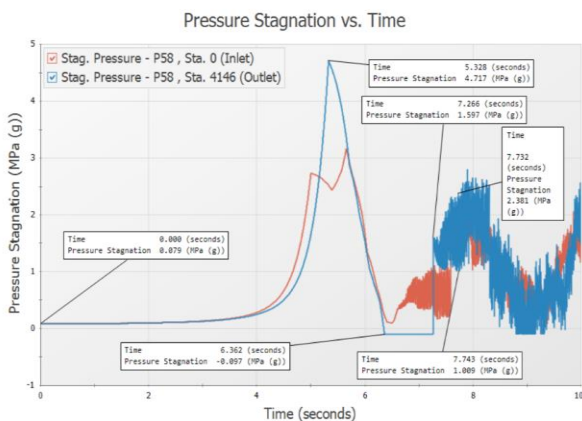
$$(V_G - V_B) - \frac{1}{\rho c} (P_G - P_B) + \frac{f}{2D} \Delta t \cdot V_B |V_B| = 0 \tag{3}$$



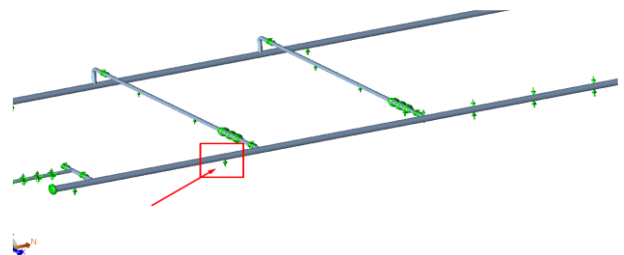
Gambar 5. Grafik tekanan hasil simulasi AFT Impulse Skenario-1.



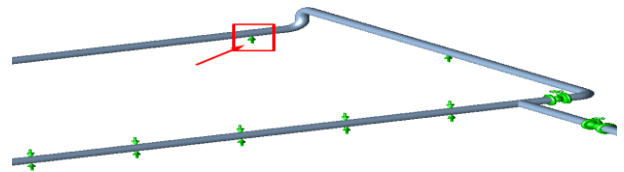
Gambar 7. Grafik tekanan tertinggi yang terjadi pada setiap simulasi pada simulasi AFT Impulse skenario ke-2.



Gambar 6. Grafik tekanan hasil simulasi AFT Impulse Skenario-1 hydrant-5 pada P58.



Gambar 8. Lokasi penambahan support untuk node 760.



Gambar 9. Lokasi penambahan support untuk node 1072.

$$(V_G - V_A) + \frac{1}{\rho c} (P_G - P_A) + \frac{f c}{2D} \Delta x \cdot V_A |V_A| = 0 \quad (4)$$

$$(V_G - V_B) - \frac{1}{\rho c} (P_G - P_B) + \frac{f c}{2D} \Delta x \cdot V_B |V_B| = 0 \quad (5)$$

$$V_{i,j} - V_{i-1,j-1} + \frac{1}{\rho c} (P_{i,j} - P_{i-1,j-1}) + \frac{f c}{2D} \Delta x V_{i-1,j-1} |V_{i-1,j-1}| = 0 \quad (6)$$

$$V_{i,j} - V_{i+1,j-1} - \frac{1}{\rho c} (P_{i,j} - P_{i+1,j-1}) + \frac{f c}{2D} \Delta x V_{i+1,j-1} |V_{i+1,j-1}| = 0 \quad (7)$$

Dimana:

V = Kecepatan Aliran

P = Tekanan Aliran Fluida

ρ = Massa jenis fluida

c = Kecepatan gelombang

f = friction factor

Δx = Jarak yang diambil sebagai grid.

Δt = Selisih waktu yang diambil sebagai grid.

C. Tegangan Pipa

Tegangan yang bekerja pada perpipaan terbagi menjadi beberapa jenis sebagai berikut:

1) Tegangan Aksial:

Gaya yang ditimbulkan oleh gaya Fax yang bekerja searah sumbu pipa.

$$\sigma_{ax} = \frac{F_{ax}}{A_m} = \frac{F_{ax}}{\pi \cdot d_m t} = \frac{F_{ax}}{\pi \left(\frac{d_i + d_o}{2}\right) t} \quad (8)$$

Dimana:

Fax = Gaya dalam aksial

Am = Luas area cross section pipa

dm = Diameter rata-rata pipa

di = Diameter dalam pipa

do = Diameter luar Pipa

P = Tekanan

2) Tegangan tekuk

Tegangan yang ditimbulkan oleh momen yang bekerja di ujung-ujung pipa [3]

$$\sigma_b = \frac{M_b \cdot R_o}{I} \quad (9)$$

Dimana:

σb = Tegangan Tekuk

Mb = Momen Maksimum

Tabel 2.
Pembebanan Hasil Simulasi CAESAR II -Rumah Pompa-Distribusi

Nama beban	Beban (kPa)	Lokasi	Beban Ijin (kPa)	Keterangan
Hydrotest Load	134531.1	Node 760	241316.5	Aman
Sustained Load 1	127445.9	Node 760	137895.1	Aman
Sustained Load 2	131000.4	Node 760	137895.1	Aman
Sustained Load 3	159436.8	Node 760	137895.1	Tidak Aman
	156726.5	Node 1072	137895.1	Tidak Aman

Tabel 3.
Pembebanan Hasil Simulasi CAESAR II -Perumahan

Nama beban	Beban (kPa)	Lokasi	Beban Ijin (kPa)	Keterangan
Hydrotest Load	10663.8	Node 1141	241316.5	Aman
Sustained Load 1	5028.8	Node 6030	137895.1	Aman
Sustained Load 2	7617.2	Node 6030	137895.1	Aman
Sustained Load 3	33534.1	Node 1190	137895.1	Aman

Ro = Radius terluar
I = Momen Inersia penampang

3) *Tegangan longitudinal tekan*

Tegangan yang ditimbulkan akibat gaya internal aliran fluida [3].

$$\sigma_{lp} = \frac{P \cdot d_o}{4t} \tag{10}$$

Dimana:

σ_{lp} = Tegangan longitudinal tekan
P = Tekanan internal fluida
 d_o = Diameter dalam pipa
t = Ketebalan dinding pipa

4) *Tegangan Puntir*

Tegangan yang ditimbulkan akibat momen puntir pada pipa.

$$\tau = \frac{M \cdot R}{I} \tag{11}$$

Dimana:

M = Momen Puntir
R = Jarak dari titik pusat
I = *Torsional Resistance*

D. *Jenis Beban*

Terdapat 3 jenis pembebanan yang berada pada suatu sistem perpipaan yaitu:

1) *Hydrotest Load*

Hydrotest Load adalah beban yang terjadi pada saat sistem dilakukan test dengan menggunakan media air, dengan tekanan 1,5 kali tekanan desain.

2) *Sustained Load*

Sustained Load adalah kombinasi beban dari *weight load* dengan beban yang dihasilkan oleh tekanan internal pipa [4]. Rumus yang digunakan untuk menghitung *sustained load* diambil dari ASME B31.3 adalah sebagai berikut :

$$S_B = \sqrt{(|S_a| + S_b)^2 + (2St)^2} \tag{12}$$

Diketahui:

SB = Stress Sustained
Sa = Range axial stress range karena Tegangan Displacement.

St = Tegangan Puntir
Sb = Bending Stress

3) *Thermal Load*

Thermal Load merupakan beban yang ditimbulkan oleh deformasi material sistem perpipaan akibat perubahan temperatur.

III. METODOLOGI SIMULASI

A. *Proses Permodelan Sistem Perpipaan*

Sebelum melakukan simulasi, perlu dilakukan permodelan sistem perpipaan menggunakan *software* AFT Impulse dan CAESAR II. Terdapat beberapa hal yang perlu diketahui sebelum melakukan permodelan, diantaranya yaitu:

1. Fluida yang digunakan adalah air dengan temperatur 30 derajat selsius.
2. Pipa yang digunakan yaitu pipa A53 Grade B dengan ukuran 4 inci, 6 inci, 8 inci, 10 inci, dan 12 inci.
3. Material A53 Grade B memiliki nilai beban ijin sebesar 137895.1 kPa.
4. Ukuran *reservoir* air memiliki diameter 25,953 meter, tinggi 7 meter, dan mampu menampung 977,700 gallon air.
5. Pompa yang digunakan adalah pompa *Peerless 5 AE 12* dengan diameter impeller 11 inci. Head total pompa adalah 490 feet pada debit aliran 1000 galon per menit.
6. Mesin diesel yang digunakan untuk menggerakkan pompa memiliki tenaga 165 hp pada putara 2800 rpm.
7. Jumlah hydrant yang berada di perumahan adalah 28 buah dengan ketinggian yang berbeda-beda, untuk keterangan lebih lanjut dapat dilihat pada gambar 2

B. *Skenario Simulasi AFT Impulse*

Gambar 3 merupakan bentuk dari permodelan sistem perpipaan pada *software* AFT Impulse 7.0. Lokasi yang diamati adalah seluruh sistem perpipaan. Akan dilakukan 2 skenario simulasi yaitu skenario pertama adalah *valve* hydrant ditutup dalam waktu 5 detik. Skenario kedua adalah pompa *hydrant* yang tiba-tiba mati. Tiap skenario akan dilakukan sebanyak 28 kali sesuai jumlah *hydrant* yang ada. Tiap simulasi dilakukan selama 10 detik. Hasil simulasi dengan lonjakan tekanan dan fluktuasi tekanan tertinggi akan dipilih untuk kemudian disimulasikan pada *software* CAESAR II.

C. Skenario Simulasi CAESAR II

Gambar 4 merupakan bentuk dari permodelan sistem perpipaan menggunakan *software* CAESAR II. Simulasi dibagi menjadi 2 skenario. Skenario pertama yaitu simulasi menggunakan tekanan normal yang biasa terjadi pada sistem perpipaan yang sudah ada, besarnya tekanan yaitu 500 kPa dan 1000 kPa. Skenario kedua yaitu menggunakan tekanan tertinggi yang diperoleh dari simulasi AFT Impulse, kemudian akan dilihat pembebanan yang terjadi akibat tekanan internal yang diberikan. Jika terdapat bagian dari sistem perpipaan yang memiliki beban berlebih, maka akan dilakukan penambahan *support* dan dilakukan simulasi kembali untuk melihat apakah penambahan *support* dapat memperkecil pembebanan pada titik yang dimaksud sampai besarnya pembebanan berada di bawah beban ijin dari material.

IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN HASIL

A. Simulasi AFT Impulse

Hasil simulasi AFT Impulse yang telah dilakukan dibagi menjadi 2 yaitu hasil skenario-1 dan hasil skenario-2. Berdasarkan hasil simulasi skenario-1 pada gambar 5 dapat dilihat bahwa simulasi pada hydrant ke-5 memiliki lonjakan tekanan tertinggi akibat fenomena *water hammer* dibandingkan dengan hydrant lainnya. Hasil yang diperoleh pada simulasi skenario-1 hydrant-5 memiliki nilai lonjakan tekanan sebesar 4.717 MPa pada pipa P58. Hasil simulasi hydrant-5 juga memperlihatkan bahwa tekanan di dalam pipa sempat menyentuh nilai negatif, kemudian tekanan kembali naik namun memiliki fluktuasi yang cukup besar seperti pada gambar 6. Penyebab simulasi pada hydrant-5 memiliki kenaikan tekanan yang tinggi bukan karena debit aliran yang besar, pada nyatanya debit aliran yang menuju ke hydrant-5 memiliki nilai yang kecil. Penyebabnya adalah karena hydrant-5 yang dekat dengan ujung pipa P-58, menyebabkan gelombang tekanan balik dari hydrant-5 tidak tersebar melainkan langsung menuju ujung P58. Fluktuasi tekanan disebabkan oleh pantulan gelombang tekanan dari ujung pipa lainnya, serta terdapat belokan tajam pada jalur pipa, gaya gesek pada permukaan pipa juga ikut menjadi penyebab terjadinya fluktuasi tekanan. Hasil Simulasi Skenario-2 pada gambar 7 bahwa tidak terjadi fenomena *water hammer* akibat pompa yang mati secara tiba-tiba, hal ini terlihat dari nilai tekanan yang dihasilkan pada simulasi ini bukanlah dari fenomena *water hammer* melainkan dari rumitnya jalur perpipaan yang harus dilewati oleh fluida untuk menuju ke hydrant., hal ini juga ditandai semakin tingginya tekanan saat lokasi hydrant semakin jauh dari rumah pompa. Penyebab tidak terjadinya fenomena *water hammer* juga disebabkan oleh lokasi rumah pompa yang berada di lokasi yang paling tinggi dibandingkan semua hydrant, menyebabkan air selalu mengalir dari tempat tinggi ke rendah jika kedua ujungnya sama-sama dibuka. Hasil simulasi AFT Impulse menunjukkan bahwa dari kedua skenario yang ada, simulasi skenario-1 hydrant-5 yang memiliki kenaikan tekanan tertinggi akibat fenomena *water hammer*.

B. Simulasi CAESAR II

Hasil simulasi CAESAR II pada skenario-1 menunjukkan bahwa sistem perpipaan yang sudah ada mampu bertahan

dalam menghadapi pembebanan pada kondisi kerja normal, yaitu saat dikenakan tekanan internal 500 kPa dan 1000 kPa. Simulasi CAESAR II skenario-2 menggunakan tekanan internal 4.717 MPa yang diperoleh dari hasil simulasi AFT Impulse. Hasil simulasi dibagi menjadi 2, pertama hasil simulasi pada rumah pompa sampai jalur distribusi sistem perpipaan dan yang kedua adalah hasil simulasi pada daerah perumahan. Hasil simulasi untuk daerah rumah pompa dapat dilihat pada tabel 2. Hasil dari simulasi ini menunjukkan bahwa terdapat 2 titik yang mengalami pembebanan berlebih yaitu pada Node 760 dengan nilai beban 159436.8 kPa dan node 1072 dengan nilai beban 156726.7 kPa. Dilakukan penambahan *support*, untuk node 760 dilakukan penambahan *support* pada jarak 12meter dari titik tersebut sedangkan untuk node 1072 penambahan *support* dilakukan pada jarak 11meter dari titik tersebut. Setelah dilakukan simulasi ulang, penambahan *support* terbukti mengurangi pembebanan pada node 760 menjadi 61800 kPa, sedangkan untuk node 1072 menjadi 60901.1 kPa. Nilai pembebanan ini sudah berada di bawah *allowable stress* dari material yaitu 137895.1 kPa. Lokasi penambahan *support* dapat dilihat pada gambar 8 dan gambar 9. Hasil simulasi untuk daerah perumahan dapat dilihat pada tabel 1 dan table 3. Berdasarkan tabel 1 dan table 3 dapat diketahui bahwa pembebanan pada sistem perpipaan yang berada di daerah perumahan memiliki nilai yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan pembebanan pada rumah pompa, hal ini disebabkan karena lokasi pipa pada daerah perumahan berada di bawah tanah sehingga pembebanan dapat disebar secara merata, sedangkan sistem perpipaan untuk rumah pompa berada di atas tanah, oleh sebab itu besarnya pembebanan tergantung pada jumlah dan lokasi *support* yang diberikan. Pada hasil simulasi di daerah perumahan memiliki nilai pembebanan yang semuanya berada di bawah *allowable stress* dari material, hal ini menandakan bahwa untuk sistem perpipaan di daerah perumahan dapat bertahan baik pada kondisi normal maupun kondisi yang ditimbulkan akibat fenomena *water hammer*.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Kesimpulan dari simulasi yang telah dilakukan adalah sebagai berikut; (1) Tekanan terbesar yang dihasilkan dari simulasi AFT Impulse terjadi pada simulasi skenario-1 hydrant ke-5 dengan nilai 4.717 MPa yang berlokasi di P58; (2) Terjadi tekanan vakum pada skenario-1 hydrant-5 dan fluktuasi tekanan, hal ini dapat merusak pipa P58 sehingga perlu ditambahkan komponen *vacuum breaker* atau *gas accumulator*; (3) Skenario -2 yaitu *Pump trip* tidak menyebabkan fenomena *water hammer* pada sistem perpipaan ini; (4) Sistem perpipaan yang sudah ada mampu bertahan dalam kondisi pembebanan normal; (5) Sistem perpipaan yang sudah ada mengalami beban berlebih pada node 760 dan node 1072 dengan nilai 159436.8 kPa dan 156726.7 kPa saat diberi nilai tekanan internal yang dihasilkan dari fenomena *water hammer*; (6) Diperlukan penambahan *support* pada lokasi sekitar node 760 dan node 1071; (7) Setelah dilakukan penambahan *support* nilai pembebanan pada node 760 dan 1072 berubah menjadi 61800 kPa dan 60901.1 kPa.

B. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk meningkatkan keamanan sistem perpipaan pemadam kebakaran di perumahan Salonsa adalah sebagai berikut; (1) Penambahan komponen untuk meredam terjadinya lonjakan tekanan akibat fenomena *water hammer* dapat diberikan. Komponen yang dimaksud adalah *gas accumulator*; (2) Penambahan *support* pada lokasi 12 meter dari node 760 dan 11 meter dari node 1072 agar sistem perpipaan yang sudah ada mampu menghadapi kemungkinan terjadinya lonjakan tekanan akibat fenomena *water hammer* seperti pada simulasi; (3) Hasil simulasi AFT Impulse pada skenario ke-1 menunjukkan nilai tekanan yang berfluktuasi. Fluktuasi yang dihasilkan berbeda-beda. Terdapat hasil tekanan yang berada pada nilai negatif, hal ini dapat menjadi penyebab pipa rusak akibat tekanan vakum. Fluktuasi tekanan ada yang terjadi dalam frekuensi yang tinggi, hal ini

memberikan beban berlebih pada sistem perpipaan yang dapat memicu kegagalan sistem. Penambahan komponen seperti *vacuum breaker* dan *gas accumulator* dapat memperkecil efek fluktuasi tekanan yang dihasilkan akibat fenomena *water hammer* pada sistem perpipaan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Mahanna, Loeb, "Water hammer and surge tanks cive 401," *Dev. Water Sci.*, vol. 15, pp. 53–87, 1981, doi: 10.1016/S0167-5648(08)70496-9.
- [2] J. Carlsson, "Water Hammer Phenomenon Analysis using the Method of Characteristics and Direct Measurements using a 'Stripped' Electromagnetic Flow Meter," Royal Institute of Technology, 2016.
- [3] B. C. Tri Adi Sisiwanto, Hari Prastowo, "Analisa pengaruh water hammer terhadap nilai stress pipa pada sistem loading-offloading PT. DABN," *J. Tek.*, vol. 3, no. 1, pp. 142–148, 2014.
- [4] Los Alamos National Laboratory (LANL), *ASME B31 .3 Process Piping Guide*. USA: Los Alamos National Laboratory (LANL), 2009.