

Evaluasi Unjuk Kerja Sistem Proteksi Water Hammer pada Sistem Perpipaan (Studi Kasus Di Rumah Pompa Produksi Unit Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Karang Pilang 2 PT. PDAM Surya Sembada Surabaya)

Handi Prasetya dan Nur Ikhwan

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: nur_ikhwan@me.its.ac.id

Abstrak—Sistem jaringan perpipaan merupakan komponen penting dalam menunjang produksi maupun distribusi pada sektor industri. Jaringan perpipaan mengalami beberapa fenomena seperti distribusi fluida dan *water hammer*. *Water hammer* sering terjadi di daerah discharge pompa pada saat pengoperasian pompa maupun pada saat kegagalan operasi pompa. Beberapa cara untuk mengurangi dampak *water hammer* adalah dengan menambahkan *flywheel* ataupun *gas accumulator* pada jaringan perpipaan. Lonjakan tekanan serta aliran balik yang terjadi akibat fenomena *water hammer* akan dilawan oleh putaran impeller pompa yang dibebani oleh *flywheel* dan akan memperlambat lonjakan tekanan dalam pipa dan tekanan yang berlebih akan dibuang ke gas accumulator sehingga tekanan dalam pipa berangsur stabil. Pemodelan sistem perpipaan dilakukan dengan menggunakan software sistem perpipaan. Pemodelan yang disimulasikan merupakan sistem perpipaan dengan rangkaian pompa paralel yang dilengkapi *flywheel* pada instalasi pompa dan divariasikan dengan penambahan *gas accumulator* sebagai sistem proteksi water hammer. Analisa yang dilakukan adalah untuk mempelajari fenomena *water hammer* pada saat kondisi ekstrim yakni ketika dua pompa operasi mati dan juga ketika empat pompa operasi mati, untuk melihat pengaruh variasi ukuran *flywheel* terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi. Ukuran *flywheel* divariasikan yakni ukuran diameter luar 1100mm, 1200mm dan 1300mm dengan tebal masing-masing 300mm, 400mm dan 500mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada sistem perpipaan tanpa menggunakan gas accumulator, tekanan maksimum yang terjadi pada discharge pompa mencapai 19,807 bar dari kondisi tekanan kerjanya 5,6 bar. Variasi ukuran *flywheel* memberi dampak pada perlambatan terjadinya lonjakan tekanan, semakin besar ukuran *flywheel* akan menunda terjadinya lonjakan tekanan akibat water hammer. Dan penambahan gas accumulator berperan dalam meredam serta mempersingkat waktu terjadinya lonjakan tekanan, sehingga fluktuasi tekanan cenderung berangsur stabil dengan cepat. Serta tebal pipa discharge yang digunakan yakni 9,52 mm mampu menahan tekanan maksimum yang terjadi akibat efek water hammer.

Kata Kunci—*water hammer*, *discharge*, *flywheel*, *gas accumulator*.

I. PENDAHULUAN

Jaringan perpipaan mengalami beberapa fenomena seperti distribusi fluida itu sendiri dan juga fenomena

perubahan kecepatan aliran secara mendadak sebagai akibat dari pengoperasian pompa dan kegagalan pompa beroperasi. Hal ini dapat menimbulkan perubahan tekanan yang sangat tajam sehingga menyerupai suatu pukulan dan dinamakan gejala pukulan air (*water hammer*). Fenomena keadaan unsteady ini dapat dikatakan sebagai perubahan energi kinetik dan energi tekanan yang bisa menjadi positif atau negatif. Efek negatif yang dihasilkan oleh fenomena tersebut diantaranya menimbulkan getaran pada pipa dan memperpendek umur pemakaian komponen perpipaan. Perubahan tekanan yang terlalu besar pada pipa dapat menyebabkan pipa rusak atau pecah.

Fenomena *water hammer* ini sering terjadi di daerah discharge pompa pada saat pengoperasian dan kegagalan pompa beroperasi. *Water hammer* adalah fenomena terjadinya fluktuasi tekanan yang diakibatkan oleh penutupan valve yang cepat ataupun matinya pompa secara tiba-tiba. Fenomena tersebut dalam sistem perpipaan mempunyai dampak negatif dengan selang waktu tertentu dan dampak yang ditimbulkan terjadi seketika itu juga. Beberapa cara untuk mengurangi dampak *water hammer* adalah dengan menambahkan alat proteksi di daerah discharge pompa tersebut.

Pemasangan gas accumulator yang umumnya dipasang pada discharge pompa berfungsi mengurangi fluktuasi tekanan mendadak akibat pengoperasian dan kegagalan pompa beroperasi. Kemudian penambahan *flywheel* atau beban berbentuk roda pada instalasi pompa yang umumnya dipasang di bagian poros penghubung antara pompa dengan motor penggerak akan berperan dalam menunda terjadinya lonjakan tekanan ketika terjadi kegagalan pompa secara tiba-tiba dan untuk mencegah terjadinya pemisahan kolom air.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Dasar Teori

Fenomena *water hammer* terjadi ketika aliran dihentikan secara mendadak dan dirubah menjadi tekanan. Analisa *water hammer* dalam sistem perpipaan berdasarkan pada persamaan momentum dan kontinuitas. 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. Persamaan momentum dan persamaan kontinuitas yang akan diselesaikan dengan bantuan metode karakteristik adalah sebagai berikut^[1].

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \sin(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (1)$$

Keterangan:

- P = tekanan (N/m²)
- V = kecepatan (m/s²)
- ρ = densitas (kg/m³)
- x = panjang pipa (m)
- t = waktu (s)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)
- D = diameter (m)
- f = faktor gesekan
- α = sudut kemiringan pipa.

Persamaan kontinuitas dapat dirumuskan sebagai berikut^[1].

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Keterangan:

- a = kecepatan gelombang

Kecepatan perambatan gelombang tekanan dapat diformulasikan sebagai berikut^[1].

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1+c_1[(K/E)(D/e)]} \quad (3)$$

Keterangan:

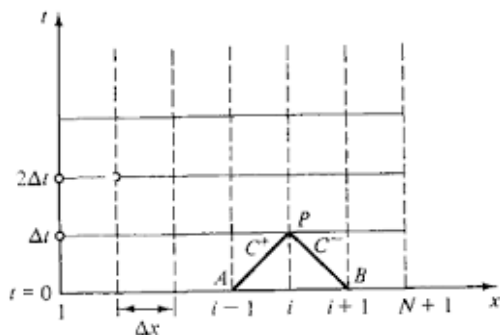
- a = kecepatan gelombang fluida dalam pipa (m/sec)
- Δp = perubahan tekanan
- Δv = perubahan kecepatan
- K = modulus bulk fluida (N/m²)
- P = densitas fluida (kg/m³)
- D = diameter pipa (m)
- E = modulus elastisitas (N/m²)
- e = ketebalan pipa (m)
- c1 = faktor koreksi yang tergantung pada instalasi pipa.

Persamaan (1), (2) dan (3) dikombinasikan menjadi persamaan karakteristik berikut.

$$(P_p - P_A) + B(\dot{m}_p - \dot{m}_A) + \rho g(z_p - z_A) + R\dot{m}_p|\dot{m}_A| = 0 \quad (4)$$

$$-(P_p - P_A) + B(\dot{m}_p - \dot{m}_A) + \rho g(z_p - z_A) + R\dot{m}_p|\dot{m}_A| = 0 \quad (5)$$

Dari persamaan (4) dan (5) dihasilkan grafik karakteristik metode grid.



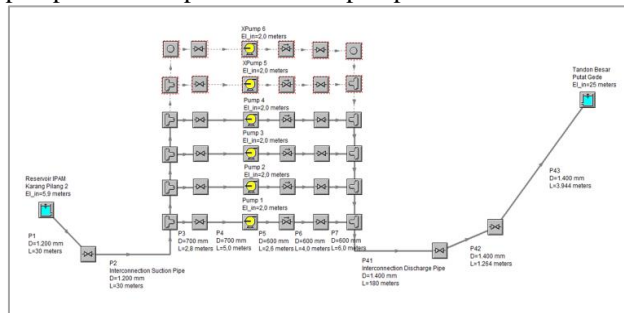
Gambar 1. Karakteristik metode grid^[1]

III. METODOLOGI

A. Simulasi Pemodelan Sistem Perpipaan

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan software sistem perpipaan sebagai alat bantu untuk melihat dampak yang ditimbulkan akibat fenomena aliran transient yang terjadi pada sistem perpipaan. Program ini akan menghitung tekanan transient pada sistem perpipaan dengan menggunakan iterasi dan metode matriks. Sedangkan metode karakteristik digunakan untuk memecahkan massa transient dan persamaan momentum pada aliran di dalam pipa.

Sistem perpipaan untuk rumah pompa produksi unit Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Karang Pilang 2 dimodelkan untuk melihat pengaruh penggunaan proteksi water hammer ketika mengalami kegagalan operasi. Pemodelan ini menggunakan dua skema pemodelan untuk proteksi water hammer dengan dua skenario operasi pompa dimana empat pompa mengalami kegagalan operasi secara ekstrim, yakni pada kondisi 2 pompa mati dan pada kondisi 4 pompa mati.



Gambar 2. Pemodelan sistem perpipaan pada software

Pengaruh fluktuasi tekanan akibat kegagalan pompa dilihat di daerah discharge setiap pompa operasi. Pemodelan ini juga divariasikan dengan skema pemodelan dengan menggunakan sistem proteksi water hammer yang berbeda. Untuk setiap skenario operasi pompa menggunakan proteksi flywheel dengan variasi ukuran dan juga penambahan gas accumulator. Ukuran flywheel divariasikan untuk melihat pengaruh inersia dalam melawan aliran balik yang menuju pompa akibat efek water hammer. Ditambah pengaruh inersia dari komponen-komponen berputar pada instalasi pompa.

TABEL 1. VARIASI UKURAN FLYWHEEL PADA SIMULASI SISTEM PERPIPAAN

	Flywheel 1	Flywheel 2	Flywheel 3
Material	Steel	Steel	Steel
Diameter dalam	150 mm	150 mm	150 mm
Diameter luar	1100 mm	1300 mm	1500 mm
Tebal	300 mm	400 mm	500 mm

Dalam simulasi ini juga menggunakan skema pemodelan sistem perpipaan tanpa penambahan gas accumulator dan sistem perpipaan dengan penambahan gas accumulator pada pipa discharge utama (pipa distribusi utama) untuk melihat pemodelan mana yang lebih baik dalam meredam fluktuasi tekanan akibat efek water hammer.

TABEL 2. SPESIFIKASI GAS ACCUMULATOR PADA PEMODELAN

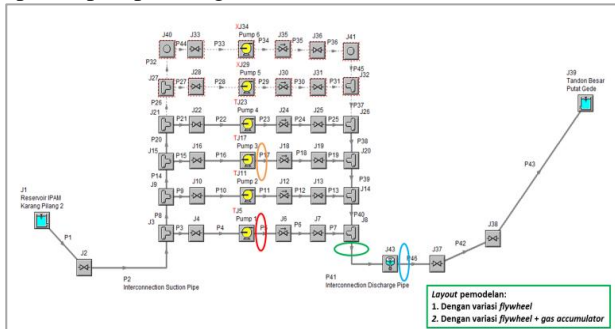
Gas accumulator	
Tekanan kerja	5,6 bar
Volume udara	53 m ³

Secara keseluruhan skema pemodelan dan skenario pompa yang disimulasikan adalah sebagai berikut.

1. 2 pompa ON dan 2 pompa OFF – variasi flywheel 1, 2 dan 3.
2. 2 pompa ON dan 2 pompa OFF – variasi flywheel 1, 2 dan 3 – dengan gas accumulator.
3. 4 pompa OFF – variasi flywheel 1, 2 dan 3.
4. 4 pompa OFF – variasi flywheel 1, 2 dan 3 – dengan gas accumulator.

B. Titik Analisa Pemodelan

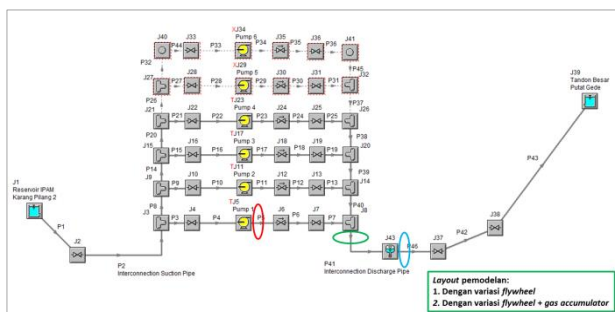
Daerah yang dipilih untuk dianalisa merupakan daerah yang terkena dampak utama ketika terjadinya fenomena water hammer seperti halnya pada discharge pompa serta daerah di dekat penempatan alat proteksi gas accumulator. Titik-titik analisa dibedakan pada dua operasi pompa sebagai berikut.



Gambar 3. Titik-titik analisa pada simulasi dengan skenario 2 pompa ON & 2 pompa OFF

TABEL 3. DETAIL TITIK ANALISA PADA SIMULASI DENGAN SKENARIO 2 POMPA ON & 2 POMPA OFF

No	Warna titik	Nomor pipa	Posisi pipa	Diameter pipa (mm)	Tebal pipa (mm)	Beda elevasi terhadap tandon besar (m)
1		P5	Discharge pompa 1	600	9,52	23
2		P17	Discharge pompa 3	600	9,52	23
3		P41	Pipa discharge utama	1400	19,05	23
4		P46	Sebelum gas accumulator	1400	19,05	23



Gambar 4. Titik-titik analisa pada simulasi dengan skenario 4 pompa OFF

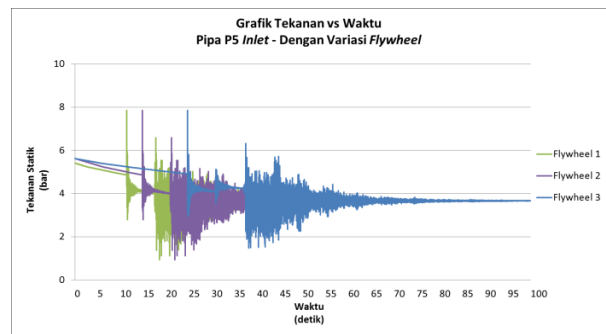
TABEL 4. DETAIL TITIK ANALISA PADA SIMULASI DENGAN SKENARIO 4 POMPA OFF

No	Warna titik	Nomor pipa	Posisi pipa	Diameter pipa (mm)	Tebal pipa (mm)	Beda elevasi terhadap tandon besar (m)
1		P5	Discharge pompa 1	600	9,52	23
2		P41	Pipa discharge utama	1400	19,05	23
3		P46	Sebelum gas accumulator	1400	19,05	23

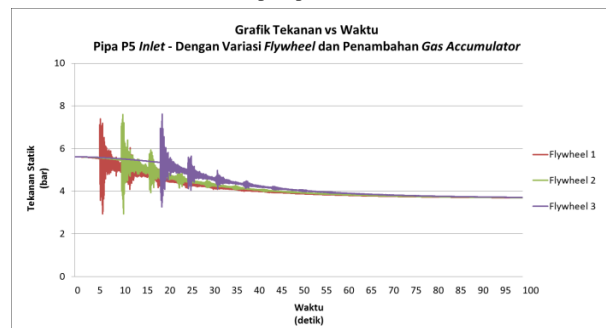
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Pada Skenario 2 Pompa OFF

Hasil simulasi menunjukkan pengaruh sistem proteksi water hammer baik hanya dengan menggunakan variasi ukuran flywheel atau dengan variasi ukuran flywheel serta penambahan gas accumulator. Analisa pemodelan difokuskan pada area discharge pompa dari setiap pompa yang mengalami kegagalan.



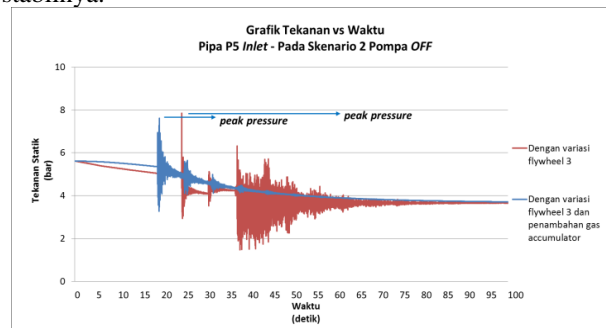
Gambar 5. Grafik tekanan terhadap waktu pada pipa p5 inlet (discharge pompa 1) dengan variasi ukuran flywheel pada skenario 2 pompa OFF



Gambar 6. Grafik tekanan terhadap waktu pada pipa p5 inlet (discharge pompa 1) dengan variasi ukuran flywheel dan penambahan gas accumulator pada skenario 2 pompa OFF

Dari gambar 5 untuk sistem perpipaan tanpa menggunakan gas accumulator menunjukkan fluktuasi tekanan dan osilasi yang tinggi, dimana tekanan maksimumnya mencapai 7,839 bar dan tekanan minimumnya mencapai 0,933 bar. Dan terdapat perbedaan waktu terjadinya lonjakan tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya akibat pengaruh variasi ukuran flywheel.

Sedangkan pada gambar 6 untuk pemodelan dengan menggunakan gas accumulator menunjukkan fluktuasi tekanan dan osilasi yang cenderung lebih rendah, dimana tekanan maksimumnya mencapai 7,126 bar dan tekanan minimumnya mencapai 2,929 bar. Dan terdapat perbedaan waktu terjadinya fluktuasi tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya.



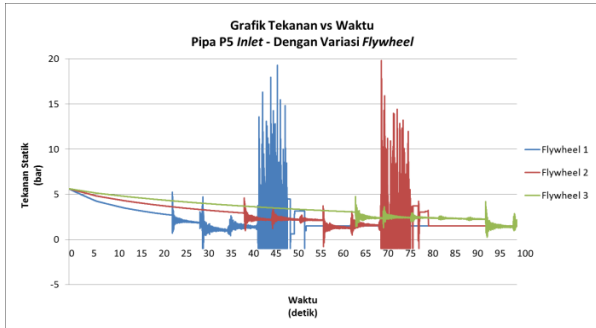
Gambar 7. Grafik perbandingan tekanan terhadap waktu pada pipa p5 inlet dengan variasi ukuran flywheel ke-3 vs pipa p5 inlet dengan variasi ukuran flywheel ke-3 dan penambahan gas accumulator pada skenario 2 pompa OFF

Berdasarkan gambar 7, untuk pemodelan dengan penambahan gas accumulator mampu menurunkan peak pressure pada saat terjadi water hammer. Pemodelan dengan variasi flywheel 3 mencapai peak pressure 7,839 bar dan pada pemodelan dengan variasi flywheel 3 serta penambahan gas accumulator nilai peak pressure turun menjadi 7,126 bar. Peran gas accumulator sebagai

peredam tekanan berlebih berperan dalam menurunkan peak pressure ini.

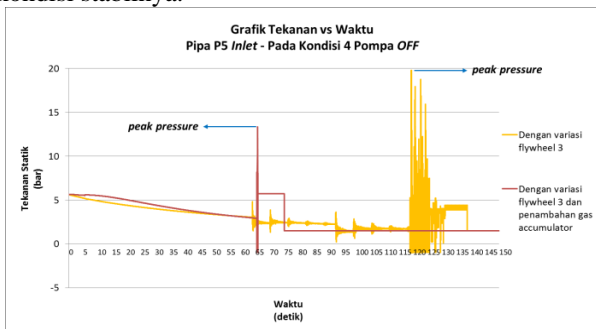
B. Hasil Simulasi Pada Skenario 4 Pompa OFF

Hasil simulasi pemodelan pada kondisi pompa mengalami kegagalan seluruhnya menunjukkan pengaruh fluktuasi tekanan yang terjadi di daerah discharge pompa yang berada paling dekat dengan pipa distribusi utama. Karena titik ini merupakan titik yang paling rentan menerima fluktuasi tekanan yang tinggi akibat efek water hammer.



Gambar 8. Grafik tekanan terhadap waktu pada pipa p5 inlet (discharge pompa 1) dengan variasi ukuran flywheel pada skenario 4 pompa OFF

Pada skenario ini terlihat pada gambar 8 bahwa untuk pemodelan tanpa menggunakan gas accumulator menunjukkan fluktuasi tekanan dan osilasi yang tetap tinggi, dimana tekanan maksimumnya mencapai 19,807 bar dan tekanan minimumnya mencapai -0,877 bar. Dan terdapat perbedaan waktu terjadinya lonjakan tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya.



Gambar 9. Grafik perbandingan tekanan terhadap waktu pada pipa p5 inlet dengan variasi ukuran flywheel ke-3 vs pipa p5 inlet dengan variasi ukuran flywheel ke-3 dan penambahan gas accumulator pada skenario 4 pompa OFF

Berdasarkan gambar 9, terlihat bahwa pada pemodelan dengan penambahan gas accumulator mampu menurunkan peak pressure pada saat terjadi water hammer. Pemodelan dengan variasi flywheel mencapai peak pressure 19,807 bar dan pada pemodelan dengan variasi flywheel serta penambahan gas accumulator nilai peak pressure turun menjadi 13,373 bar. Peran gas accumulator sebagai peredam tekanan berlebih berperan dalam menurunkan peak pressure ini. Analisa lain yang bisa disimpulkan dari grafik adalah bahwa dengan penambahan gas accumulator juga akan mengurangi fluktuasi tekanan serta mempercepat tekanan kembali pada kondisi stabilnya.

C. Kekuatan Tebal Pipa Discharge Pompa 1 Terhadap Tekanan Statik Maksimum

Setelah dilakukan perhitungan tebal minimum pipa berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh AWWA

(*American Water Works Association*). Didapatkan kesimpulan bahwa dengan tekanan maksimum internal yang terjadi mencapai $P = 20$ bar dan dengan pertimbangan toleransi manufaktur yang diijinkan maka tebal pipa minimum yang direkomendasikan sesuai perhitungan adalah $t_m = 6,83$ mm. Sehingga dengan tebal pipa yang digunakan sesuai data eksisting yakni $t = 9,52$ mm (STD schedule 20) maka sudah melebihi dari tebal pipa yang direkomendasikan, dan oleh karena itu dapat dinyatakan bahwa tebal pipa discharge yang digunakan pada rumah pompa unit IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya ini aman, artinya mampu menahan beban tekanan maksimum yang terjadi akibat efek water hammer sehingga tidak menyebabkan pipa discharge mengalami kerusakan atau pecah.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi dan analisa pemodelan yang dilakukan untuk layout sistem instalasi perpipaan di unit IPAM Karang Pilang 2, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Pemodelan sistem perpipaan dengan menggunakan variasi ukuran flywheel namun tidak menggunakan proteksi water hammer yakni gas accumulator memiliki nilai lonjakan tekanan tertinggi ketika terjadi kegagalan pompa operasi yang mencapai nilai 19,807 bar.
2. Pengaruh penggunaan flywheel pada instalasi pompa yang utama adalah untuk menunda/memperlambat terjadinya lonjakan tekanan akibat efek water hammer, semakin besar ukuran flywheel maka akan semakin memperlambat terjadinya fluktuasi tekanan.
3. Penggunaan gas accumulator menyebabkan fluktuasi tekanan lebih cepat mengalami penurunan hingga kondisi stabilnya, hal ini terjadi akibat lonjakan tekanan yang tinggi mampu diredam oleh kinerja volume udara dalam tangki accumulator.
4. Berdasarkan perhitungan tebal pipa minimum sesuai standar AWWA (*American Water Works Association*) Manual M11 dapat dikatakan bahwa tebal pipa discharge yang digunakan pada sistem dengan STD schedule 20 / tebal pipa 9,52 mm mampu menahan tekanan statik maksimum yang terjadi pada daerah discharge pompa sebesar $P = 19,807$ bar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis Handi Prasetya mengucapkan terima kasih pihak PT PDAM Surya Sembada Surabaya dan Unit IPAM Karang Pilang 2 atas kesempatan yang diberikan untuk mempelajari lebih lanjut tentang fenomena water hammer pada sistem perpipaan yang sangat berperan dalam penyusunan tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wylie, E.B., V.L. Streeter., dan L. Suo. 1993. Fluid Transients in Systems. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.