



**TUGAS AKHIR - TM141585**

**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  
NRP. 2113.106.021**

**Pembimbing:  
Nur Ikhwan, ST., M.Eng.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



**TUGAS AKHIR - TM141585**

**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  
NRP. 2113.106.021**

**Pembimbing:  
Nur Ikhwan, ST., M.Eng.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TM141585

***PERFORMANCE EVALUATION OF WATER  
HAMMER PROTECTION SYSTEMS ON PIPELINE  
(CASE STUDY AT PRODUCTION PUMP HOUSE  
FOR DRINKING WATER TREATMENT PLANT  
(IPAM) UNIT KARANG PILANG 2  
PT PDAM SURYA SEMBADA SURABAYA)***

HANDI PRASETYA  
Registration No. 2113.106.021

Advisor:  
Nur Ikhwan, ST., M.Eng.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

**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)**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**HANDI PRASETYA**  
NRP. 2113 106 021

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Nur Ikhwan, ST., M.Eng. ..... (Pembimbing)  
(NIP. 196709151995121001)
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. ..... (Penguji I)  
(NIP. 197104051997021001)
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. ..... (Penguji II)  
(NIP. 196412281990031002)

**SURABAYA**  
**Juli 2016**

[halaman ini sengaja dikosongkan]

**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)**

**Nama Mahasiswa** : Handi Prasetya  
**NRP** : 2113106021  
**Jurusan** : Teknik Mesin  
**Dosen Pembimbing** : Nur Ikhwan, ST., M. Eng.

**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. Dampak yang ditimbulkan dari fenomena water hammer akan terjadi seketika itu juga. Dan penanggulangan yang tidak tepat terhadap dampak tersebut dapat mengakibatkan instalasi perpipaan harus dimatikan (shutdown). Beberapa cara untuk mengurangi dampak water hammer adalah dengan cara 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 dan tidak akan menyebabkan aliran balik tersebut memutar arah putaran poros pompa ke arah sebaliknya yang akan merusak komponen motor penggerak.*

*Pada penelitian ini, pemodelan sistem perpipaan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak AFT Impulse*

4.0. Sistem perpipaan 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 sebagian pompa operasi mati dan juga ketika seluruh pompa operasi mati untuk melihat pengaruh variasi ukuran flywheel terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi. Ukuran flywheel yang divariasikan adalah flywheel dengan diameter luar 1100mm, 1200mm dan 1300mm dengan tebal masing-masing 300mm, 400mm dan 500mm. Sehingga dengan ukuran flywheel yang berbeda dapat dilihat pengaruh momen inersianya dalam melawan lonjakan tekanan. Serta untuk melihat pengaruh penambahan gas accumulator pada pipa discharge utama dalam meredam fluktuasi tekanan.

Hasil yang didapatkan pada simulasi berupa plot grafik dari fluktuasi tekanan yang terjadi pada sistem perpipaan. 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 sesuai dengan perhitungan tebal pipa minimum untuk material steel yang dikeluarkan oleh American Water Works Association (AWWA) Manual M11.

**Kata kunci:** water hammer, discharge, AFT Impulse, flywheel, gas accumulator.

**PERFORMANCE EVALUATION OF WATER  
HAMMER PROTECTION SYSTEMS ON PIPELINE  
(CASE STUDY AT PRODUCTION PUMP HOUSE FOR  
DRINKING WATER TREATMENT PLANT (IPAM)  
UNIT KARANG PILANG 2 PT PDAM SURYA  
SEMBADA SURABAYA)**

**Student Name** : Handi Prasetya  
**Registration No.** : 2113106021  
**Department** : Teknik Mesin  
**Advisor** : Nur Ikhwan, ST., M.Eng.

***Abstract***

*Piping network system is an important component in supporting the production and distribution of the industrial sector. Piping network experienced some phenomena such as fluid distribution and water hammer. Water hammer often occurs in the discharge area of the pump during operation of the pump or when the pump failures. The impact of water hammer phenomenon will occur instantly. And the wrong countermeasures againts the effect can lead piping installation to the shutdown condition. Some ways to reduce the impact of water hammer is by adding a flywheel or gas accumulator in the pipeline. The pressure fluctuations and backflow which is caused by the phenomenon of water hammer will be opposed by the rotation of the pump impeller which is burdened by the flywheel and it will slow down the surge of pressure in the pipes and excessive pressure will be discharged into the gas accumulator so that the pressure in the pipes gradually stabilized and will not cause a backflow of the rotational direction of pump shaft rotation in the opposite direction which will damage the motor components.*

*In this study, the piping system modeling is done by using the AFT Impulse 4.0 software. Plumbing system that simulated is a piping system with a series of parallel pump incorporates a*

*flywheel on the installation of the pump and the gas accumulator is varied by the addition of a water hammer protection system. The analysis is to study the phenomenon of water hammer during extreme conditions, in example when most of the operating pump is turned off and also when the entire operation of the pump turned off to see the effect of flywheel size variations to the pressure fluctuations that occur. The flywheel size variation is a flywheel with an outer diameter of 1100mm, 1200mm and 1300mm with thickness respectively 300mm, 400mm and 500mm. So that the different sizes of flywheel can be seen the influence of moment of inertia against pressure surges. As well as to see the effect of additional of gas accumulator on the main discharge pipe in dampening the pressure fluctuations.*

*The results obtained in the simulation is a plot graph of pressure fluctuations which occur in piping systems. In piping systems without using gas accumulator, the maximum pressure that occur at discharge pump reaches 19.807 bar of pressure working conditions of 5.6 bar. The flywheel size variations impact on the deceleration of pressure escalation, the greater the size of the flywheel will delay the occurrence of pressure surges due to water hammer. And the addition of gas accumulator is serve as dampening as well as shorten the time of the occurrence of pressure fluctuations, so the pressure fluctuations tends gradually stabilized quickly. And the thickness of the discharge pipe is used with 9.52 mm is able to withstand the maximum pressure caused by water hammer effect in accordance with the calculation of minimum pipe thickness for steel materials issued by the American Water Works Association ( AWWA ) Manual M11 .*

***Keywords: water hammer, discharge, AFT Impulse, flywheel, gas accumulator.***

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil ‘alamiin, segala puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena berkat Rahmat serta Hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul ***“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)”*** dengan baik serta penuh kelancaran.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat kelulusan sebagai penutup Program Studi S1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tema dan judul Tugas Akhir ini penulis angkat dari hasil studi lapangan di PT PDAM Surya Sembada Surabaya Unit Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Karang Pilang 2.

Banyak dorongan serta bimbingan yang penulis dapatkan dari semua pihak selama penyusunan Tugas Akhir sampai terselesaikannya laporan ini. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT dan junjungan besar Nabi Muhammad SAW.
2. Kedua orang tua tercinta, ibunda Mindayati dan ayahanda Gatot Sukmito, kakak Denny Ardian Nugraha, adik Adhan Rahadian serta saudara-saudaraku tercinta yang selalu memberikan motivasi dengan penuh kasih sayang serta doa restu yang senantiasa mengiringi penulis selama pengerjaan Tugas Akhir, semua kerja keras ini penulis persembahkan untuk kalian.
3. Bapak Nur Ikhwan, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing. Atas ilmu serta waktu yang disediakan di tengah berbagai kesibukan dan arahan yang diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

4. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah memberikan ilmu serta pengetahuannya selama menimba ilmu di bangku kuliah.
6. Semua pihak di PT PDAM Surabaya, Bapak Ahmad Nuratuddin, Bapak Yiloar, Bapak Agus Eko serta tim *maintenance* IPAM Karang Pilang 2 Bapak Didik, Bapak Bahrul, Bapak Nanang dan Mas Sandy yang sangat banyak membantu penulis dalam mempelajari sistem perpipaan serta pengambilan data di lapangan. Tak lupa kepada Mas Adit dan Ibu Lin yang membantu dalam hal perijinan.
7. Ega Suci Novianti, yang selalu memberi semangat dan doa kepada penulis yang tiada hentinya.
8. Teman-teman Ex-Mapasi SMAN 4 Bandung dan POLMAN Bandung yang selalu mendukung dan memberi motivasi.
9. Seluruh keluarga laboratorium mekanika fluida, proses manufaktur dan teknik pembakaran dan bahan bakar yang telah menyediakan tempat serta memberikan bantuan dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
10. Seluruh keluarga "Bandung Team", "Jakarta Team" dan keluarga "*Boystalk*" yang gak bisa biasa-biasa lagi.
11. Seluruh keluarga Lintas Jalur Teknik Mesin. Mari kita sukses bersama.

Kritik dan saran penulis harapkan yang sifatnya membangun serta mengarah pada perbaikan untuk penyempurnaan karya tulis selanjutnya, semoga karya tulis ini bermanfaat khususnya bagi penulis sendiri dan bagi pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2016

Handi Prasetya

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL INDONESIA .....	i
HALAMAN JUDUL INGGRIS.....	ii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB I PENDAHULUAN .....	1
I.1    Latar Belakang .....	1
I.2    Perumusan Masalah .....	3
I.3    Batasan Masalah .....	4
I.4    Tujuan Penelitian .....	5
I.5    Manfaat Penelitian .....	5
I.6    Sistematika Penulisan .....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
II.1    Dasar Teori <i>Water Hammer</i> .....	9
II.2    Fenomena <i>Water Hammer</i> .....	10
II.3    Penyebab <i>Water Hammer</i> .....	12
II.4    Pencegahan <i>Water Hammer</i> .....	13
II.5    Perangkat Lunak AFT Impulse 4.0.....	15
II.6    Metode Karakteristik <i>Water Hammer</i> .....	16
II.6.1    Persamaan momentum .....	16
II.6.2    Persamaan kontinuitas.....	16

II.6.3	Kecepatan perambatan gelombang tekanan .....	19
II.7	Teori pompa .....	20
II.7.1	Pompa paralel .....	21
II.7.2	<i>Trip</i> dengan inersia dan tidak ada aliran balik.....	23
II.8	Proteksi <i>Water Hammer</i> di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya .....	23
II.8.1	Teori <i>gas accumulator</i> .....	24
II.8.2	Teori <i>flywheel</i> .....	25
II.9	Estimasi Momen Inersia Komponen Berputar Pada Pompa .....	28
II.9.1	Estimasi momen inersia <i>impeller</i> pompa dan motor penggerak .....	28
II.9.2	Estimasi momen inersia <i>flywheel</i> .....	29
II.9.3	Estimasi momen inersia <i>shaft</i> / poros pemutar pompa .....	29
II.10	Estimasi Tebal Pipa <i>Discharge</i> Minimum Sesuai Standar Perhitungan AWWA ( <i>American Water Works Association</i> ) <i>Manual</i> M11.....	30
II.11	Kajian terdahulu.....	31
II.11.1	Simpson, Angus R., dkk. (2008) .....	31
II.11.2	Constantin, Anca (2011).....	35
BAB III	METODOLOGI .....	39
III.1	Skema Diagram Alir .....	39
III.2	Proses Pemodelan Sistem Perpipaan.....	41
III.3	Skema Pemodelan Sistem Perpipaan Pada Simulasi ...	50
III.4	Skenario Operasi Pompa.....	51

III.4.1	Skenario 2 pompa <i>ON</i> dan 2 pompa <i>OFF</i> ( <i>trip</i> dengan inersia tanpa aliran balik).....	52
III.4.2	Skenario 4 pompa <i>OFF</i> ( <i>trip</i> dengan inersia tanpa aliran balik).....	53
III.5	Titik-titik Analisa Pemodelan Sistem Perpipaan Pada Simulasi .....	54
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	59
IV.1	Analisa <i>Steady</i> .....	59
IV.2	Hasil Simulasi .....	60
IV.2.1	Skenario 2 pompa <i>on</i> dan 2 pompa <i>off</i> – dengan variasi <i>flywheel</i> .....	60
IV.2.2	Skenario 2 pompa <i>on</i> dan 2 pompa <i>off</i> – dengan variasi <i>flywheel</i> dan penambahan <i>gas accumulator</i> .....	65
IV.2.3	Perbandingan grafik untuk pemodelan dengan variasi <i>flywheel</i> vs pemodelan dengan variasi <i>flywheel</i> dan penambahan <i>gas accumulator</i> pada kondisi 2 pompa <i>OFF</i> .....	68
IV.2.4	Skenario 4 pompa <i>off</i> – dengan variasi <i>flywheel</i> .....	70
IV.2.5	Skenario 4 pompa <i>off</i> – dengan variasi <i>flywheel</i> dan penambahan <i>gas accumulator</i> .....	73
IV.2.6	Perbandingan grafik untuk pemodelan dengan variasi <i>flywheel</i> vs pemodelan dengan variasi <i>flywheel</i> dan penambahan <i>gas accumulator</i> pada kondisi 4 pompa <i>OFF</i> .....	75
IV.3	Perhitungan Kekuatan Tebal Pipa <i>Discharge</i> P5 Terhadap Tekanan Statik Maksimum .....	77
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN .....	79
V.1	Kesimpulan .....	79

V.2	Saran .....	81
DAFTAR PUSTAKA.....		83
LAMPIRAN A		
LAMPIRAN B		
LAMPIRAN C		
LAMPIRAN D		

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Skema Proses <i>Water Hammer</i> Pada Aplikasi Umum <sup>[2]</sup> .....	9
<b>Gambar 2.2</b> Skema Fenomena <i>Water Hammer</i> Setelah Penutupan <i>Valve</i> Pada (a) $0 \leq t \leq L/a$ , (b) $L/a \leq t \leq 2L/a$ , (c) $2L/a \leq t \leq 3L/a$ , dan (d) $3L/a \leq t \leq 4L/a$ <sup>[3]</sup> .....	10
<b>Gambar 2.3</b> Karakteristik Metode Grid <sup>[3]</sup> .....	18
<b>Gambar 2.4</b> Operasi Tunggal, Seri Dan Paralel Dari Pompa-pompa Dengan Karakteristik Yang Sama <sup>[5]</sup> ....	21
<b>Gambar 2.5</b> <i>Gas accumulator</i> <sup>[6]</sup> .....	25
<b>Gambar 2.6</b> Efek <i>Flywheel</i> <sup>[7]</sup> .....	27
<b>Gambar 2.7</b> <i>Flywheel</i> <sup>[8]</sup> .....	29
<b>Gambar 2.8</b> Profil Pipa Yang Dipertimbangkan Pada Studi Parametrik <sup>[10]</sup> .....	32
<b>Gambar 2.9</b> Kegagalan Pompa Pada Stasiun Pompa Kimba dan Caralue Tanpa Alat Proteksi <i>Water Hammer</i> <sup>[10]</sup> .....	32
<b>Gambar 2.10</b> Kegagalan Pompa Pada Stasiun Pompa Kimba dan Caralue Dengan Alat Proteksi <i>Air Chamber</i> Pada <i>Node 8</i> <sup>[10]</sup> .....	33
<b>Gambar 2.11</b> Kegagalan Pompa Pada Stasiun Pompa Kimba dan Caralue Dengan Alat Proteksi <i>Flywheel</i> <sup>[10]</sup> .....	33
<b>Gambar 2.12</b> <i>Output</i> Dari Studi Parametrik <sup>[10]</sup> .....	34
<b>Gambar 2.13</b> Skema Instalasi Perpipaian <sup>[11]</sup> .....	36
<b>Gambar 2.14</b> Variasi Tekanan Pada Sistem Perpipaian Yang Tidak Menggunakan <i>Gas accumulator</i> <sup>[11]</sup> .....	36
<b>Gambar 2.15</b> Variasi Tekanan Pada Sistem Perpipaian Yang Menggunakan <i>Gas accumulator</i> Dengan Volume Udara Kecil <sup>[11]</sup> .....	36

<b>Gambar 2.16</b>	Variasi Tekanan Pada Sistem Perpipaan Yang Menggunakan <i>Gas accumulator</i> Dengan Volume Udara Besar <sup>[11]</sup> .....	37
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian .....	40
<b>Gambar 3.2</b>	Skema Instalasi Perpipaan Di Rumah Pompa Unit IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya .....	41
<b>Gambar 3.3</b>	Model Sistem Perpipaan Di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya Dengan <i>Software</i> AFT Impulse 4.0 .....	42
<b>Gambar 3.4</b>	Kurva Performa Pompa Sentrifugal Torishima CDMV 500x400 .....	44
<b>Gambar 3.5</b>	Skema <i>Flywheel</i> <sup>[12]</sup> .....	47
<b>Gambar 3.6</b>	<i>Layout</i> Pemodelan Instalasi Perpipaan Dengan Variasi <i>Flywheel</i> .....	50
<b>Gambar 3.7</b>	<i>Layout</i> Pemodelan Instalasi Perpipaan Dengan Variasi <i>Flywheel</i> Dan Penambahan <i>Gas Accumulator</i> .....	50
<b>Gambar 3.8</b>	Skenario Simulasi Dengan Kondisi 2 Pompa <i>ON</i> dan 2 Pompa <i>OFF</i> .....	52
<b>Gambar 3.9</b>	Skenario Simulasi Dengan Kondisi 4 Pompa <i>OFF</i> .....	53
<b>Gambar 3.10</b>	Titik-titik Analisa Pada Simulasi Dengan Skenario 2 Pompa <i>ON</i> & 2 Pompa <i>OFF</i> ....	54
<b>Gambar 3.11</b>	Titik-titik Analisa Pada Simulasi Dengan Skenario 2 Pompa <i>ON</i> & 2 Pompa <i>OFF</i> ....	56
<b>Gambar 4.1</b>	Hasil Simulasi Untuk Analisa <i>Steady</i> Pada Pemodelan Sistem Perpipaan di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya....	59

<b>Gambar 4.2</b>	Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 <i>Inlet (Discharge Pompa 1) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Pada Skenario 2 Pompa OFF....</i> .....	60
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P17 <i>Inlet (Discharge Pompa 3) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Pada Skenario 2 Pompa OFF....</i> .....	62
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P41 <i>Inlet (Pipa Discharge Utama) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Pada Skenario 2 Pompa OFF....</i> .....	63
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 <i>Inlet (Discharge Pompa 1) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Dan Penambahan Gas Accumulator Pada Skenario 2 Pompa OFF.....</i>	65
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P17 <i>Inlet (Discharge Pompa 3) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Dan Penambahan Gas Accumulator Pada Skenario 2 Pompa OFF.....</i>	66
<b>Gambar 4.7</b>	Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P46 <i>Inlet (Sebelum Gas Accumulator) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Dan Penambahan Gas Accumulator Pada Skenario 2 Pompa OFF.....</i>	67
<b>Gambar 4.8</b>	Grafik Perbandingan Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 <i>Inlet</i> Dengan Variasi Ukuran <i>Flywheel</i> ke-3 vs Pipa P5 <i>Inlet</i> Dengan Variasi Ukuran <i>Flywheel</i> ke-3 Dan Penambahan <i>Gas Accumulator</i> Pada Skenario 2 Pompa <i>OFF.....</i>	69
<b>Gambar 4.9</b>	Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 <i>Inlet (Discharge Pompa 1) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Pada Skenario 4 Pompa OFF....</i> .....	70

- Gambar 4.10** Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P41 *Inlet* (Pipa *Discharge* Utama) Dengan Variasi Ukuran *Flywheel* Pada Skenario 4 Pompa *OFF* .....72
- Gambar 4.11** Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 *Inlet* (*Discharge* Pompa 1) Dengan Variasi Ukuran *Flywheel* Dan Penambahan *Gas Accumulator* Pada Skenario 4 Pompa *OFF* ....73
- Gambar 4.12** Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P46 *Inlet* (Sebelum *Gas Accumulator*) Dengan Variasi Ukuran *Flywheel* Dan Penambahan *Gas Accumulator* Pada Skenario 4 Pompa *OFF* ....74
- Gambar 4.13** 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* ....76
- Gambar 5.1** Alternatif *Layout* Pemodelan Pada Simulasi *Water Hammer* Dengan AFT *Impulse* .....81

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b>	Karakteristik Untuk Fluida Air Pada Suhu 30 <sup>0</sup> C .....	43
<b>Tabel 3.2</b>	Spesifikasi Pompa Produksi di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya <sup>[12]</sup> .....	44
<b>Tabel 3.3</b>	Spesifikasi Elektro Motor Penggerak Pompa di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya <sup>[12]</sup> .....	45
<b>Tabel 3.4</b>	Spesifikasi <i>Gas Accumulator</i> Pada Pemodelan Sistem Perpipaan.....	46
<b>Tabel 3.5</b>	Variasi Ukuran <i>Flywheel</i> Pada Simulasi Sistem Perpipaan.....	48
<b>Tabel 3.6</b>	Data Momen Inersia Untuk Masing-masing Variasi <i>Flywheel</i> .....	48
<b>Tabel 3.7</b>	Data Momen Inersia Total Untuk Masing-masing Variasi <i>Flywheel</i> .....	49
<b>Tabel 3.8</b>	Data Fluktuasi Debit di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya.....	51
<b>Tabel 3.9</b>	Detail Titik Analisa Pada Simulasi Dengan Skenario 2 Pompa <i>ON</i> & 2 Pompa <i>OFF</i> .....	55
<b>Tabel 3.10</b>	Detail Titik Analisa Pada Simulasi Dengan Skenario 4 Pompa <i>OFF</i> .....	56

[halaman ini sengaja dikosongkan]

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Sistem jaringan perpipaan menjadi salah satu komponen penting dalam perannya sebagai penunjang sistem produksi maupun sistem distribusi pada sektor industri. Sebagai contoh yakni sistem perpipaan yang dibuat untuk mengantarkan air dari satu sumber ke sumber lainnya dengan jarak dan elevasi tertentu. Sistem jaringan instalasi perpipaan yang baik tentu didukung dengan perencanaan yang tepat serta pemilihan komponen penyusun sistem perpipaan yang sesuai dengan spesifikasi tertentu sehingga mampu memenuhi kebutuhan dalam mendistribusikan air dari satu tempat ke tempat lainnya.

Jaringan perpipaan mengalami beberapa fenomena seperti distribusi fluida itu sendiri dan juga fenomena *water hammer*. *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. Hal ini akan berdampak buruk terhadap instalasi perpipaan terutama pipa sebagai jalur utama fluida dialirkan. Penanganan yang tidak tepat terhadap dampak tersebut dapat mengakibatkan terjadinya perubahan tekanan yang tinggi. Perubahan tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya dampak yang buruk bagi sistem perpipaan, diantaranya adalah rusaknya atau pecahnya pipa sistem dengan konsekuensi seluruh sistem peralatan harus mati total.

Fenomena *water hammer* ini sering terjadi di daerah *discharge* pompa pada saat pengoperasian dan kegagalan pompa beroperasi. Beberapa cara untuk mengurangi dampak *water hammer* adalah dengan menambahkan alat proteksi di daerah *discharge* pompa tersebut. Sebagai contoh, pemasangan *gas accumulator* yang umumnya dipasang pada *discharge* pompa

berfungsi mengurangi fluktuasi tekanan mendadak akibat pengoperasian dan kegagalan pompa beroperasi. *Gas accumulator* dengan volume udara yang besar akan sangat signifikan dalam mengurangi fluktuasi tekanan akibat efek *water hammer* sedangkan *gas accumulator* yang kecil sebaliknya akan sedikit mengurangi fluktuasi tekanan akibat *water hammer*. 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. Webb menyatakan bahwa besarnya lonjakan tekanan yang terjadi di pompa bergantung pada tingkat perlambatan dari komponen berputarnya. Ia juga menyatakan bahwa pompa dengan dengan momen inersia yang kecil akan memperlambat putaran pompa dengan cepat kemudian berhenti sehingga menghasilkan pemisahan kolom air yang dapat menimbulkan lonjakan tekanan yang tinggi ketika terjadi kegagalan operasi pompa<sup>[1]</sup>.

Rumah pompa unit Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Karang Pilang milik PT PDAM Surya Sembada Surabaya, adalah salah satu unit yang bergerak dalam sektor produksi dan juga distribusi air bersih untuk area Surabaya dan sekitarnya. Unit IPAM Karang Pilang ini memiliki 3 rumah pompa yang memiliki sistem perpipaan yang berbeda dengan sistem proteksi *water hammer water hammer* yang berbeda pula. Untuk rumah pompa IPAM Karang Pilang 2 alat proteksi *water hammer* yang digunakan berupa penambahan *flywheel* pada instalasi pompa produksinya. Hal ini berbeda dengan rumah pompa unit IPAM Karang Pilang 1 dan 3 yang menggunakan *gas accumulator* sebagai alat proteksi *water hammer* nya.

Studi kasus untuk melihat pengaruh penggunaan *gas accumulator* dan juga pengaruh momen inersia dari *flywheel* terhadap perubahan tekanan akibat fenomena *water hammer* yang terjadi pada instalasi perpipaan di unit rumah pompa IPAM

Karang Pilang 2 ini belum dilakukan. Hal tersebut melatarbelakangi dilaksanakannya penelitian Tugas Akhir ini yang berjudul “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)”.

## **I.2 Perumusan Masalah**

*Water hammer* adalah fenomena terjadinya perubahan tekanan yang diakibatkan oleh penutupan *valve* yang cepat ataupun matinya pompa secara tiba-tiba, perubahan tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya dampak yang buruk bagi sistem perpipaan bahkan dapat merusak komponen penyusun sistem perpipaan tersebut. Pengoperasian pompa yang kurang baik atau padamnya arus listrik dapat menyebabkan sistem berhenti secara tiba-tiba. Oleh karena itu diperlukan pola operasi dan instalasi yang tepat untuk menghindari terjadinya *water hammer*.

Pemilihan alat proteksi *water hammer* akan mempengaruhi ketahanan sistem terhadap dampak *water hammer* yang timbul. Penggunaan gas accumulator di daerah *discharge* pompa serta penambahan *flywheel* pada instalasi pompa akan mempengaruhi ketahanan komponen perpipaan dalam melawan lonjakan tekanan yang terjadi akibat efek *water hammer* ketika pompa gagal beroperasi. Semakin besar ukuran *gas accumulator* maka akan semakin besar kapasitas volume udaranya dan itu akan sangat baik dalam meredam lonjakan tekanan yang terjadi. Semakin besar ukuran *flywheel* yang digunakan maka momen inersia yang tersimpan akan semakin besar juga dan momen inersia yang dihasilkan dari setiap komponen yang berputar pada instalasi pompa berfungsi untuk menunda atau memperlambat terjadinya lonjakan tekanan akibat *water hammer* yang bergerak menuju pompa. Sehingga aliran balik yang masuk ke dalam pompa tidak menyebabkan putaran impeller pompa berbalik arah dan menyerupai fenomena turbin yang tentu akan merusak

seluruh elemen motor penggerak. Perbedaan karakteristik *flywheel* ini menjadi landasan untuk melakukan variasi ukuran *flywheel* yang akan digunakan pada penelitian ini.

Efek *water hammer* sangat sulit diperkirakan karena terjadi secara cepat. Sehingga tanpa pengetahuan, informasi dan juga perhitungan yang rinci, sulit menyatakan apakah efek *water hammer* ini membahayakan untuk sistem tertentu, atau apakah efeknya dapat diabaikan. Maka dari itu untuk mempermudah dalam memperoleh data mengenai fenomena *water hammer* pada penelitian ini nantinya akan dilakukan pemodelan dengan menggunakan *software* AFT Impulse 4.0. Pemodelan kali ini dilakukan sebagai tindak lanjut untuk mempelajari fenomena *water hammer* yang terjadi pada instalasi perpipaan dan juga melihat peran penggunaan alat proteksi baik itu *gas accumulator* maupun *flywheel* beserta variasi ukurannya dalam melawan aliran balik akibat kegagalan pompa beroperasi serta pengaruhnya terhadap komponen perpipaan lainnya.

### **I.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah diperlukan untuk memperoleh hasil permodelan yang tepat, batasan yang digunakan antara lain:

1. Fluida kerja yang digunakan dalam adalah fluida air dan aliran *turbulent & fully developed*.
2. Tidak terjadi perubahan temperatur selama air mengalir pada sistem perpipaan.
3. Analisa dilakukan pada saat kondisi aliran *transient*.
4. *Head* aliran pada reservoir konstan.
5. Pengamatan *water hammer* hanya difokuskan untuk mengetahui fenomena *water hammer* dan penggunaan proteksi sebagai alternatif penanggulangan *water hammer*.
6. Jarak *gas accumulator* terhadap pompa konstan.
7. Penambahan variasi ukuran *flywheel* tidak mempertimbangkan kemampuan konstruksi rangkaian shaft pemutar pompa.

8. Perubahan momentum aliran terjadi akibat kondisi yang ekstrim yakni pada saat dua pompa operasi mati dan juga pada saat keempat pompa operasi mati akibat adanya kegagalan pengoperasian.
9. Solusi tugas akhir ini hanya berlaku pada sistem perpipaan yang disimulasikan dengan *layout* yang sama.
10. Kesimpulan yang didapat hanya digunakan untuk studi kasus khusus di perpipaan rumah pompa unit IPAM Karang Pilang 2 dan pada sistem perpipaan dengan *layout* yang sama.

#### **I.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari pemodelan ini adalah:

1. Mempelajari hubungan menyala dan matinya pompa terhadap fenomena *water hammer* pada sistem perpipaan air bersih.
2. Mempelajari fluktuasi tekanan pada sistem perpipaan yang tidak menggunakan *gas accumulator* dengan sistem perpipaan yang menggunakan *gas accumulator*.
3. Mempelajari fluktuasi tekanan pada sistem perpipaan dengan menggunakan variasi ukuran *flywheel* yang berbeda, yaitu dengan variasi diameter luar 1100mm, 1200mm dan 1300mm dan dengan variasi tebal masing-masing 300mm, 400mm dan 500mm.
4. Mempelajari hubungan penggunaan alat proteksi *gas accumulator* dan momen inersia dari *flywheel* serta komponen berputar pada pompa terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi.

#### **I.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari pelaksanaan kajian ini antara lain:

1. Memahami karakteristik *gas accumulator* dan *flywheel* dalam sistem perpipaan.

2. Mencegah kerusakan pada sistem perpipaan yang ditimbulkan oleh fenomena *water hammer*.

## **I.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan proposal tugas akhir ini terbagi menjadi beberapa bab yang dapat dijabarkan sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang permasalahan, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi teori-teori yang mendukung penelitian secara umum, sistem instalasi perpipaan yang diteliti, dasar teori *water hammer*, fenomena *water hammer*, penyebab dan pencegahan *water hammer*, *software AFT Impulse 4.0*, metode karakteristik, sistem proteksi *water hammer* yang digunakan serta kajian-kajian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini.

### **BAB III METODOLOGI**

Bab ini terdiri atas penjelasan tentang prosedur analisa dan data-data yang diperoleh dari rumah pompa unit IPAM Karang Pilang 2 – PT PDAM Surya Sembada Surabaya.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang data instalasi jaringan perpipaan, analisa sistem pada kondisi *steady*, data grafik hasil simulasi untuk setiap skema pemodelan dan skenario operasi pompa serta perhitungan tebal pipa yang direkomendasikan untuk sistem perpipaan dalam menahan tekanan maksimum akibat efek *water hammer*.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

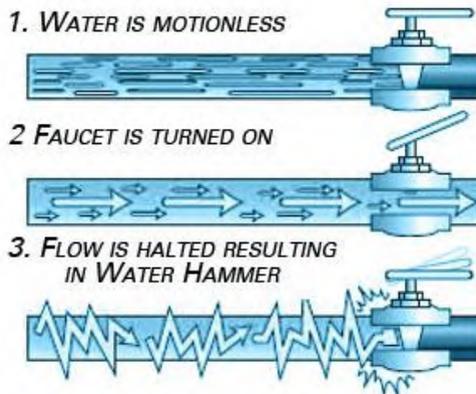
Bab ini berisikan kesimpulan dari hasil analisa serta saran yang perlu diberikan dari hasil perhitungan dan pemodelan yang telah dilakukan.

[halaman ini sengaja dikosongkan]

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

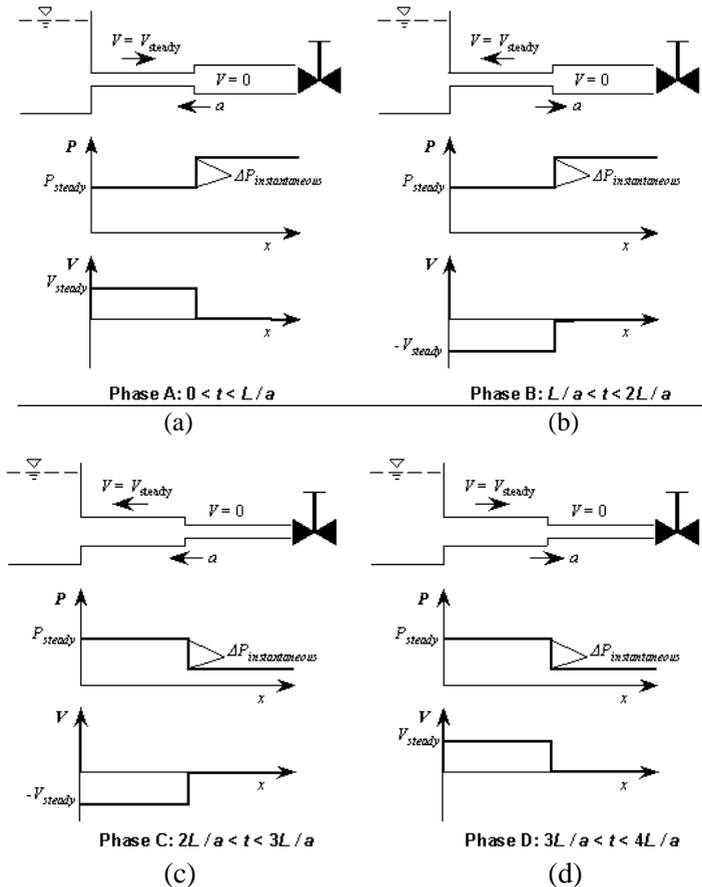
### II.1 Dasar Teori *Water Hammer*

*Water hammer* atau pukulan air adalah fluktuasi tekanan yang timbul akibat peningkatan dan penurunan kecepatan aliran dalam perpipaan yang terjadi secara mendadak. Ketika katup ditutup secara mendadak ataupun pompa yang sedang berkerja tiba-tiba mati mendadak (akibat dimatikan atau listrik padam) maka air pun akan berhenti mengalir di dalam pipa secara tiba-tiba, kemudian energi tekanan atau gelombang tekanan yang timbul ditransfer ke katup dan dinding pipa. Gelombang tekanan berjalan mundur sampai menghadapi rintangan yang berikutnya kemudian ke depan lalu kembali lagi. Besar energi tekanan atau gelombang tekanan semakin lama semakin mengecil karena kerugian gesekan ketika bergerak bolak-balik. Skema proses *water hammer* pada aplikasi secara umum ditunjukkan oleh gambar berikut.



Gambar 2.1 Skema Proses *Water Hammer* Pada Aplikasi Umum<sup>[2]</sup>

## II.2 Fenomena *Water Hammer*



**Gambar 2.2** Skema Fenomena *Water Hammer* Setelah Penutupan *Valve* Pada (a)  $0 \leq t \leq L/a$ , (b)  $L/a \leq t \leq 2L/a$ , (c)  $2L/a \leq t \leq 3L/a$ , dan (d)  $3L/a \leq t \leq 4L/a$ <sup>[3]</sup>

Gambar di atas menunjukkan bagaimana fenomena *water hammer* itu terjadi ketika *valve* mengalami penutupan secara tiba-tiba. Dimulai dari gambar (a) dimana penutupan *valve* terjadi secara tiba-tiba pada ujung pipa yang berasal dari *storage* deposit

dalam waktu  $t = 0$  mengakibatkan fluida yang terdekat dengan ujung ini terkompresi, pada waktu yang bersamaan dimana pergerakannya menurun tajam mendekati nol dengan kondisi dinding pipa mengalami ekspansi. Segmen fluida terus-menerus terkompresi karena liquid di bagian hulu terus bergerak tanpa terpengaruh kecepatannya sampai liquid tersebut terkena efek kompresi. Tekanan tinggi yang dihasilkan bergerak naik (ke bagian hulu) seperti gelombang, menghentikan aliran fluida hingga berhenti dan mengkompresikannya serta mengembangkan dinding pipa.

Ketidakseimbangan dalam *upstream* ujung pipa terjadi ketika gelombang tekanan tiba. fluida yang diisikan ke dalam pipa yang mengembang mulai mengalir dengan kecepatan mendekati kecepatan fluida yang mempunyai nilai yang sama sebelum penutupan *valve*, dinding pipa kembali ke dimensi awalnya dan fluida memperoleh kecepatan  $V_0$  dengan arah berlawanan (sekarang dari *valve* menuju penampung). Proses ini dihasilkan pada kecepatan suara pada waktu  $a$  detik melewati pipa. Sesaat  $2L/a$  detik, gelombang telah mencapai *valve* dan tekanan pada sepanjang pipa telah kembali kepada harga normalnya, menjadi kecepatan liquid di dalam sepanjang pipa sama dengan  $V_0$  dan menuju tempat penampungan.

Kondisi *valve* ditutup penuh mengakibatkan tidak ada fluida yang mempertahankan gelombang yang melewatinya dan kemudian terjadi tekanan negatif (-H), sehingga fluida diperlambat kembali sampai diam. Gelombang tekanan rendah ini mengalir ke *upstream* dengan kecepatan tertentu membuat fluida mengalami perlambatan hingga kesetimbangan dan secara simultan diekspresikan sampai tekanan rendah sehingga memicu terjadinya kompresi pada dinding pipa. Proses pada saat  $3L/a$  detik menghasilkan gelombang tekanan negatif sampai pada ujung hulu pipa, fluida dalam pipa diam tetapi *uniform* pada beban yang lebih kecil yang salah satunya belum tertutup. Ketidaksetimbangan di dalam deposit menyebabkan fluida mulai bergerak dan deposit ke pipa dan memperoleh kecepatan  $V_0$ .

dengan arah ke *valve*. Kondisi seluruh sistem kembali sama dengan ketika kita menutup *valve* dan deskripsi proses diulangi secara periodik dengan periode 4L/a detik.

### **II.3 Penyebab *Water Hammer***

Pada sistem transportasi air hampir tidak pernah dalam kondisi *steady*. Tekanan dan arus aliran yang berubah-ubah sebagai akibat dari perubahan permintaan air, pemadaman listrik, kerusakan peralatan dan lain- lain. Perubahan kecepatan aliran tersebut dapat lebih tinggi maupun lebih rendah dari kecepatan aliran mula-mula. Perubahan kecepatan aliran air yang sangat cepat dapat menimbulkan energi tekanan yang besar atau biasa disebut *water hammer*.

Penyebab *water hammer* sangat banyak, namun secara umum ada 4 (empat) penyebab terjadinya *water hammer* yaitu:

1. Pengoperasian pompa.

Pengoperasian pompa dapat mengakibatkan peningkatan tekanan secara mendadak dan akhirnya menyebabkan fenomena *water hammer*.

2. Kegagalan pompa beroperasi.

Kegagalan pompa beroperasi bisa disebabkan banyak hal, salah satunya adalah pemadaman listrik, rusaknya pompa dan lain-lain. Kegagalan pompa dapat menyebabkan turunnya tekanan di daerah *discharge* pompa, penurunan tekanan tersebut diikuti dengan fluktuasi tekanan yang berosilasi sehingga mengakibatkan fenomena *water hammer*.

3. Penutupan dan pembukaan *valve*.

Penutupan dan pembukaan *valve* dapat merubah kecepatan aliran fluida dalam pipa dan perubahan kecepatan tersebut dapat lebih tinggi maupun lebih rendah dari kecepatan awal fluida. Perubahan kecepatan aliran tersebut akan menyebabkan *water hammer*.

4. Pengoperasian yang tidak benar.

Pengoperasian sistem perpipaan yang tidak benar mengakibatkan perubahan tekanan mendadak yang menimbulkan *water hammer*.

## II.4 Pencegahan *Water Hammer*

Berikut ini adalah beberapa alat yang digunakan untuk pencegahan *water hammer* pada sistem perpipaan.

1. *Check Valve*.

*Water hammer* sering merusak pompa sentrifugal ketika terjadi pemadaman listrik. Cara terbaik mencegah *water hammer* pada situasi ini adalah penambahan *check valve* di *discharge* pompa. *Valve* tersebut akan menutup secara perlahan-lahan. Penutupan *valve* secara perlahan-lahan ini akan mengurangi peningkatan tekanan secara mendadak. *Check valve* berguna untuk mencegah kerusakan pompa dari *water hammer*.

2. *Relief Valve*.

*Relief valve* berguna mengurangi fluktuasi *water hammer*. *Relief valve* dapat mengontrol perubahan tekanan dalam pipa. Bila tekanan meningkat melebihi batas tertentu maka *relief valve* terbuka, sebaliknya jika tekanan turun hingga dibawah batas tertentu maka *relief valve* menutup. *Relief valve* merupakan metode yang efektif mengontrol tekanan berlebih pada rumah pompa.

3. *Vacuum Breaker Valve*.

*Vacuum Breaker Valve* berguna untuk mengurangi fluktuasi *water hammer*. Jika tekanan turun hingga ke titik yang sangat rendah, maka diperlukan *vacuum breaker valve* untuk mengurangi penurunan tekanan. Ukuran *vacuum breaker valve* harus cukup besar untuk menampung udara agar tekanan dalam pipa tidak terlalu rendah.

4. *Variable Speed Device (VSD)*.  
*Variable Speed Device (VSD)* berguna untuk mengurangi fluktuasi *water hammer*. Kecepatan pompa pada sistem perpipaan menggunakan *VSD* diatur berdasarkan tekanan *discharge* pompa sehingga mengurangi fluktuasi tekanan.
5. *Surge Vessel*.  
*Surge vessel* berguna mengurangi fluktuasi *water hammer*. *Surge vessel* adalah sebuah *tank/vessel* berbentuk seperti pipa yang sangat panjang yang salah satu ujungnya terhubung dengan udara luar dan ujung lainnya terhubung dengan pipa pada sistem perpipaan. Kelebihan tekanan pada perpipaan dibuang ke *surge vessel* sehingga tekanan berlebih pada pipa dapat dikurangi. *Surge vessel* juga dapat mengatasi tekanan positif maupun negatif.
6. *Gas Accumulator*.  
*Gas accumulator* berguna mengurangi fluktuasi *water hammer*. *Gas accumulator* adalah alat proteksi yang berfungsi mencegah terjadinya fluktuasi tekanan yang terjadi dalam sistem perpipaan akibat adanya aliran yang berhenti secara mendadak. *Gas accumulator* sendiri memiliki sistem kontrol sendiri untuk menjaga keseimbangan antara udara dan air. *Gas accumulator* memiliki pengaturan jumlah air dan udara yang harus ada di dalam tangki, ketika kondisi di dalam tangki kekurangan air maka *release valve* akan membuka sehingga air di dalam tangki akan naik, sedangkan apabila di dalam tangki kelebihan air maka udara yang sebelumnya dikompres di *receiver* diinjeksikan ke dalam tangki sehingga jumlah udara dan air di dalam tangki tetap terjaga.
7. *Flywheel*.  
*Flywheel* merupakan sebuah roda atau beban yang dipasangkan pada poros penghubung antara pompa dengan motor penggerak dan berguna untuk

meningkatkan momen inersia dari pompa, kemudian akan mengurangi lonjakan tekanan dan mencegah pemisahan kolom air ketika terjadi kegagalan pompa dalam pengoperasiannya. *Flywheel* bertujuan untuk memperlambat putaran poros yang terhubung dengan *impeller* pompa ketika pompa berhenti beroperasi sehingga putaran *impeller* pompa masih dapat melawan aliran balik akibat *water hammer* dan akan mencegah putaran *impeller* pompa tersebut berbalik arah dan menyerupai fenomena turbin yang tentu akan merusak seluruh elemen motor penggerak.

## **II.5 Perangkat Lunak AFT Impulse 4.0**

AFT Impulse merupakan suatu program grafis untuk pemodelan *water hammer* dan *surge transient* pada instalasi perpipaan yang menghubungkan dari proses sederhana sampai proses yang kompleks untuk membuat model instalasi *water hammer*. 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.

Pemodelan dengan menggunakan AFT Impulse ini pada dasarnya adalah sebagai alat bantu untuk melihat dampak yang ditimbulkan akibat fenomena aliran *transient* yang terjadi pada sistem perpipaan sehingga mampu dilakukan pertimbangan untuk mengambil keputusan di lapangan. Juga sebagai salah satu pendekatan yang bisa dijadikan dasar penilaian terhadap interaksi antar komponen perpipaan yang ada, dengan demikian bisa dilakukan pencegahan untuk menghindari potensi dampak yang ditimbulkan oleh fenomena *water hammer* dan juga sistem *transient* yang tidak diinginkan lainnya.

## II.6 Metode Karakteristik *Water Hammer*

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:

### II.6.1 Persamaan momentum

Persamaan momentum dapat dirumuskan sebagai berikut<sup>[4]</sup>.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \sin(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

- $P$  = tekanan (N/m<sup>2</sup>)
- $V$  = kecepatan (m/s<sup>2</sup>)
- $\rho$  = densitas (kg/m<sup>3</sup>)
- $x$  = panjang pipa (m)
- $t$  = waktu (s)
- $g$  = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
- $D$  = diameter (m)
- $f$  = faktor gesekan pipa
- $\alpha$  = sudut kemiringan pipa.

### II.6.2 Persamaan kontinuitas

Persamaan kontinuitas dapat dirumuskan sebagai berikut<sup>[4]</sup>.

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

$a$  = kecepatan gelombang.

Persamaan (2.1) dan (2.2) adalah persamaan diferensial parsial dengan dua data yang tidak diketahui yaitu data P dan V dan dua variabel independen x dan t. Metode karakteristik akan mengkonversikan kedua persamaan diferensial tersebut. Persamaan tersebut di identifikasi sebagai  $L_1$  dan  $L_2$ .

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \sin(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = L_1 \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = L_2 \dots\dots\dots(2.4)$$

Kombinasikan kedua persamaan ini akan menghasilkan persamaan berikut.

$$\pm dP + \frac{a}{A} d\dot{m} + \rho g dz + \frac{f}{2\rho DA^2} dx \dot{m}|\dot{m}| = 0 \dots\dots\dots(2.5)$$

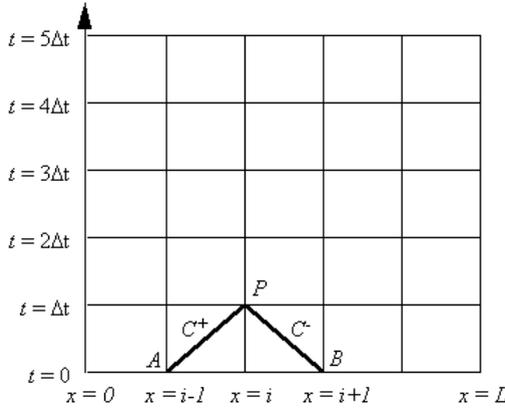
Integrasi persamaan (2.5) dengan tanda positif sepanjang karakteristik  $C^+$  dari titik A ke P (gambar 2.3) adalah:

$$\int_{P_A}^{P_p} dP + \frac{a}{A} \int_{\dot{m}_A}^{\dot{m}_p} d\dot{m} + \rho g \int_{z_A}^{z_p} dz + \frac{f}{2\rho DA^2} \int_{x_A}^{x_p} \dot{m}|\dot{m}| dx = 0 \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana P menunjukkan solusi saat  $x=i$  pada waktu  $t= \Delta t$  dan A menunjukkan solusi saat  $x=i-1$  pada  $t=0$ . Persamaan karakteristik  $C^+$  dari titik A ke P.

Persamaan (2.6) dapat diintegrasikan sebagai berikut.

$$(P_p - P_A) + \frac{a}{A} (\dot{m}_p - \dot{m}_A) + \rho g (z_p - z_A) + \frac{f \Delta x}{2\rho DA^2} \dot{m}_p |\dot{m}_A| = 0 \dots\dots\dots(2.7)$$



**Gambar 2.3 Karakteristik Metode Grid<sup>[3]</sup>**

Dengan cara yang sama untuk karakteristik \$C^-\$ dari titik B ke P:

$$-(P_p - P_A) + \frac{a}{A}(\dot{m}_p - \dot{m}_A) + \rho g(z_p - z_A) + \frac{f\Delta x}{2\rho DA^2} \dot{m}_p |\dot{m}_A| = 0 \dots\dots\dots (2.8)$$

Memperkenalkan dua parameter dibawah ini:

- Impedan:

$$B = \frac{a}{A} \dots\dots\dots (2.9)$$

- Resistan:

$$R = \frac{f\Delta x}{2\rho DA^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

Persamaan (2.7) dan (2.8) kemudian menjadi:

$$\begin{aligned} (P_p - P_A) + B(\dot{m}_p - \dot{m}_A) + \rho g(z_p - z_A) + R\dot{m}_p |\dot{m}_A| &= 0 \\ -(P_p - P_A) + B(\dot{m}_p - \dot{m}_A) + \rho g(z_p - z_A) + R\dot{m}_p |\dot{m}_A| &= 0 \end{aligned}$$

Substitusi variabel umum untuk A, B dan P dan disederhanakan menjadi persamaan berikut.

$$P_{i,new} = C_p - B_p \dot{m}_{i,new} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$P_{i,new} = C_M - B_M \dot{m}_{i,new} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} C_P &= P_{i-1,old} + B\dot{m}_{i-1,old} - \rho g(z_i - z_{i-1}) \\ C_M &= P_{i-1,old} + B\dot{m}_{i-1,old} - \rho g(z_i - z_{i+1}) \\ B_P &= B + R|\dot{m}_{i-1,old}| \\ B_M &= B + R|\dot{m}_{i+1,old}| \end{aligned}$$

Persamaan (2.11) dan (2.12) disebut sebagai persamaan kompatibilitas<sup>[4]</sup>. Parameter yang diketahui adalah C<sub>p</sub>, C<sub>M</sub>, B<sub>P</sub> dan B<sub>M</sub>, yang tidak diketahui dalam persamaan (2.11) dan (2.12) adalah P<sub>i,new</sub> dan ṁ<sub>i,new</sub> sehingga ada dua persamaan dengan dua variabel yang tidak diketahui.

### II.6.3 Kecepatan perambatan gelombang tekanan

Fenomena *water hammer* terjadi ketika aliran dihentikan secara mendadak dan dirubah menjadi tekanan. Hubungan antara kecepatan dan perubahan tekanan dijelaskan dalam persamaan *Joukowsky*. Kecepatan perambatan gelombang tekanan di dalam pipa diformulasikan dari modulus bulk fluida dan modulus bulk elastisitas<sup>[4]</sup>. Kecepatan perambatan gelombang tekanan dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Delta p_{jok} &= \rho a \Delta v \\ a^2 &= \frac{K/\rho}{1+c_1[(K/E)(D/e)]} \dots\dots\dots(2.13) \end{aligned}$$

Keterangan:

- a = kecepatan gelombang fluida dalam pipa (m/sec)
- Δp = perubahan tekanan
- Δv = perubahan kecepatan
- K = modulus bulk fluida (N/m<sup>2</sup>)
- P = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)
- D = diameter pipa (m)

- E = modulus elastisitas (N/m<sup>2</sup>)
- e = ketebalan pipa (m)
- c<sub>1</sub> = faktor koreksi yang tergantung pada instalasi pipa.

**II.7 Teori pompa**

Pemodelan pompa dapat dilakukan dengan melihat data perubahan pada kecepatan pompa ataupun data inersia dimana kecepatan pompa tersebut dikalkulasikan<sup>[3]</sup>. Model pompa dengan kecepatan diketahui dan kurva pompa dapat dimodelkan secara kuadrat, maka:

$$\Delta H = a + bQ_{pump} + c Q_{pump}^2 \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana nilai *a*, *b* dan *c* diperoleh dari kurva pompa yang sesuai dengan data vendor. Kurva itu mengasumsikan pompa beroperasi pada kecepatan 100%. Dan selama *transient*, kecepatan pompa akan berubah. Persamaan pompa diberikan sebagai berikut.

$$\frac{\Delta H}{a^2} = konstan1 \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\frac{Q}{a} = konstan2 \dots\dots\dots (2.16)$$

Keterangan:

- a* = kecepatan pompa.

Persamaan kuadrat untuk *flow rate* pompa dapat ditentukan dengan formula kuadrat sebagai berikut.

$$Q_{pump} = \left( \frac{B_{p,up} + B_{M,down} - b\alpha}{2c} \right) \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{4b(\alpha^2 a + C_{P,up} - C_{M,down})}{(B_{P,up} + B_{M,down} - b\alpha)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \dots\dots (2.17)$$

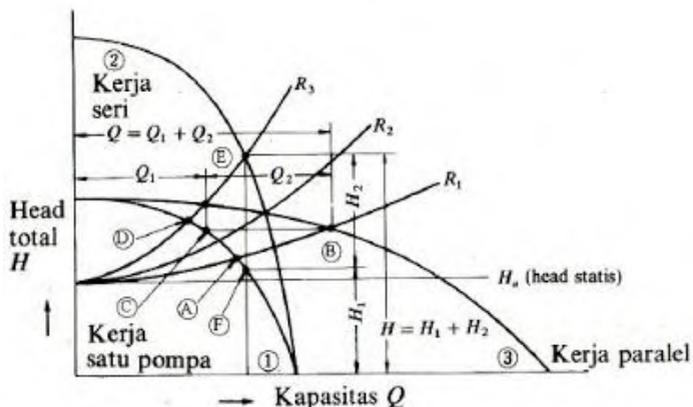
Dengan solusi *flow rate* pompa, tekanan pada hulu dan hilir pompa dapat ditentukan dari persamaan (2.11) dan (2.12). Ada empat model pompa pada program AFT Impulse yang dapat menjelaskan efek inersia pompa dan juga memprediksikan

kecepatan pompa dari waktu ke waktu. Dua model memungkinkan adanya aliran balik sementara dua model lainnya hanya berkerja dengan aliran maju atau tidak ada aliran balik. Model-model pompa tersebut adalah:

- *Trip* dengan inersia dan tidak ada aliran balik.
- *Startup* dengan inersia dan tidak ada aliran balik.
- *Trip* dengan inersia – empat kuadran.
- *Startup* dengan inersia – empat kuadran, torsi/kecepatan motor diketahui.

### II.7.1 Pompa paralel

Susunan paralel dapat digunakan bila diperlukan kapasitas yang besar yang tidak dapat dihandle oleh satu pompa saja, atau bila diperlukan pompa cadangan yang akan dipergunakan bila pompa utama rusak/diperbaiki. Agar unjuk kerja pompa yang disusun seri/paralel optimal, maka sebaiknya digunakan pompa dengan karakteristik yang sama. Karakteristik pompa yang disusun seri/paralel dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.4 Operasi Tunggal, Seri Dan Paralel Dari Pompa-pompa Dengan Karakteristik Yang Sama<sup>[5]</sup>

Gambar di atas menunjukkan kurva *head*-kapasitas dari pompa-pompa yang mempunyai karakteristik yang sama yang di pasang secara paralel atau seri. Dalam gambar ini kurva untuk pompa tunggal diberi tanda (1) dan untuk susunan seri yang terdiri dari dua buah pompa diberi tanda (2). Harga *head* kurva (2) diperoleh dari harga *head* kurva (1) dikalikan (2) untuk kapasitas (Q) yang sama. Kurva untuk susunan paralel yang terdiri dari dua buah pompa, diberi tanda (3). Harga kapasitas (Q) kurva (3) ini diperoleh dari harga kapasitas pada kurva (1) dikalikan (2) untuk *head* yang sama.

Dalam gambar ditunjukkan tiga buah kurva *head*-kapasitas sistem, yaitu R1, R2, dan R3. Kurva R3 menunjukkan tahanan yang lebih tinggi dibanding dengan R1 dan R2. Pengaruh tahanan yang tinggi itu sendiri merupakan efek kecepatan aliran pada sistem karena kapasitas yang menjadi lebih besar. Jika sistem mempunyai kurva *head*-kapasitas R3, maka titik kerja pompa 1 akan terletak di (D). Jika pompa ini disusun seri sehingga menghasilkan kurva (2) maka titik kerja akan pindah ke (E). Disini terlihat bahwa *head* titik (E) tidak sama dengan dua kali lipat *head* (D), karena ada perubahan (berupa kenaikan) kapasitas. Sekarang jika sistem mempunyai kurva *head*-kapasitas R1 yang relatif mendatar, maka titik kerja pompa (1) akan terletak di (A). Jika pompa ini disusun paralel sehingga menghasilkan kurva (3) maka titik kerjanya akan berpindah ke (B). Disini terlihat bahwa kapasitas dititik (B) tidak sama dengan dua kali lipat kapasitas dititik (A), karena ada perubahan (kenaikan) *head* sistem. Banyak cara untuk mendapatkan kurva *head*-kapasitas yang lebih mendatar lagi sehingga didapatkan kapasitas yang lebih besar bahkan mendekati dua kali lipat kapasitas dari satu pompa, yakni seperti perubahan ukuran pipa atau pengaturan bukaan pada katup.

Jika sistem mempunyai kurva karakteristik seperti R2 maka laju aliran akan sama untuk susunan seri maupun

paralel. Namun jika karakteristik sistem adalah seperti R1 dan R3 maka akan diperlukan pompa dalam susunan paralel atau seri. Susunan paralel pada umumnya untuk laju aliran besar, dan susunan seri untuk *head* yang tinggi pada operasi. Untuk susunan seri, karena pompa kedua menghisap zat cair bertekanan dari pertama, maka perlu perhatian khusus dalam hal kekuatan konstruksi dan kerapatan terhadap kebocoran dari rumah pompa.

### II.7.2 *Trip* dengan inersia dan tidak ada aliran balik

Ketika tidak ada aliran balik melewati pompa, data kurva pompa untuk debit aliran terhadap *head* dapat digunakan untuk pemodelan pada respon pompa. Data untuk daya pompa juga dibutuhkan sebagai fungsi aliran.

$$\omega_{new} = \omega_{old} - \frac{T_{new} + T_{old}}{2} \times \frac{\Delta t}{I} \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan:

- $T$  = torsi pompa (N.m)
- $I$  = momen inersia pompa dan fluida yang tertahan pada pompa (Kg.m<sup>2</sup>)
- $\omega$  = kecepatan sudut (rad/s).

Nilai torsi yang lama diketahui dari langkah waktu sebelumnya dan kecepatan yang baru dapat dicari dengan iterasi. *Flow rate* dan *head* ditentukan dari persamaan (2.11) dan (2.12) (dengan mengkonversikan nilai tekanan ke *head*) dan data kurva pompa.

### II.8 **Proteksi *Water Hammer* di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya**

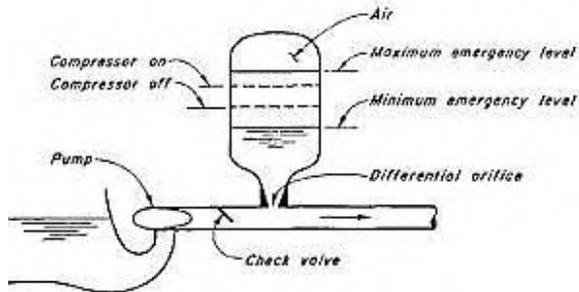
Proteksi atau perlindungan terhadap sistem perpipaan dari *water hammer* merupakan sesuatu yang perlu dilakukan untuk menjaga agar tidak terjadi kerusakan pada komponen penyusunnya. Sistem proteksi yang saat ini digunakan hanya

dengan menggunakan *flywheel* pada instalasi pompa dengan ukuran yang telah ditentukan sesuai desain awal. Pada penelitian ini alternatif sistem proteksi yang digunakan pada pemodelan adalah dengan menambahkan penggunaan *gas accumulator* dan juga memvariasikan ukuran *flywheel* untuk melihat pengaruhnya terhadap perubahan tekanan yang terjadi akibat *water hammer* dan dampaknya terhadap komponen perpipaan.

### II.8.1 Teori *gas accumulator*

*Gas accumulator* adalah alat proteksi yang berfungsi untuk mencegah terjadinya fluktuasi tekanan yang terjadi dalam sistem perpipaan akibat adanya aliran yang berhenti secara mendadak. *Gas accumulator* akan mengurangi tekanan yang terlalu rendah dengan cara menyuplai fluida ke dalam sistem. Alat ini juga memiliki sistem kontrol tersendiri untuk menjaga keseimbangan antara udara dengan air. *Gas accumulator* memiliki pengaturan jumlah air dan udara yang harus ada dalam tangki, ketika kondisi di dalam tangki kekurangan air maka *release valve* akan terbuka sehingga air di dalam tangki akan naik sedangkan apabila kondisi di dalam tangki kelebihan air maka udara yang sebelumnya dikompres oleh *receiver* kemudian diinjeksikan ke dalam tangki sehingga jumlah udara dan air di dalam tangki tetap terjaga.

Komposisi perbandingan volume udara dalam *gas accumulator* dengan kapasitas volume total *gas accumulator* akan sangat mempengaruhi kemampuan *gas accumulator* untuk mengurangi *water hammer*. Semakin besar nilai perbandingan antara volume udara dalam *gas accumulator* dengan kapasitas volume total *gas accumulator* maka semakin banyak udara dalam tangki dan tekanan berlebih dari pipa dapat dibuang ke *gas accumulator* dengan cara menekan udara tersebut sehingga semakin baik dalam meredam *water hammer*. Skema *gas accumulator* ditunjukkan pada gambar di bawah.



Gambar 2.5 Gas accumulator<sup>[6]</sup>

Gas yang berada dalam *gas accumulator* beroperasi berdasarkan persamaan:

$$P.V^n = \text{Konstan} \dots \dots \dots (2.19)$$

Keterangan:

- $P$  = tekanan *gas accumulator* (bar)
- $V$  = volume gas dalam *gas accumulator* ( $m^3$ )
- $n$  = politropik konstan.

Nilai politropik konstan bergantung pada jenis gas dalam *gas accumulator*.

## II.8.2 Teori *flywheel*

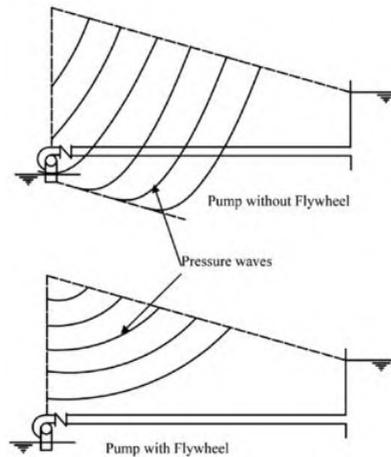
*Flywheel* merupakan alternatif proteksi *water hammer* yang bisa digunakan pada suatu sistem perpipaan. *Flywheel* merupakan alat proteksi yang dapat meningkatkan momen inersia dari pompa kemudian akan melawan lonjakan tekanan dan pemisahan kolom air ketika terjadi kegagalan pompa dalam pengoperasiannya. Metode proteksi ini relatif sederhana dan memiliki efek yang besar terhadap pencegahan *water hammer*, namun dibutuhkan ukuran *flywheel* yang besar untuk aplikasi pada sistem perpipaan yang panjang dan kompleks.

Fenomena *water hammer* yang terjadi akan menimbulkan lonjakan tekanan yang besar dan berpotensi merusak komponen

perpipaan seperti halnya dinding pipa dan juga pompa itu sendiri. Aliran balik yang terjadi akan bergerak kembali menuju sumber atau *reservoir* dan membawa lonjakan tekanan yang besar. Besarnya lonjakan tekanan yang diterima pada daerah *discharge* pompa bergantung pada tingkat perlambatan dari komponen berputarnya. Pompa dengan momen inersia yang kecil maka perlambatan putaran pompanya akan terjadi dengan cepat kemudian berhenti sehingga menghasilkan pemisahan kolom air yang dapat menimbulkan lonjakan tekanan yang tinggi ketika terjadi kegagalan operasi pompa.

*Check valve* juga memiliki peran yang besar untuk menahan aliran balik masuk menuju pompa. Proses penutupan yang kurang sempurna oleh *check valve* memungkinkan aliran balik dari tangki penampungan mampu menerobos *valve* hingga menuju pompa. Oleh karena itu pompa bertugas melawan aliran balik tersebut dengan putaran *impeller* pompa sehingga air yang masuk dari sisi *suction* pompa akan bergerak melawan aliran balik tersebut. Pada kondisi ini *flywheel effect* akan memberikan perlambatan putaran pompa dengan memanfaatkan inersia dari *flywheel* tersebut sehingga *impeller* pompa akan tetap berputar meskipun kondisi pompa sudah mati dan aliran balik akibat *water hammer* akan dilawan secara bertahap sampai akhirnya kondisi fluida kembali stabil dan pompa pun terlindungi dari kerusakan. Dan pada akhirnya putaran *impeller* pompa pun berhenti. Semakin besar ukuran *flywheel* akan semakin baik untuk memperlambat atau menunda fluktuasi tekanan terlebih untuk jaringan perpipaan yang panjang dan kompleks.

Penambahan momen inersia pada gelombang tekanan dengan menggunakan *flywheel* akan memberikan efek seperti pada gambar berikut.



**Gambar 2.6 Efek *Flywheel***<sup>[7]</sup>

Gelombang tekanan yang merambat akan diredam oleh momen inersia dari *flywheel* tersebut dan mencegah terjadinya kenaikan tekanan yang besar dengan cara memperlambat putaran *impeller* pompa sehingga lonjakan tekanan akibat aliran balik dapat dilawan dengan putaran pompa sampai akhirnya tekanan berangsur stabil. Secara keseluruhan fungsi utama *flywheel* adalah untuk menghindari terjadinya putaran balik dari *impeller* pompa akibat terdorong oleh aliran balik yang sangat memungkinkan untuk merusak komponen motor penggerak karena putaran poros dari pompa justru akan menggerakkan motor penggerak sehingga menyerupai turbin. Hal ini tentu akan merusak seluruh komponen penyusun pada hubungan instalasi pompa dengan motor penggerak seperti halnya *bearing* dan juga komponen lainnya pada motor penggerak.

Kemampuan pompa dalam melawan aliran balik pompa bergantung pada tingkat perlambatan dari komponen berputarnya. Pompa dengan dengan momen inersia yang kecil akan memperlambat putaran pompa dengan cepat kemudian berhenti sehingga menghasilkan pemisahan kolom air yang dapat menimbulkan lonjakan tekanan yang tinggi ketika terjadi

kegagalan operasi pompa. Untuk itu perlu dilakukan perhitungan estimasi momen inersia dari komponen berputar pada pompa untuk melihat seberapa besar kemampuannya dalam melawan aliran balik akibat fenomena *water hammer* tersebut.

## II.9 Estimasi Momen Inersia Komponen Berputar Pada Pompa

Perhitungan momen inersia total dari komponen berputar pada instalasi pompa perlu dilakukan untuk melihat seberapa besar pengaruh inersia terhadap perlambatan fluktuasi tekanan yang terjadi di daerah *discharge* pompa. Tentu momen inersia yang besar akan semakin memperlambat putaran *impeller* pompa sehingga pada saat terjadi kegagalan operasi, putaran pompa tidak langsung berhenti dan inersia yang tersimpan pada komponen berputar pompa akan berperan dalam melawan aliran balik yang menuju ke pompa.

### II.9.1 Estimasi momen inersia *impeller* pompa dan motor penggerak

Perhitungan untuk estimasi momen inersia *impeller* pompa beserta air yang tertahan pada *casing* pompa adalah sebagai berikut<sup>[4]</sup>.

$$I_p = 1,5(10^7) \left(\frac{P}{N^3}\right)^{0,9556} \dots\dots\dots(2.20)$$

Sedangkan perhitungan estimasi momen inersia untuk motor penggerak adalah sebagai berikut<sup>[4]</sup>.

$$I_m = 118 \left(\frac{P}{N}\right)^{1,48} \dots\dots\dots(2.21)$$

Keterangan:

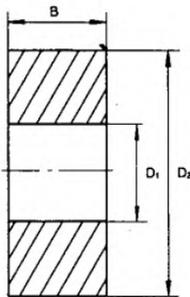
$I_p$  = momen inersia untuk pompa dan air pada *casing* pompa (kg.m<sup>2</sup>)

$I_m$  = momen inersia untuk motor penggerak (kg.m<sup>2</sup>)

- $P$  = daya motor (kW)  
 $N$  = kecepatan putaran (rpm).

### II.9.2 Estimasi momen inersia *flywheel*

Perhitungan estimasi momen inersia untuk komponen *flywheel* dihitung berdasarkan persamaan berikut<sup>[8]</sup>.



**Gambar 2.7 Flywheel<sup>[8]</sup>**

$$I_f = \frac{\pi}{8} (D_2^4 - D_1^4) B \gamma \dots \dots \dots (2.22)$$

Keterangan:

- $I_f$  = total inersia dari efek *flywheel* (kg.m<sup>2</sup>)  
 $D_1$  = diameter dalam *flywheel* (m)  
 $D_2$  = diameter luar *flywheel* (m)  
 $B$  = tebal *flywheel* (m)  
 $\gamma$  = massa jenis material *flywheel* (kg/m<sup>3</sup>).

### II.9.3 Estimasi momen inersia *shaft* / poros pemutar pompa

Perhitungan estimasi momen inersia untuk komponen *shaft unit* / poros pemutar pada instalasi pompa berdasarkan berat benda. Estimasi perhitungan merupakan penjumlahan seluruh momen inersia untuk setiap bagian *shaft* yang merupakan silinder pejal yang bersumbu pada pusat silinder.

$$I = \frac{1}{2}Mr^2 \dots\dots\dots(2.23)$$

Keterangan:

- $I$  = momen inersia (kg.m<sup>2</sup>)  
 $M$  = massa silinder (kg)  
 $r$  = jari-jari silinder (m).

## II.10 Estimasi Tebal Pipa *Discharge* Minimum Sesuai Standar Perhitungan AWWA (*American Water Works Association*) Manual M11

Perhitungan tebal pipa *discharge* dilakukan sesuai standar yang dikeluarkan oleh AWWA (*American Water Works Association*) Manual M11. Perhitungan tebal pipa dimaksudkan untuk melihat berapa tebal pipa yang direkomendasikan untuk menahan beban tekanan maksimum akibat efek *water hammer* dan apakah tebal pipa yang digunakan sesuai data eksisting mampu menahan beban tersebut atau tidak. Dengan data tekanan maksimum diketahui, desain tebal pipa diketahui dengan menggunakan persamaan *Barlow* sebagai berikut<sup>[9]</sup>.

$$t = \frac{PD}{2S} \dots\dots\dots(2.24)$$

Keterangan:

- $t$  = desain tebal pipa untuk *internal design pressure* (mm)  
 $P$  = *internal design pressure* (bar)  
 $D$  = diameter luar pipa, tidak termasuk *coating* (mm)  
 $S$  = *allowable design stress for steel* (bar).

Setelah mendapatkan desain tebal pipa diatas kemudian dihitung tebal pipa minimum untuk pipa dengan mempertimbangkan toleransi mekanikal, korosi dan juga erosi pada pipa dengan persamaan berikut.

$$t_m = \frac{t}{0,875} \dots\dots\dots(2.25)$$

Keterangan:

- $t_m$  = tebal pipa minimum pipa (mm)  
 0.875 = faktor toleransi manufaktur yang diijinkan.

## II.11 Kajian Terdahulu

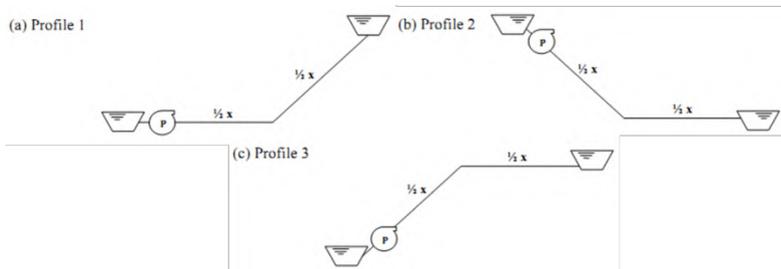
### II.11.1 Simpson, Angus R., dkk. (2008)

Angus R. Simpson (2008)<sup>[10]</sup> melakukan sebuah penelitian mengenai perbandingan penggunaan sistem proteksi *water hammer* untuk jaringan perpipaan yang panjang. Perbandingan yang dilakukan adalah dengan menggunakan dua pilihan alat proteksi *water hammer* yakni *surge tank* dan *flywheel*. Fokus penelitian adalah untuk menganalisa serta mengevaluasi penelitian-penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa penambahan *flywheel* pada instalasi pompa hanya cocok digunakan untuk jaringan pipa yang pendek (kurang dari 2 km).

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan sistem perpipaan untuk distribusi air bersih mulai dari Kimba Tanks sampai Darke Range Tank atau sepanjang 34 km dengan menggunakan *booster pump station* di Caralue, Australia Selatan. Simulasi menggunakan *software* HYTRAN versi 3.4.8-1. Fokus pengujian adalah untuk melihat kemampuan alat proteksi *water hammer* dalam meredam tekanan ketika terjadi kegagalan pompa baik pada salah satu stasiun pompa maupun keduanya. Skenario permodelan adalah sebagai berikut.

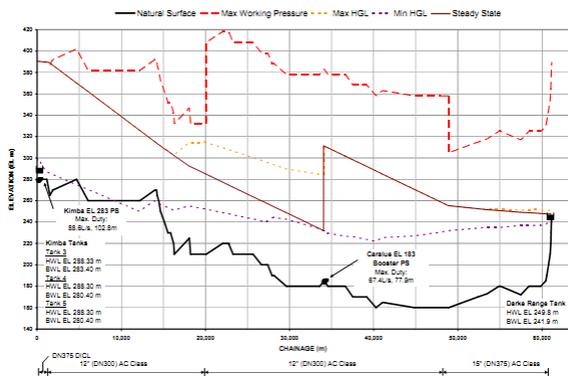
1. Stasiun pompa Kimba (kegagalan pada  $t = 20$  detik).
2. Stasiun pompa Caralue (kegagalan pada  $t = 20$  detik).
3. Stasiun pompa Kimba dan Caralue (kombinasi kegagalan pada  $t = 20$  detik).

Studi parametrik dilakukan pada sistem perpipaan yang sederhana. Penelitian ini didasarkan pada contoh program kegagalan pompa yang didokumentasikan oleh Wylie dan Streeter dengan menggunakan variasi profil perpipaan. Dimana pada penelitian ini menggunakan tiga profil perpipaan yang berbeda namun dengan parameter komponen perpipaan yang sama. Ketiga profil perpipaan tersebut digambarkan sebagai berikut.



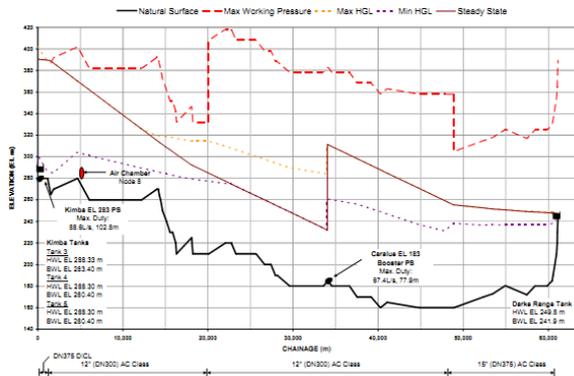
**Gambar 2.8 Profil Pipa Yang Dipertimbangkan Pada Studi Parametrik<sup>[10]</sup>**

Kemudian hasil simulasi yang didapatkan dengan penggunaan ketiga profil perpipaan tersebut adalah:



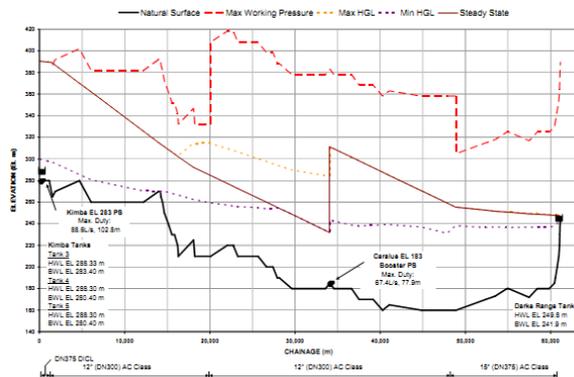
**Gambar 2.9 Kegagalan Pompa Pada Stasiun Pompa Kimba dan Caralue Tanpa Alat Proteksi Water Hammer<sup>[10]</sup>**

Pada simulasi tanpa menggunakan alat proteksi *water hammer* (gambar 2.9) terlihat bahwa akibat kegagalan dua pompa operasi seketika itu pula terjadi pemisahan kolom air pada *downstream* stasiun pompa Kimba sampai dengan Darke Range Tank. Hal tersebut ditunjukkan dengan garis putus-putus berwarna ungu atau garis minimum HGL (*Hydraulic Grade Line*).



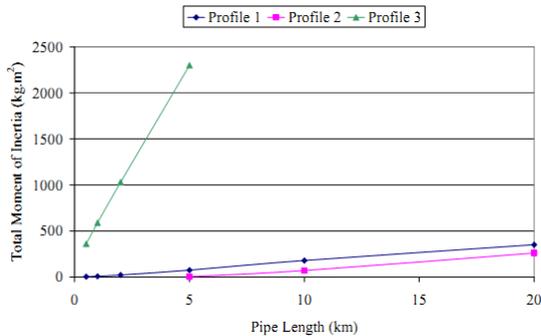
**Gambar 2.10 Kegagalan Pompa Pada Stasiun Pompa Kimba dan Caralue Dengan Alat Proteksi Air Chamber Pada Node 8<sup>[10]</sup>**

Simulasi dengan menempatkan alat proteksi *air chamber* pada titik *downstream* tertinggi stasiun pompa Kimba (gambar 2.10) memperlihatkan bahwa ketika terjadi kegagalan dua pompa operasi, tidak terjadi lonjakan tekanan pada sistem perpipaan. Penggunaan *air chamber* dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang paling layak untuk meredam lonjakan tekanan akibat *water hammer* berdasarkan elevasi yang diperlukan.



**Gambar 2.11 Kegagalan Pompa Pada Stasiun Pompa Kimba dan Caralue Dengan Alat Proteksi Flywheel<sup>[10]</sup>**

Khusus untuk simulasi dengan menggunakan proteksi *flywheel* (gambar 2.11) terlihat bahwa pengaruh penggunaan *flywheel* sebagai sistem proteksi *water hammer* layak diterapkan pada ketiga profil perpipaan sesuai dengan studi parametrik yang telah dijelaskan. Namun dari ketiga hasil tersebut menghasilkan sebuah grafik yang menunjukkan kebutuhan total momen inersia (pompa, motor dan *flywheel*) yang berbeda berdasarkan profil perpipaan yang digunakan. Simulasi yang diterapkan pada penggunaan *flywheel* ini hanya untuk melihat kemampuan penggunaan proteksi *flywheel* dalam meredam lonjakan tekanan yang terjadi sepanjang 20 km pertama dari total panjang jaringan perpipaan yakni 34 km.



**Gambar 2.12 Output Dari Studi Parametrik<sup>[10]</sup>**

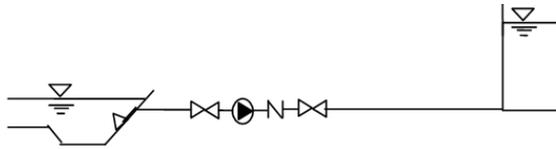
Dari grafik terlihat bahwa sistem perpipaan dengan profil nomor tiga memiliki potensi terbesar untuk terjadinya pemisahan kolom air pada saat kegagalan pompa terjadi. Oleh karena itu membutuhkan total momen inersia yang sangat besar untuk panjang pipa yang diberikan dan ini berpengaruh terhadap ukuran dan juga berat *flywheel* itu sendiri. Maka kesimpulan yang bisa diambil dari studi parametrik ini adalah bahwa untuk panjang pipa lebih dari 2 km, penggunaan *flywheel* bukanlah menjadi pilihan utama untuk profil pipa nomor tiga, namun untuk profil satu dan dua menunjukkan bahwa *flywheel* mampu mencegah pemisahan kolom air dan tekanan negatif yang berlebihan di

dalam pipa. Ini berarti bahwa penelitian terdahulu yang menyatakan penggunaan *flywheel* harus dibatasi untuk panjang pipa kurang dari 2 km tidak berlaku untuk semua sistem perpipaan. Sebuah jaringan studi kasus di Australia Selatan menunjukkan bahwa pemisahan kolom air sepanjang 14 km pertama dari total panjang 34 km dapat dihilangkan dengan menggunakan *flywheel* dan hal ini juga menunjukkan bahwa untuk sistem tertentu yang tidak memiliki bentuk profil perpipaan menyerupai “lutut” seperti halnya profil perpipaan nomor tiga maka *flywheel* bisa dijadikan alternatif proteksi untuk *water hammer*.

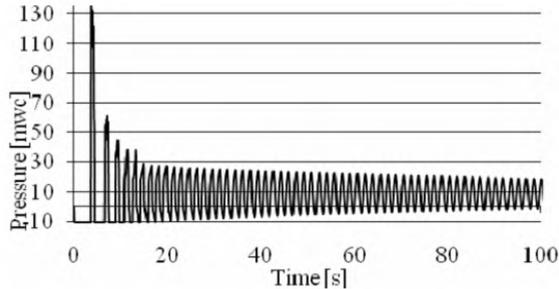
### **II.11.2 Constantin, Anca (2011)**

Karena penelitian terdahulu mengenai evaluasi sistem proteksi dengan menggunakan *flywheel* belum banyak dilakukan, maka dipilih penelitian terdahulu dengan memvariasikan volume *gas accumulator* yang juga menjadi alternatif proteksi dalam meredam fluktuasi tekanan akibat *water hammer*.

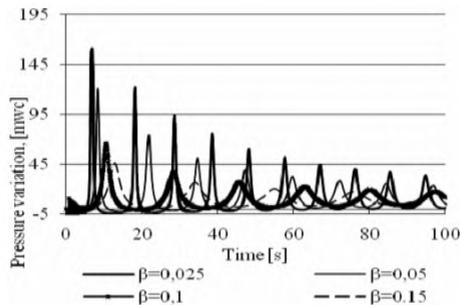
Untuk mengetahui fenomena *water hammer* yang terjadi dalam sistem perpipaan maka telah dilakukan penelitian-penelitian mengenai fenomena *water hammer*. Constantin<sup>[4]</sup> mempelajari *water hammer* difokuskan pada sistem perpipaan yang menggunakan *gas accumulator*. Pada penelitian ini menggunakan parameter pada *gas accumulator* untuk mengurangi *water hammer* yaitu parameter rasio volume udara dengan volume *gas accumulator* ( $\beta$ ). Simulasi pada penelitian ini menggunakan *gas accumulator* dengan rasio  $\beta$  divariasikan dari 0.75 sampai 0.025. Dari simulasi sistem perpipaan pada gambar 2.13 dengan tidak menggunakan *water hammer* (gambar 2.14) terlihat jelas fluktuasi tekanan yang terjadi beresilasi cukup tinggi dan rapat. Fluktuasi tersebut dapat merusak sistem perpipaan karena beban dinamis dan juga mengakibatkan vibrasi pada sistem perpipaan.



**Gambar 2.13 Skema Instalasi Perpipaan<sup>[11]</sup>**



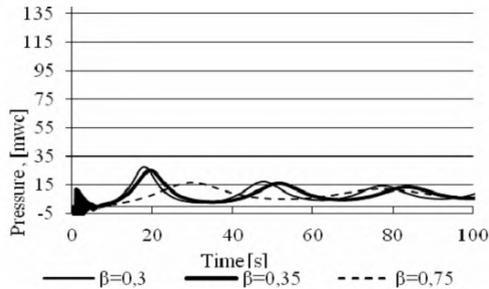
**Gambar 2.14 Variasi Tekanan Pada Sistem Perpipaan Yang Tidak Menggunakan *Gas accumulator*<sup>[11]</sup>**



**Gambar 2.15 Variasi Tekanan Pada Sistem Perpipaan Yang Menggunakan *Gas accumulator* Dengan Volume Udara Kecil<sup>[11]</sup>**

Pada simulasi menggunakan rasio  $\beta$  antara 0.025 sampai dengan 0.1 (gambar 2.15) dapat disimpulkan bahwa rasio volume udara dengan volume *gas accumulator* terkecil yaitu dengan  $\beta$  sebesar 0.025 memiliki kemampuan mengurangi *water hammer* paling buruk, terlihat jelas kurva dengan  $\beta = 0.025$  mengalami

fluktuasi paling tinggi dan rapat. Rasio  $\beta = 0.15$  memiliki kemampuan meredam *water hammer* terbaik jika dibandingkan dengan  $\beta$  yang bernilai 0.025 , 0.05 dan 0.1.



**Gambar 2.16 Variasi Tekanan Pada Sistem Perpipaan Yang Menggunakan Gas accumulator Dengan Volume Udara Besar<sup>[11]</sup>**

Simulasi sistem perpipaan menggunakan proteksi *water hammer* berupa *gas accumulator* dengan rasio volume udara dengan volume *gas accumulator* antara 0.3 sampai dengan 0.75 terlihat bahwa rasio  $\beta$  paling besar yaitu 0.75 memiliki kemampuan meredam *water hammer* paling baik (gambar 2.16). Rasio  $\beta$  antara 0.3 sampai dengan 0.75 memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mengurangi *water hammer*. Terlihat pada gambar 2.15 fluktuasi tekanan cukup kecil dan renggang.

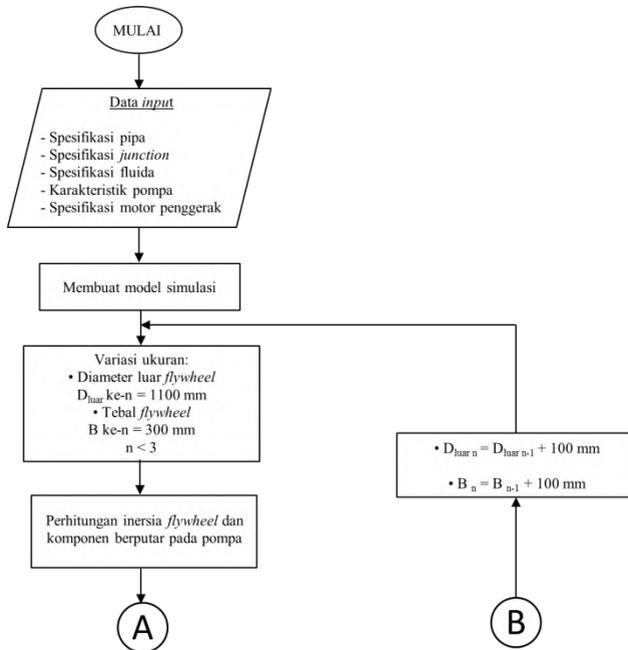
[halaman ini sengaja dikosongkan]

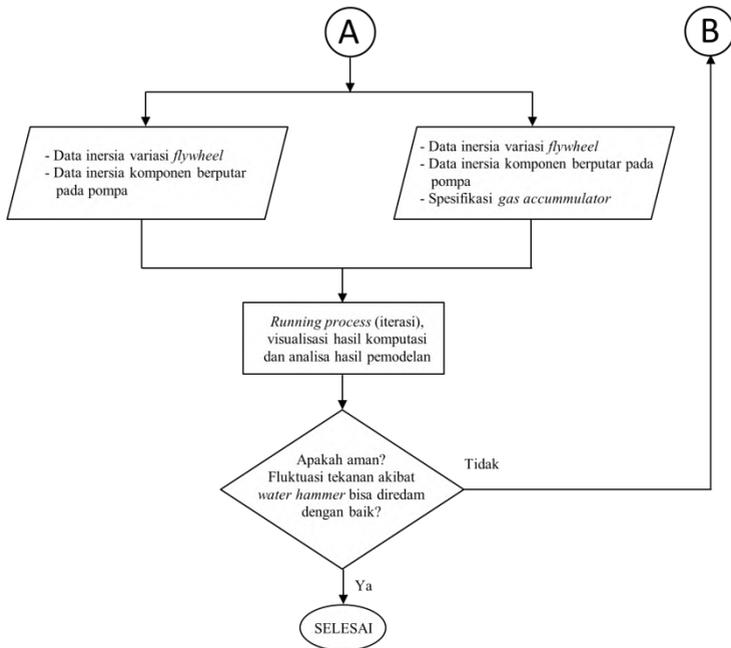
## BAB III METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode komputasi, yaitu dengan menggunakan *software* AFT Impulse 4.0 untuk mensimulasikan pemodelan yang telah dibuat. Pemilihan metode komputasi dikarenakan memiliki beberapa keuntungan dibandingkan metode eksperimen yakni lebih praktis, biaya relatif murah, serta hasil yang diperoleh lebih cepat dengan data lebih banyak. Namun metode komputasi ini juga memiliki kelemahan yaitu memerlukan validasi atau komparasi dengan hasil eksperimen agar didapatkan hasil yang valid.

### III.1 Skema Diagram Alir

Prosedur pemodelan yang dilakukan berdasarkan diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada gambar 3.1 seperti dibawah ini:

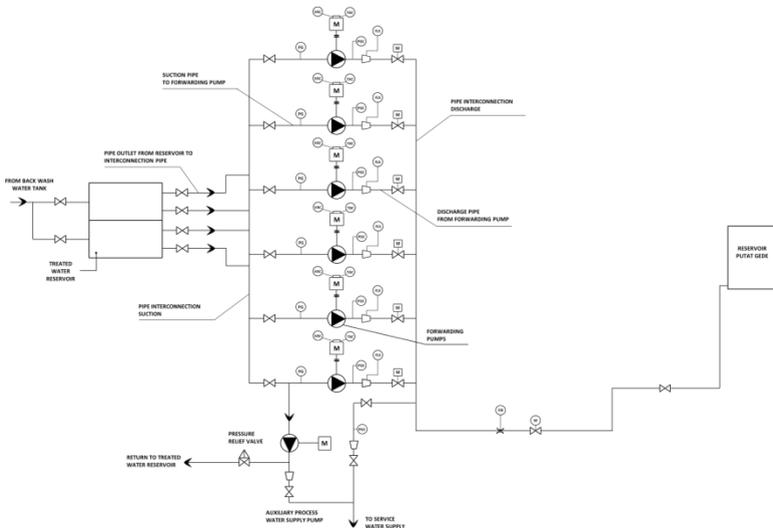




**Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian**

### III.2 Proses Pemodelan Sistem Perpipaan

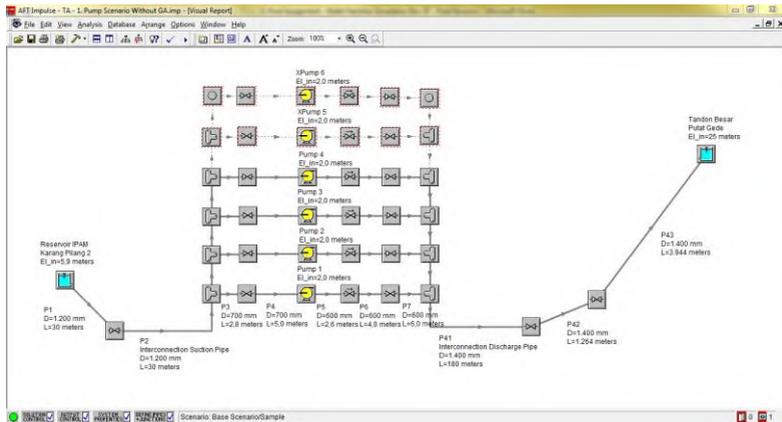
Data awal pemodelan adalah skema gambar pompa paralel beserta karakteristik perpipaan yang akan dimodelkan pada penelitian ini seperti halnya skema instalasi perpipaan, karakteristik fluida, spesifikasi pipa dan sambungan pipa, spesifikasi pompa, spesifikasi alat proteksi *water hammer* dan juga skema operasi yang diterapkan. Data awal yang didapatkan dari data teknis rumah pompa IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya adalah sebagai berikut.



**Gambar 3.2 Skema Instalasi Perpipaan Di Rumah Pompa Unit IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya**

Dari skema di atas kemudian dilakukan pemodelan komputasi berdasarkan pemodelan numerik, susunan instalasi perpipaan yang dimodelkan dibuat hingga menyerupai dengan susunan instalasi perpipaan di unit IPAM Karang Pilang 2 untuk mendapatkan hasil simulasi yang maksimal. Akan tetapi dengan pertimbangan parameter yang ada dan juga keterbatasan *software*

maka instalasi pompa paralel dimodelkan dengan penyederhanaan seperti gambar di bawah ini.



**Gambar 3.3 Model Sistem Perpipaan Di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya Dengan *Software* AFT Impulse 4.0**

Gambar 3.3 merupakan pemodelan untuk sistem perpipaan yang diterapkan di rumah pompa unit IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya. Dimana terdapat total 6 buah pompa operasi yang terpasang secara paralel dengan masing-masing 4 pompa operasi dan 2 pompa *standby*. Pemodelan dilakukan untuk menunjukkan sistem perpipaan mulai dari *reservoir* air bersih di rumah pompa Karang Pilang yang kemudian didistribusikan menuju tandon air besar yang berada di Putat Gede, Surabaya. Berikut adalah keterangan *layout* pada simulasi.

### 1. Fluida dalam pipa:

- Fluida : Air pada tekanan 1 atm
- Suhu : 30<sup>0</sup> C
- Karakteristik Air :

**Tabel 3.1 Karakteristik Untuk Fluida Air Pada Suhu 30<sup>0</sup>C**

Densitas	0,9957721 gram/cm <sup>3</sup>
Viskositas Dinamik	7,918974 x 10 <sup>-6</sup> kg/sec-m
Bulk Modulus	215011,6 mH <sub>2</sub> O std.
Tekanan Uap	4,275716 x 10 <sup>-3</sup> MPa -9,89613 mH <sub>2</sub> O std ( <i>gauge</i> )

**2. Spesifikasi Pipa:**

Spesifikasi pipa yang digunakan pada pemodelan sistem perpipaan IPAM Karang Pilang 2 ini terlampir secara detail pada lampiran A.

**3. Spesifikasi *Reservoir & Junction*:**

Data jenis sambungan dan komponen penyusun perpipaan serta elevasinya terlampir pada lampiran B.

**4. Spesifikasi Pompa Produksi:**

Pompa yang digunakan adalah 6 buah pompa sentrifugal dengan *head total* & kapasitas yang sama besar untuk memasok laju aliran 500 liter/detik. Pompa operasi berjumlah 4 unit dan pompa *standby* berjumlah 2 unit. Dan merupakan jenis pompa *Positive Suction (PS)* atau posisi pompa berada di bawah posisi *reservoir*.

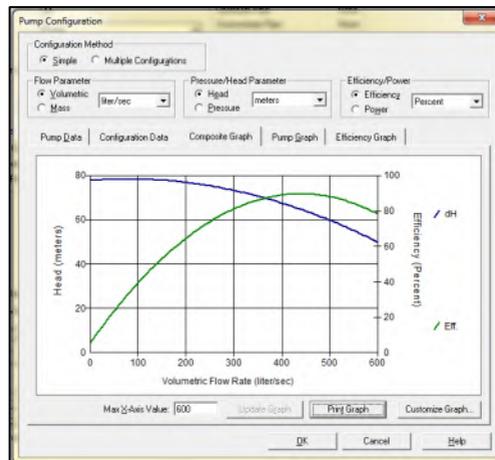
- Pompa 1 : memasok permintaan *flow rate* sebesar 500 liter/detik.
- Pompa 2 : memasok permintaan *flow rate* sebesar 500 liter/detik.
- Pompa 3 : memasok permintaan *flow rate* sebesar 500 liter/detik.
- Pompa 4 : memasok permintaan *flow rate* sebesar 500 liter/detik.
- Pompa 5 : pompa *standby*.
- Pompa 6 : pompa *standby*.

Dari karakteristik masing-masing pompa operasi maka dapat disimpulkan bahwa pompa operasi akan memenuhi permintaan debit total sebesar 2000 liter/detik sesuai dengan data teknis perusahaan.

➤ Karakteristik pompa :

**Tabel 3.2 Spesifikasi Pompa Produksi di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya<sup>[12]</sup>**

Merk	Torishima
Tipe	CDMV 500x400
Nomor seri	P. 928020
Jenis	Sentrifugal
Kapasitas	500 liter /detik 0,5 m <sup>3</sup> /menit
<i>Head</i> (MKA)	60 m



**Gambar 3.4 Kurva Performa Pompa Sentrifugal Torishima CDMV 500x400**

## 5. Spesifikasi Motor Penggerak Pompa Produksi:

Motor yang digunakan sebagai penggerak pompa produksi adalah elektro motor yang terhubung secara vertikal dengan masing-masing pompa.

- Karakteristik motor penggerak pompa:

**Tabel 3.3 Spesifikasi Elektro Motor Penggerak Pompa di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya<sup>[12]</sup>**

Merk	Hyundai
Tipe	HL B5 452-66 V
Nomor seri	97 MSTV 1849
Daya	400 kW
Voltase	6000 Volt
Ampere	51,3 A
Putaran	994 rpm

## 6. Spesifikasi Alat Proteksi *Water Hammer*:

### 1. Spesifikasi *gas accumulator*.

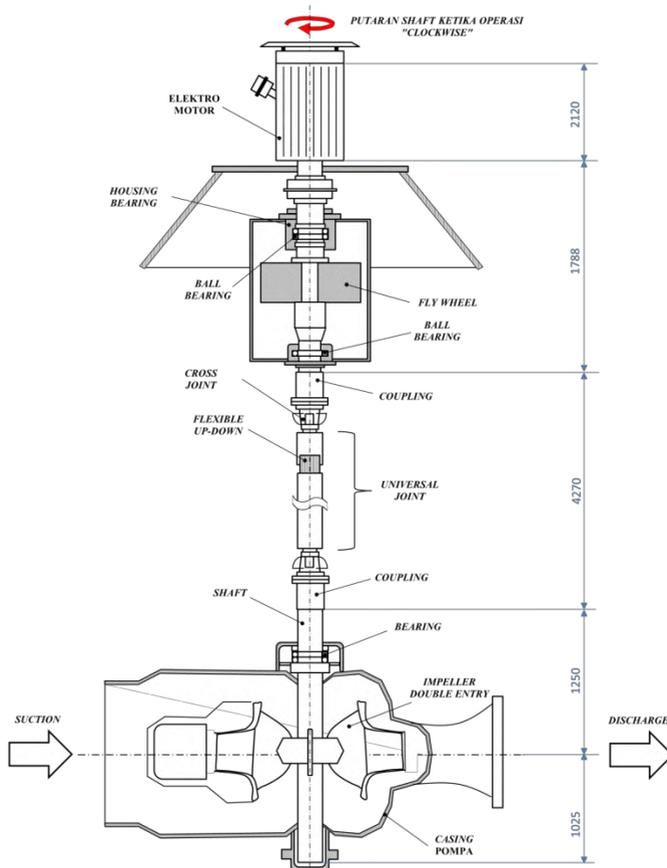
Dalam pemodelan ini dilakukan variasi pemodelan sistem perpipaan yakni sistem perpipaan tanpa menggunakan *gas accumulator* dan sistem perpipaan dengan menggunakan *gas accumulator*. Data spesifikasi yang digunakan mengacu pada spesifikasi *gas accumulator* yang digunakan di rumah pompa Karang Pilang 3 yang mana memiliki kapasitas produksi yang sama dengan rumah pompa Karang Pilang 2 yakni 2000 liter/detik. Data ini yang menjadi referensi dalam menentukan spesifikasi *gas accumulator* yang digunakan pada skema perpipaan untuk pemodelan ini.

**Tabel 3.4 Spesifikasi *Gas Accumulator* Pada Pemodelan Sistem Perpipaan**

<i>Gas accumulator</i>	
Tekanan kerja	5,6 bar
Volume udara	53 m <sup>3</sup>

2. Spesifikasi *flywheel*.

Alat proteksi *water hammer* yang diterapkan di rumah pompa IPAM Karang Pilang 2 ini adalah dengan menempatkan *flywheel* pada *shaft* penghubung antara elektro motor dengan pompa sentrifugal pada masing-masing instalasi pompa. Skema *flywheel* yang digunakan di rumah pompa unit IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.5 Skema *Flywheel*<sup>[12]</sup>

*Flywheel* yang terpasang pada instalasi *shaft* penghubung antara elektro motor dengan *impeller* pompa dapat bervariasi. Ukuran *flywheel* akan menentukan berat *flywheel* itu sendiri dan berpengaruh terhadap inersia yang diberikan dalam usahanya memperlambat putaran *shaft* ketika pompa gagal beroperasi. Untuk jaringan perpipaan yang panjang, ukuran *flywheel* yang besar akan sangat baik dalam melawan

fluktuasi tekanan. Berikut adalah data dimensi *flywheel* yang divariasikan dalam penelitian ini.

**Tabel 3.5 Variasi Ukuran *Flywheel* Pada Simulasi Sistem Perpipaan**

	<i>Flywheel 1</i> (data eksisting)	<i>Flywheel 2</i>	<i>Flywheel 3</i>
Material	<i>Steel</i>	<i>Steel</i>	<i>Steel</i>
Diameter dalam	150 mm	150 mm	150 mm
Diameter luar	1100 mm	1300 mm	1500 mm
Tebal	300 mm	400 mm	500 mm

Dengan variasi ukuran *flywheel* yang berbeda akan menghasilkan nilai momen inersia yang berbeda pula. Momen inersia untuk masing-masing variasi ukuran *flywheel* adalah sebagai berikut. (Detail perhitungan inersia untuk masing-masing variasi *flywheel* terlampir pada lampiran C)

**Tabel 3.6 Data Momen Inersia Untuk Masing-masing Variasi *Flywheel***

<b>Momen Inersia</b>		
<i>Flywheel 1</i>	<i>Flywheel 2</i>	<i>Flywheel 3</i>
1353,54 kg.m <sup>2</sup>	2556,28 kg.m <sup>2</sup>	4401,45 kg.m <sup>2</sup>

Pada penelitian ini, total momen inersia yang digunakan untuk melawan aliran balik akibat fenomena *water hammer* merupakan penjumlahan momen inersia dari masing-masing komponen berputar pada instalasi pompa. Momen inersia yang dipertimbangkan adalah momen inersia dari motor penggerak, momen inersia *impeller* pompa dan air yang tertahan pada *casing* pompa, momen inersia dari rangkaian poros pemutar pompa yang meliputi *shaft* dan *universal joint* dan terakhir adalah momen inersia dari alat proteksi *water*

*hammer* yakni *flywheel*. (Detail perhitungan inersia *impeller* dan air pada *casing* pompa terlampir pada lampiran D)

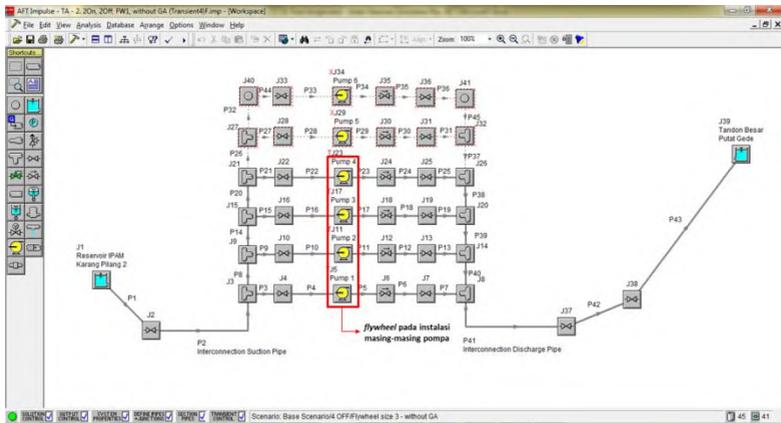
**Tabel 3.7 Data Momen Inersia Total Untuk Masing-masing Variasi *Flywheel***

Komponen Bagian	No	Inersia Komponen	Variasi 1 (kg.m <sup>2</sup> )	Variasi 2 (kg.m <sup>2</sup> )	Variasi 3 (kg.m <sup>2</sup> )
Alat proteksi <i>water hammer</i>	1	<i>Flywheel</i>	1353,54	2556,28	4401,45
Pompa	2	<i>Impeller</i> pompa dan air pada <i>casing</i> pompa	11,74	11,74	11,74
	3	Motor penggerak	30,68	30,68	30,68
Rangkaian <i>shaft</i> pemutar pompa	4	<i>Shaft</i> bagian atas	6,593	6,593	6,593
	5	<i>Universal joint</i>	0,42	0,42	0,42
	6	<i>Shaft</i> bagian bawah	6,731	6,731	6,731
<b>Momen Inersia Total (kg.m<sup>2</sup>)</b>			<b>1409,704</b>	<b>2612,444</b>	<b>4457,614</b>

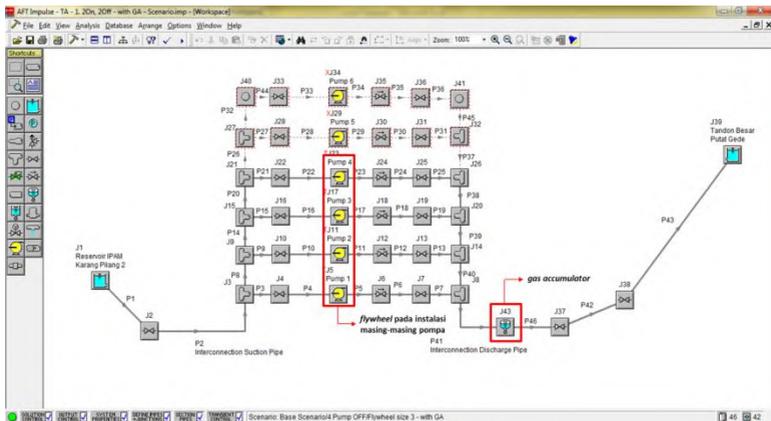
Variasi nilai momen inersia total dari tabel di atas kemudian dijadikan sebagai *input* data pada simulasi pemodelan dengan menggunakan *software* AFT Impulse 4.0.

### III.3 Skema Pemodelan Sistem Perpipaan Pada Simulasi

Untuk melihat pengaruh serta karakteristik dari masing-masing alat proteksi *water hammer* yang digunakan, maka pada simulasi ini dilakukan dua skema pemodelan sistem perpipaan sebagai berikut.



**Gambar 3.6** Layout Pemodelan Instalasi Perpipaan Dengan Variasi *Flywheel*



**Gambar 3.7** Layout Pemodelan Instalasi Perpipaan Dengan Variasi *Flywheel* Dan Penambahan *Gas Accumulator*

### III.4 Skenario Operasi Pompa

Skema operasi yang diterapkan di rumah pompa *forwarding* besar unit IPAM Karang Pilang 2 ini hanya untuk mengalirkan fluida dengan debit 500 liter/detik untuk masing-masing pompa operasinya sehingga total debit yang dialirkan menuju tandon besar Putat Gede adalah 2000 liter /detik. Namun pada jam-jam tertentu permintaan debit mengalami peningkatan seiring dengan pemakaian pelanggan dan berikut adalah data fluktuasi debit yang terjadi di rumah pompa unit IPAM Karang Pilang 2.

**Tabel 3.8 Data Fluktuasi Debit di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya**

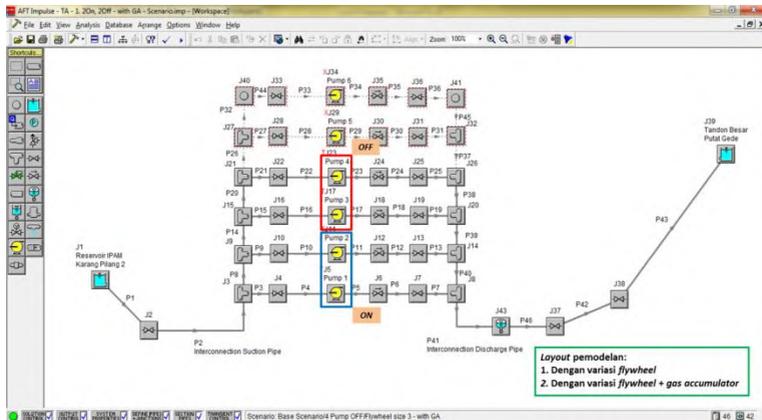
Waktu	Fluktuasi debit
Jam normal	500 liter /detik
Jam puncak (pkl 05.00 – 07.00 dan pkl 17.00 – 19.00)	520 liter /detik

Dari data operasional di lapangan seperti ditampilkan pada Tabel 3.8 terlihat bahwa tidak terjadi permintaan fluktuasi debit yang signifikan pada masing-masing pompa operasi sehingga tidak sampai mengaktifkan pompa produksi yang lainnya. Karena pada kondisi ini analisa untuk hubungan penyalan pompa tidak bisa dilakukan maka pada penelitian ini akan dilakukan evaluasi sistem proteksi *water hammer* hanya pada saat kondisi ekstrim, misalnya pompa produksi mati akibat padamnya aliran listrik ataupun karena kegagalan pengoperasian dari pompa itu sendiri.

Skenario operasi dari pompa produksi dilakukan untuk melihat respon yang terjadi dari adanya kegagalan operasi pompa. Karena aktual di lapangan pompa produksi tidak pernah mengalami kegagalan operasi akibat padamnya aliran listrik atau gangguan semacamnya maka dalam penelitian ini keempat pompa produksi yang beroperasi akan dikondisikan pada dua skenario kegagalan pompa. Dan pada masing-masing skenario juga

dilakukan pemodelan dengan variasi sistem proteksi *water hammer* yang digunakan.

### III.4.1 Skenario 2 pompa *ON* dan 2 pompa *OFF* (trip dengan inersia tanpa aliran balik)



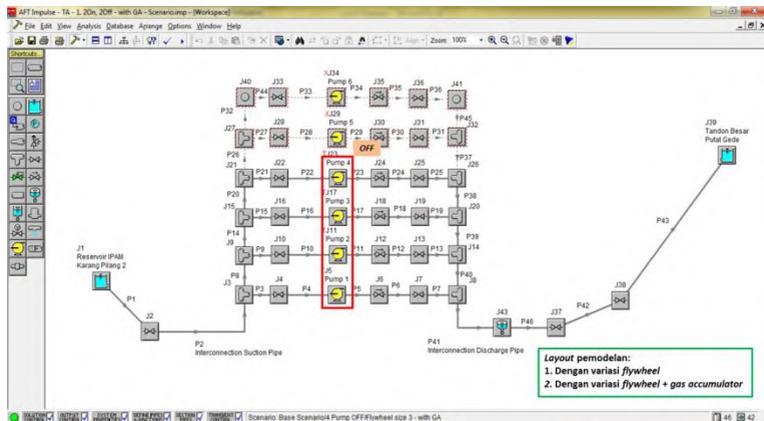
**Gambar 3.8 Skenario Simulasi Dengan Kondisi 2 Pompa *ON* dan 2 Pompa *OFF***

Skenario ini menjelaskan bahwa saat analisa transient pada simulasi, pompa operasi 3 dan 4 (garis merah) mengalami kegagalan operasi sehingga hanya pompa operasi 1 dan 2 (garis biru) yang tetap beroperasi. Pompa 3 dan 4 dianalisa pada kondisi transient yakni trip dengan inersia tanpa ada aliran balik. Pada skenario ini dilakukan analisa pemodelan dengan total variasi sistem proteksi *water hammer* sebagai berikut.

1. 2 pompa *ON* dan 2 pompa *OFF* – variasi *flywheel* 1.
2. 2 pompa *ON* dan 2 pompa *OFF* – variasi *flywheel* 2.
3. 2 pompa *ON* dan 2 pompa *OFF* – variasi *flywheel* 3.
4. 2 pompa *ON* dan 2 pompa *OFF* – variasi *flywheel* 1 – dengan *gas accumulator*.
5. 2 pompa *ON* dan 2 pompa *OFF* – variasi *flywheel* 2 – dengan *gas accumulator*.

6. 2 pompa *ON* dan 2 pompa *OFF* – variasi *flywheel* 3 – dengan *gas accumulator*.

### III.4.2 Skenario 4 pompa *OFF* (*trip* dengan inersia tanpa aliran balik)



**Gambar 3.9 Skenario Simulasi Dengan Kondisi 4 Pompa *OFF***

Skenario ini menjelaskan bahwa saat analisa *transient* pada simulasi, terjadi kondisi yang sangat ekstrim yakni pompa operasi 1, 2, 3, dan 4 (garis merah) mengalami kegagalan operasi sehingga sistem perpipaan mengalami kegagalan secara keseluruhan. Pompa 1, 2, 3, dan 4 dianalisa pada kondisi *transient* yakni *trip* dengan inersia tanpa ada aliran balik. Pada skenario ini dilakukan analisa pemodelan dengan total variasi sistem proteksi *water hammer* sebagai berikut.

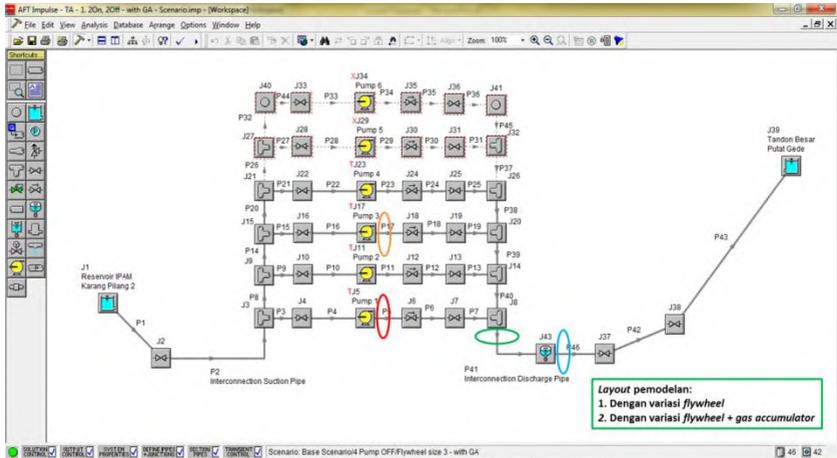
1. 4 Pompa *OFF* – variasi *flywheel* 1.
2. 4 Pompa *OFF* – variasi *flywheel* 2.
3. 4 Pompa *OFF* – variasi *flywheel* 3.
4. 4 Pompa *OFF* – variasi *flywheel* 1 – dengan *gas accumulator*.

5. 4 Pompa *OFF* – variasi *flywheel* 2 – dengan *gas accumulator*.
6. 4 Pompa *OFF* – variasi *flywheel* 3 – dengan *gas accumulator*.

### III.5 Titik-titik Analisa Pemodelan Sistem Perpipaan Pada Simulasi

Selanjutnya adalah dengan menentukan titik-titik yang dianalisa pada simulasi untuk pemodelan sistem perpipaan. 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.

- Skenario 2 pompa *ON* & 2 pompa *OFF*



**Gambar 3.10 Titik-titik Analisa Pada Simulasi Dengan Skenario 2 Pompa *ON* & 2 Pompa *OFF***

Detail titik-titik analisa tersebut dijelaskan pada tabel di bawah ini.

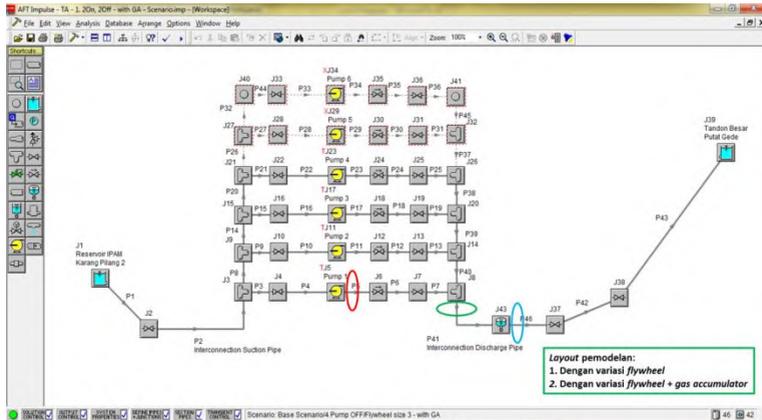
**Tabel 3.9 Detail Titik Analisa Pada Simulasi Dengan Skenario 2 Pompa ON & 2 Pompa OFF**

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

Titik analisa pada pipa P5 *inlet* dilakukan untuk melihat respon di daerah *discharge* pompa 1 pada saat pompa tetap beroperasi ketika terjadi kegagalan pompa. Selain itu, pipa P5 merupakan pipa terdekat dengan pipa keluaran utama (pipa P41) dan ini akan menyebabkan pipa P5 rentan mengalami hantaman lonjakan tekanan pada saat terjadi fenomena *water hammer*. Oleh karena itu daerah ini sangat penting dianalisa mengingat kemungkinan terjadi lonjakan tekanan akan sangat tinggi. Sedangkan titik analisa pada pipa P17 dilakukan untuk melihat respon di daerah *discharge* pompa 3 pada saat pompa mati akibat adanya kegagalan pompa.

Analisa pada pipa P41 dilakukan untuk melihat perbandingan tekanan yang diterima pada saat terjadi fenomena *water hammer* dengan tekanan yang diterima oleh pipa-pipa di dekat *discharge* pompa. Dan pipa P46 dianalisa untuk melihat kondisi fluktuasi tekanan pada saat *water hammer* terjadi, mengingat pipa ini adalah pipa terdekat dengan *gas accumulator* yang bertugas meredam lonjakan tekanan sehingga pada akhirnya dapat dilakukan komparasi dengan kondisi fluktuasi tekanan di pipa-pipa dekat *discharge* pompa.

- Skenario 4 pompa *OFF*



**Gambar 3.11 Titik-titik Analisa Pada Simulasi Dengan Skenario 2 Pompa *ON* & 2 Pompa *OFF***

Detail titik-titik analisa tersebut dijelaskan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 3.10 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	<i>Discharge</i> pompa 1	600	9,52	23
2		P41	Pipa <i>discharge</i> utama	1400	19,05	23
3		P46	Sebelum <i>gas accumulator</i>	1400	19,05	23

Titik analisa pada pipa P5 *inlet* dilakukan untuk melihat respon di daerah *discharge* pompa 1 pada saat pompa mati akibat adanya kegagalan pompa. Selain itu, pipa P5 merupakan pipa terdekat dengan pipa keluaran utama (pipa P41) dan ini akan menyebabkan pipa P5 rentan mengalami hantaman lonjakan tekanan pada saat terjadi fenomena *water hammer*. Oleh karena itu daerah ini sangat penting dianalisa mengingat kemungkinan terjadi lonjakan tekanan akan sangat tinggi.

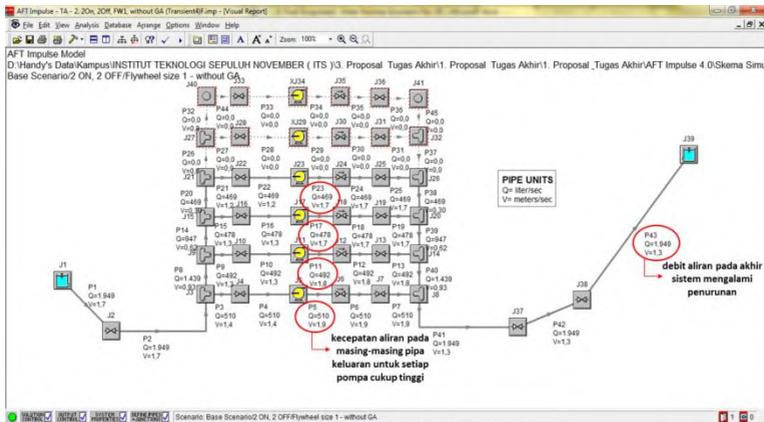
Analisa pada pipa P41 dilakukan untuk melihat perbandingan tekanan yang diterima pada saat terjadi fenomena *water hammer* dengan tekanan yang diterima oleh pipa-pipa di dekat *discharge* pompa. Dan pipa P46 dianalisa untuk melihat kondisi fluktuasi tekanan pada saat *water hammer* terjadi, mengingat pipa ini adalah pipa terdekat dengan *gas accumulator* yang bertugas meredam lonjakan tekanan sehingga pada akhirnya dapat dilakukan komparasi dengan kondisi fluktuasi tekanan di pipa-pipa dekat *discharge* pompa.

[halaman ini sengaja dikosongkan]

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### IV.1 Analisa Steady

Sebagai langkah awal dalam mengevaluasi sistem proteksi *water hammer* yang digunakan pada pemodelan ini, dilakukan simulasi pemodelan dengan analisa kondisi *steady*. Hal ini dilakukan untuk melihat kinerja utama sistem perpipaan yang dimodelkan yakni mampu mendistribusikan air bersih dari *reservoir* di IPAM Karang Pilang 2 sampai ke tandon besar di Putat Gede, Surabaya dengan kapasitas total 2000 liter /detik.



**Gambar 4.1 Hasil Simulasi Untuk Analisa Steady Pada Pemodelan Sistem Perpipaan di IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya**

Dari hasil simulasi secara *steady* terlihat bahwa debit aliran yang sampai di tandon besar Putat Gede, Surabaya mengalami penurunan menjadi 1949 liter/detik. Penyebab turunnya nilai debit air disebabkan oleh beberapa hal seperti pemasangan pompa dengan sistem paralel dan hambatan-hambatan pada pipa, terlebih diameter pipa pada sistem beragam. Kecepatan aliran pada masing-masing pipa keluaran dari setiap

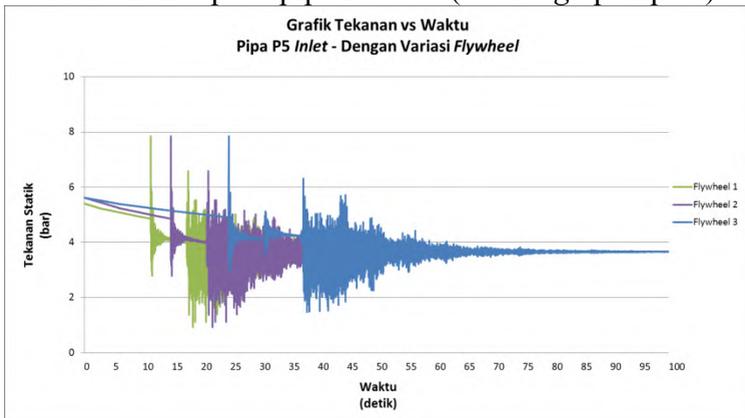
pompa juga sangat berpengaruh, karena bertemu di satu pipa utama untuk mendistribusikan air bersih ke tandon maka kecepatan aliran yang tinggi akan semakin memperbesar hambatan dan menyebabkan nilai debit turun.

## IV.2 Hasil Simulasi

Data hasil simulasi kemudian didapatkan melalui tahap *running process* dari setiap variasi pemodelan yang telah dilakukan sesuai dengan ketentuan yang telah dijelaskan sebelumnya dan dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* AFT Impulse 4.0. Data yang digunakan dari hasil simulasi meliputi data tekanan terhadap waktu untuk setiap skenario pompa serta penggunaan *gas accumulator* dan juga variasi ukuran *flywheel*. Hasil simulasi terbagi sesuai dengan skenario operasi pompa yang disimulasikan.

### IV.2.1 Skenario 2 pompa *on* dan 2 pompa *off* – dengan variasi *flywheel*

- Titik analisa pada pipa P5 *inlet* (*discharge* pompa 1)

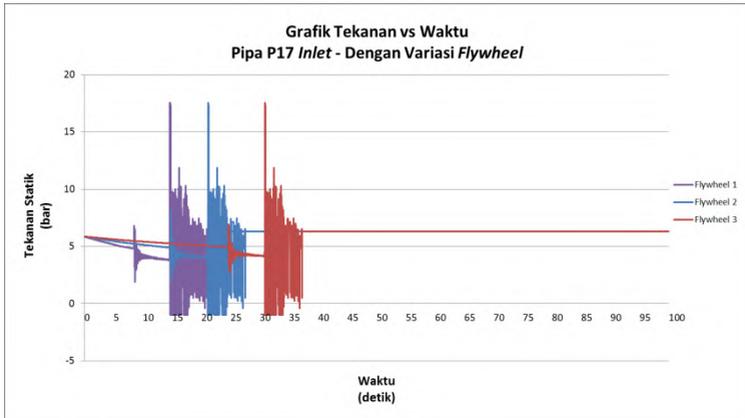


**Gambar 4.2 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 *Inlet* (*Discharge* Pompa 1) Dengan Variasi Ukuran *Flywheel* Pada Skenario 2 Pompa *OFF***

Pipa P5 *inlet* merupakan *discharge pipe* untuk pompa 1 yang tetap pada kondisi *ON* pada saat terjadi kegagalan pompa operasi, oleh karena itu grafik di atas ditampilkan untuk melihat respon tekanan di daerah *discharge* pompa yang tetap pada kondisi *ON* ketika terjadi efek *water hammer*. Dari hasil grafik terlihat bahwa untuk pemodelan 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. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 10 dan cenderung stabil setelah detik ke 63. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 15 dan cenderung stabil setelah detik ke 70. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 25 dan cenderung stabil setelah detik ke 75.

Hal ini menunjukkan pengaruh penggunaan sistem proteksi *water hammer* terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi akibat efek *water hammer*. Terlihat bahwa variasi momen inersia yang tersimpan pada *flywheel* memberikan respon berupa perlambatan atau penundaan terjadinya fluktuasi tekanan. Semakin besar momen inersia yang tersimpan maka akan semakin memperlambat terjadinya fluktuasi tekanan. Dan terlihat pula bahwa osilasi tekanan yang tinggi dengan waktu yang cenderung lama merupakan akibat dari tidak adanya proteksi yang meredam fluktuasi tekanan tersebut. Sehingga dengan tidak digunakannya *gas accumulator* pada pemodelan ini maka fluktuasi tekanan yang terjadi akan berosilasi dengan waktu yang cenderung lama hingga akhirnya kembali ke kondisi tekanan yang stabil.

- Titik analisa pada pipa P17 *inlet* (*discharge* pompa 3)

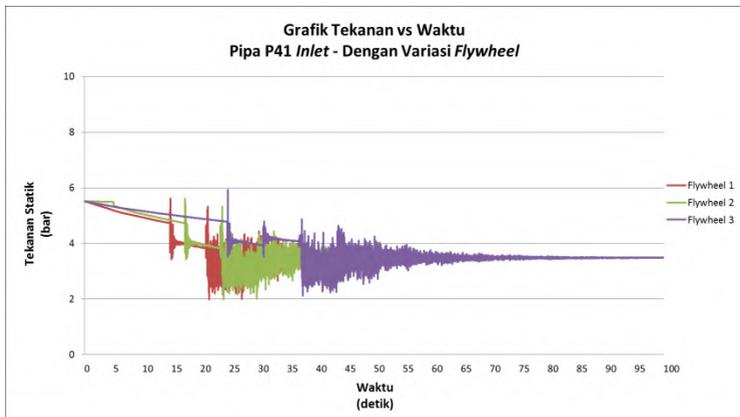


**Gambar 4.3 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P17 Inlet (Discharge Pompa 3) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Pada Skenario 2 Pompa OFF**

Pipa P17 *inlet* merupakan *discharge pipe* untuk pompa 3 pada kondisi *OFF* ketika terjadi kegagalan pompa operasi, oleh karena itu grafik di atas ditampilkan untuk melihat respon tekanan di daerah *discharge* pompa 3 yang berada pada kondisi *OFF* ketika terjadi efek *water hammer*. Grafik di atas menunjukkan bahwa untuk pemodelan tanpa menggunakan *gas accumulator* tetap menunjukkan fluktuasi tekanan dan osilasi yang tinggi, dimana tekanan maksimumnya mencapai 18,045 bar dan tekanan minimumnya mencapai -0,990 bar. Dan terdapat perbedaan waktu terjadinya lonjakan tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 8 dan cenderung stabil setelah detik ke 23. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 13 dan cenderung stabil setelah detik ke 27. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 23 dan cenderung stabil setelah detik ke 36.

Sama halnya dengan analisa sebelumnya bahwa variasi momen inersia yang tersimpan pada *flywheel* akan memberikan respon berupa perlambatan atau penundaan terjadinya fluktuasi tekanan. Semakin besar momen inersia yang tersimpan maka akan semakin memperlambat terjadinya fluktuasi tekanan. Dan terlihat pula bahwa osilasi tekanan yang tinggi dengan waktu yang cenderung lama merupakan akibat dari tidak adanya proteksi yang meredam fluktuasi tekanan tersebut.

- Titik analisa pada pipa P41 *inlet* (pipa *discharge* utama)



**Gambar 4.4 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P41 Inlet (Pipa Discharge Utama) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Pada Skenario 2 Pompa OFF**

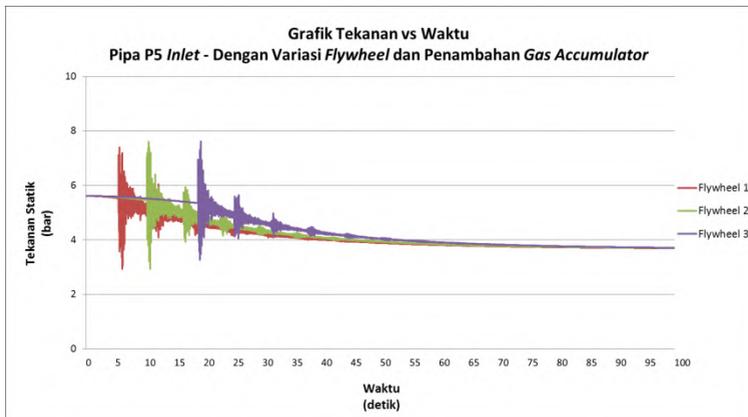
Pipa P41 *inlet* merupakan pipa distribusi utama untuk mengalirkan air bersih menuju tandon besar Putat Gede, oleh karena itu grafik di atas ditampilkan untuk melihat respon tekanan di daerah yang berada jauh dari *discharge* pompa yang mengalami kegagalan ketika terjadi efek *water hammer*. Pada grafik di atas terlihat bahwa fluktuasi tekanan yang terjadi akibat kegagalan pompa juga cenderung lebih rendah. Fluktuasi serta osilasi tekanan tetap terjadi meskipun nilainya lebih rendah

dibandingkan fluktuasi tekanan yang terjadi di daerah *discharge* pompa. Terlihat tekanan maksimum yang terjadi mencapai 5,932 bar dan tekanan minimumnya mencapai 2,210 bar. Dan tetap terdapat perbedaan waktu terjadinya fluktuasi tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 13 dan cenderung stabil setelah detik ke 65. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 18 dan cenderung stabil setelah detik ke 75. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 23 dan cenderung stabil setelah detik ke 87.

Secara keseluruhan tidak ada perbedaan yang signifikan mengenai respon perlambatan terhadap terjadinya fluktuasi tekanan. Pengaruh inersia dari *flywheel* tetap berperan sebagai penunda terjadinya fluktuasi tekanan sedangkan pengaruh tidak adanya proteksi yang meredam fluktuasi tekanan akan memberikan dampak berupa fluktuasi dan osilasi tekanan yang tinggi dan cenderung lama. Namun dengan letak pipa yang jauh dari *discharge* pompa menyebabkan nilai lonjakan tekanan cenderung lebih rendah dibanding pipa-pipa yang berada pada daerah *discharge* pompa.

#### IV.2.2 Skenario 2 pompa *on* dan 2 pompa *off* – dengan variasi *flywheel* dan penambahan *gas accumulator*

- Titik analisa pada pipa P5 *inlet* (*discharge* pompa 1)



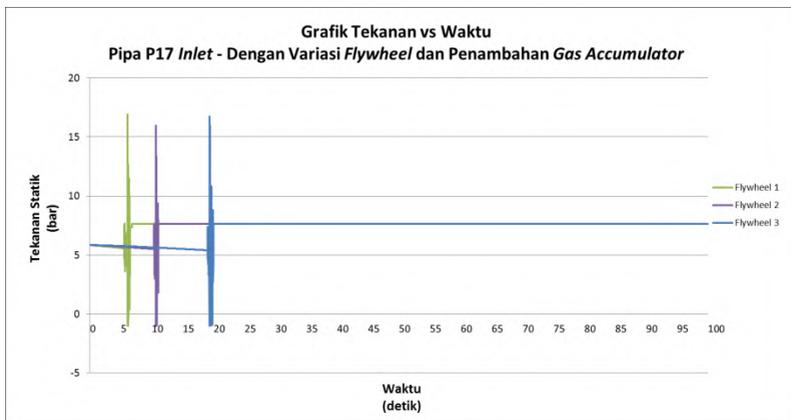
**Gambar 4.5 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 Inlet (Discharge Pompa 1) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Dan Penambahan Gas Accumulator Pada Skenario 2 Pompa OFF**

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa 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. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 4 dan cenderung stabil setelah detik ke 45. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 10 dan cenderung stabil setelah detik ke 54. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 20 dan cenderung stabil setelah detik ke 62.

Terlihat pengaruh penggunaan sistem proteksi *water hammer* terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi akibat efek *water hammer*. Variasi momen inersia yang tersimpan pada *flywheel*

memberikan respon berupa perlambatan atau penundaan terjadinya fluktuasi tekanan. Semakin besar momen inersia yang tersimpan maka akan semakin memperlambat terjadinya fluktuasi tekanan. Fluktuasi tekanan yang terjadi beresilasi dengan rendah dan dengan waktu yang cenderung singkat, ini merupakan pengaruh *gas accumulator* sebagai alat proteksi yang berperan dalam meredam fluktuasi tekanan sehingga tidak terjadinya fluktuasi tekanan yang besar yang beresiko merusak komponen penyusun perpipaan.

- Titik analisa pada pipa P17 inlet (*discharge pompa 3*)



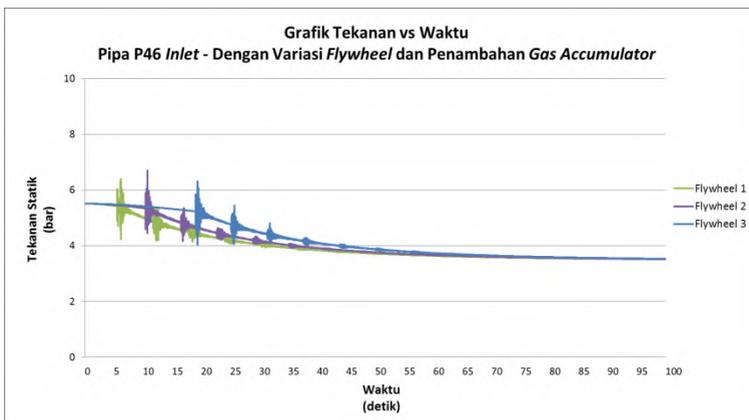
**Gambar 4.6 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P17 Inlet (Discharge Pompa 3) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Dan Penambahan Gas Accumulator Pada Skenario 2 Pompa OFF**

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa untuk pemodelan dengan menggunakan *gas accumulator* menunjukkan fluktuasi tekanan dan osilasi yang tinggi, dimana tekanan maksimumnya mencapai 16,745 bar dan tekanan minimumnya mencapai -0,994 bar. Dan tetap terdapat perbedaan waktu terjadinya fluktuasi tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 4 dan

cenderung stabil setelah detik ke 6. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 9 dan cenderung stabil setelah detik ke 11. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 18 dan cenderung stabil setelah detik ke 21.

Terlihat bahwa nilai tekanan seketika stabil sesaat setelah mengalami fluktuasi tekanan akibat kegagalan operasi pompa. Hal ini diakibatkan oleh kondisi aliran yang cenderung stabil akibat pompa 3 berhenti operasi dan tidak adanya aktivitas aliran air di dalam pipa. Dan pada kondisi ini pasokan air pun akan terhenti karena pompa berhenti beroperasi dan juga aliran air dari arah *suction* pompa akan tertutup oleh *check valve* yang otomatis menutup karena adanya aliran balik akibat efek *water hammer*.

- Titik analisa pada pipa P46 *inlet* (sebelum *gas accumulator*)



**Gambar 4.7 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P46 Inlet (Sebelum Gas Accumulator) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Dan Penambahan Gas Accumulator Pada Skenario 2 Pompa OFF**

Pipa P46 *inlet* berada pada jalur pipa distribusi utama, oleh karena itu grafik di atas ditampilkan untuk melihat respon tekanan di daerah yang dekat dengan alat proteksi *gas*

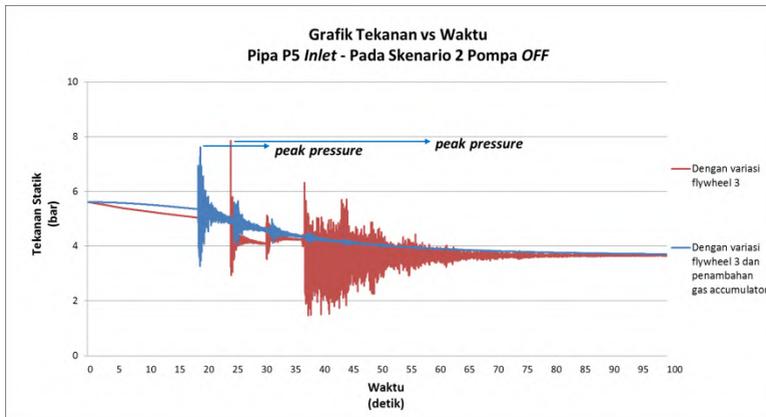
*accumulator* pada saat pompa mengalami kegagalan operasi. Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa untuk pemodelan dengan menggunakan *gas accumulator* menunjukkan fluktuasi tekanan yang cenderung lebih rendah serta durasi fluktuasi yang relatif singkat. Pada grafik ini titik analisa berada di daerah sebelum *gas accumulator* yakni pipa P46 dimana tekanan yang terjadi untuk tekanan maksimumnya mencapai 6,706 bar dan tekanan minimumnya mencapai 4,423 bar. Dan tetap terdapat perbedaan waktu terjadinya fluktuasi tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 5 dan cenderung stabil setelah detik ke 45. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 9 dan cenderung stabil setelah detik ke 55. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 18 dan cenderung stabil setelah detik ke 65.

Terlihat bahwa nilai tekanan di daerah terdekat dengan *gas accumulator* memiliki nilai tekanan yang cenderung rendah, hal ini dikarenakan fluktuasi tekanan yang terjadi akibat aliran balik diredam dengan baik oleh *gas accumulator* hingga tekanan menuju kondisi stabilnya. Faktor jarak *gas accumulator* ini juga sangat mempengaruhi turunnya nilai tekanan, berbeda dengan titik analisa sebelumnya yang berada jauh dari letak *gas accumulator*. Hal tersebut berdampak pada masih tingginya fluktuasi tekanan yang terjadi sesaat setelah pompa gagal beroperasi meskipun osilasi setelahnya berangsur menurun lebih cepat dibandingkan dengan tidak menggunakan *gas accumulator*.

#### **IV.2.3 Perbandingan grafik untuk pemodelan dengan variasi *flywheel* vs pemodelan dengan variasi *flywheel* dan penambahan *gas accumulator* pada kondisi 2 pompa OFF**

Analisa ini dilakukan untuk menunjukkan secara langsung pengaruh penambahan *gas accumulator* pada pemodelan sistem perpipaan yang disimulasikan. Titik yang

dibandingkan yakni pada pipa P5 *inlet* yang merupakan pipa *discharge* pompa 1 yang paling rentan terkena hantaman lonjakan tekanan akibat *water hammer* karena posisinya yang paling dekat dengan pipa keluaran utama. Dengan variasi ukuran *flywheel* yang digunakan adalah variasi ke-3 yakni ukuran *flywheel* yang terbesar.



**Gambar 4.8 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**

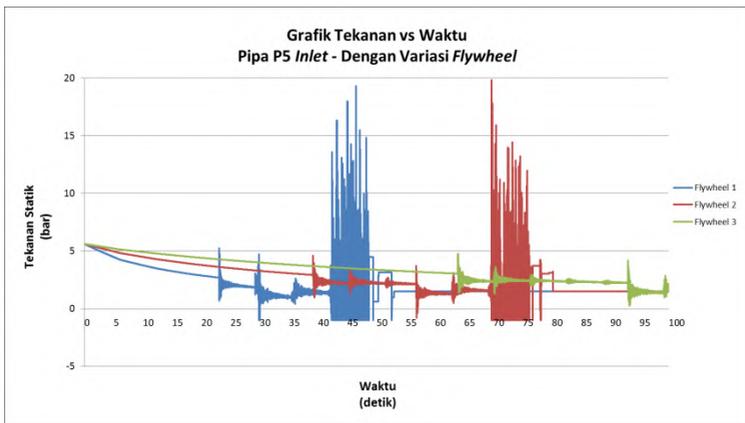
Dari grafik perbandingan terlihat bahwa pada pemodelan dengan penambahan *gas accumulator* mampu menurunkan *peak pressure* pada saat terjadi *water hammer*. Pemodelan dengan variasi *flywheel* 3 mencapai *peak pressure* 7,839 bar dan pada pemodelan dengan variasi *flywheel* 3 serta penambahan *gas accumulator* nilai *peak pressure* turun menjadi 7,126 bar. Peran *gas accumulator* sebagai peredam tekanan berlebih berperan dalam menurunkan *peak pressure* ini.

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. Terlihat pada garis grafik warna biru bahwa fluktuasi tekanan berangsur turun dan mencapai kondisi stabilnya pada detik ke 62 sedangkan garis grafik warna merah tua menunjukkan kondisi stabilnya setelah detik ke 75.

#### IV.2.4 Skenario 4 pompa *off* – dengan variasi *flywheel*

- Titik analisa pada pipa P5 *inlet* (*discharge* pompa 1)



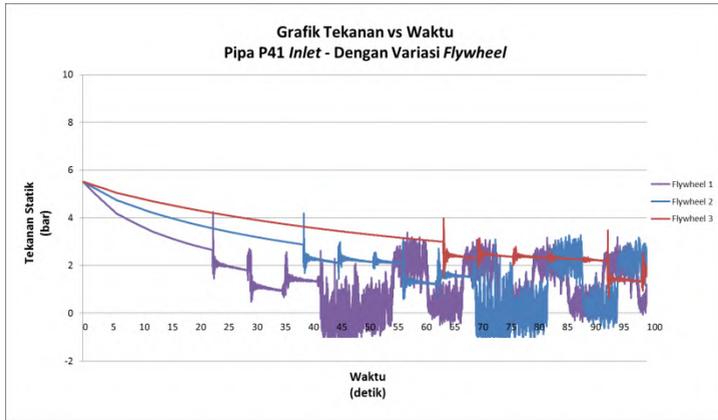
**Gambar 4.9 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 Inlet (Discharge Pompa 1) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Pada Skenario 4 Pompa OFF**

Pada skenario ini terlihat pada grafik 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. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 22 dan cenderung stabil setelah detik ke 51. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 38 dan cenderung stabil

setelah detik ke 78. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 63 dan cenderung stabil setelah lebih dari detik ke 100.

Pengaruh penggunaan sistem proteksi *water hammer* terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi akibat efek *water hammer* masih tetap terlihat. Dimana variasi momen inersia yang tersimpan pada *flywheel* memberikan respon berupa perlambatan atau penundaan terjadinya fluktuasi tekanan. Semakin besar momen inersia yang tersimpan maka akan semakin memperlambat terjadinya fluktuasi tekanan. Dan terlihat pula bahwa osilasi tekanan yang tinggi dengan waktu yang cenderung lama merupakan akibat dari tidak adanya proteksi yang meredam fluktuasi tekanan tersebut. Sehingga dengan tidak digunakannya *gas accumulator* pada pemodelan ini maka fluktuasi tekanan yang terjadi akan berosilasi dengan waktu yang cenderung lama hingga akhirnya kembali ke kondisi tekanan yang stabil. Hal ini terlihat pada grafik bahwa lonjakan tekanan untuk masing-masing variasi hampir sama secara nilai hanya saja waktu terjadinya lonjakan tekanan yang berbeda akibat adanya pengaruh inersia dari *flywheel* yang digunakan pada setiap simulasi.

- Titik analisa pada pipa P41 *inlet* (pipa *discharge* utama)



**Gambar 4.10 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P41 Inlet (Pipa Discharge Utama) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Pada Skenario 4 Pompa OFF**

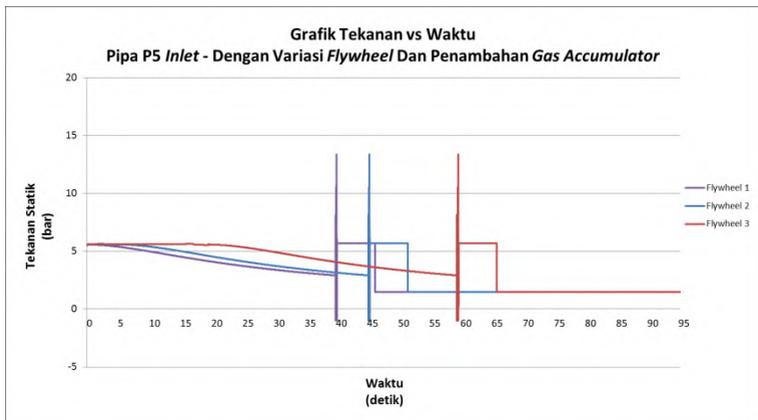
Pada grafik di atas terlihat bahwa fluktuasi tekanan yang terjadi akibat kegagalan pompa juga terjadi di daerah pipa keluaran utama. Fluktuasi serta osilasi tekanan yang tinggi tetap terjadi meskipun nilainya lebih rendah dibandingkan fluktuasi tekanan yang terjadi di daerah *discharge* pompa. Terlihat tekanan maksimum yang terjadi mencapai 5,512 bar dan tekanan minimumnya mencapai -0,905 bar. Dan tetap terdapat perbedaan waktu terjadinya fluktuasi tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 23, garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 38 dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 62. Sampai lebih dari detik ke 100 pun masing-masing garis grafik belum menunjukkan penurunan tekanan hingga kondisi stabilnya.

Secara keseluruhan tidak ada perbedaan yang signifikan mengenai respon perlambatan terhadap terjadinya fluktuasi

tekanan. Pengaruh inersia dari *flywheel* tetap berperan sebagai penunda terjadinya fluktuasi tekanan sedangkan pengaruh tidak adanya proteksi yang meredam fluktuasi tekanan akan memberikan dampak berupa fluktuasi dan osilasi tekanan yang tinggi dan cenderung lama. Terlihat bahwa pada kondisi pompa mati seluruhnya nilai fluktuasi naik turunnya tekanan berlangsung sangat lama dan terjadi secara berulang, ini merupakan dampak utama akibat tidak ada yang meredam lonjakan tekanan tersebut.

#### IV.2.5 Skenario 4 pompa *off* – dengan variasi *flywheel* dan penambahan *gas accumulator*

- Titik analisa pada pipa P5 *inlet* (*discharge* pompa 1)



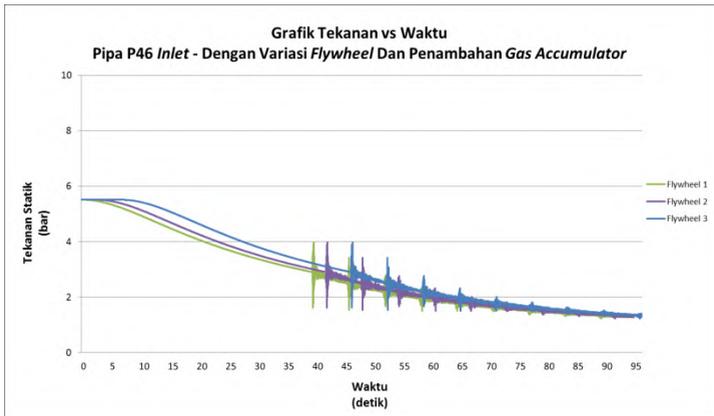
**Gambar 4.11 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P5 *Inlet* (*Discharge* Pompa 1) Dengan Variasi Ukuran *Flywheel* Dan Penambahan *Gas Accumulator* Pada Skenario 4 Pompa *OFF***

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa untuk pemodelan dengan menggunakan *gas accumulator* menunjukkan fluktuasi tekanan dan osilasi yang masih cukup tinggi, dimana tekanan maksimumnya mencapai 13,373 bar dan tekanan minimumnya mencapai 1,4749 bar. Dan terdapat perbedaan waktu terjadinya fluktuasi tekanan maupun turunnya lonjakan

tekanan hingga menuju kondisi stabilnya. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 38 dan cenderung stabil setelah detik ke 45. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 44 dan cenderung stabil setelah detik ke 52. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 58 dan cenderung stabil setelah detik ke 65.

Terlihat pengaruh penggunaan sistem proteksi *water hammer* terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi akibat efek *water hammer*. Variasi momen inersia yang tersimpan pada *flywheel* memberikan respon berupa perlambatan atau penundaan terjadinya fluktuasi tekanan. Semakin besar momen inersia yang tersimpan maka akan semakin memperlambat terjadinya fluktuasi tekanan. Fluktuasi tekanan yang terjadi beresilasi dengan rendah dan dengan waktu yang cenderung singkat, ini merupakan pengaruh *gas accumulator* sebagai alat proteksi yang berperan dalam meredam fluktuasi tekanan sehingga tekanan yang berlebih kemudian dibuang ke *gas accumulator*.

- Titik analisa pada pipa P46 *inlet* (sebelum *gas accumulator*)



**Gambar 4.12 Grafik Tekanan Terhadap Waktu Pada Pipa P46 Inlet (Sebelum Gas Accumulator) Dengan Variasi Ukuran Flywheel Dan Penambahan Gas Accumulator Pada Skenario 4 Pompa OFF**

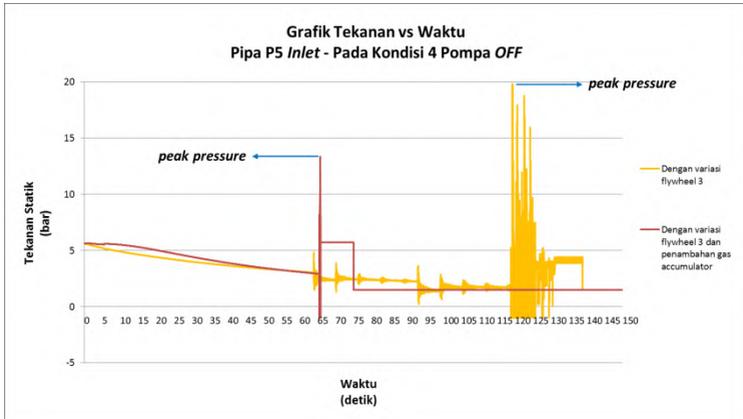
Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa untuk pemodelan dengan menggunakan *gas accumulator* menunjukkan fluktuasi tekanan yang cenderung lebih rendah dibandingkan tidak menggunakan *gas accumulator*. Pada grafik ini titik analisa berada di daerah sebelum *gas accumulator* yakni pipa P46 dimana tekanan yang terjadi seketika pompa mati yakni nilai tekanan langsung berangsur menurun menuju tekanan minimumnya yang mencapai 1,3072 bar. Dan tetap terdapat perbedaan waktu terjadinya fluktuasi tekanan maupun turunnya lonjakan tekanan hingga menuju kondisi stabilnya. Dimana untuk garis grafik variasi *flywheel* 1 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 38 dan cenderung stabil setelah detik ke 75. Garis grafik *flywheel* 2 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 43 dan cenderung stabil setelah detik ke 82. Dan garis grafik *flywheel* 3 lonjakan tekanan terjadi mulai detik ke 46 dan cenderung stabil setelah detik ke 90.

Terlihat bahwa nilai tekanan di daerah terdekat dengan *gas accumulator* memiliki nilai tekanan yang cenderung rendah, hal ini dikarenakan fluktuasi tekanan yang terjadi akibat aliran balik diredam dengan baik oleh *gas accumulator* hingga tekanan menuju kondisi stabilnya. Faktor jarak *gas accumulator* ini juga sangat mempengaruhi turunnya nilai tekanan, berbeda dengan titik analisa sebelumnya yang berada jauh dari letak *gas accumulator*. Hal tersebut berdampak pada masih tingginya fluktuasi tekanan yang terjadi sesaat setelah pompa gagal beroperasi meskipun osilasi setelahnya berangsur menurun lebih cepat dibandingkan dengan tidak menggunakan *gas accumulator*.

#### **IV.2.6 Perbandingan grafik untuk pemodelan dengan variasi *flywheel* vs pemodelan dengan variasi *flywheel* dan penambahan *gas accumulator* pada kondisi 4 pompa OFF**

Analisa ini dilakukan untuk menunjukkan secara langsung pengaruh penambahan *gas accumulator* pada pemodelan sistem perpipaan yang disimulasikan. Titik yang

dibandingkan yakni pada pipa P5 *inlet* yang merupakan pipa *discharge* pompa 1 yang paling rentan terkena hantaman lonjakan tekanan akibat *water hammer* karena posisinya yang paling dekat dengan pipa keluaran utama. Dengan variasi ukuran *flywheel* yang digunakan adalah variasi ke-3 yakni ukuran *flywheel* yang terbesar.



**Gambar 4.13** 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*

Dari grafik perbandingan 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. Terlihat pada garis grafik warna merah tua

bahwa fluktuasi tekanan berangsur turun dan mencapai kondisi stabilnya pada detik ke 65 sedangkan garis grafik warna oranye menunjukkan kondisi stabilnya setelah detik ke 137.

### IV.3 Perhitungan Kekuatan Tebal Pipa *Discharge* P5 Terhadap Tekanan Statik Maksimum

Untuk memastikan tebal pipa yang digunakan mampu menahan beban dari tekanan statik maksimum yang terjadi akibat efek *water hammer* maka perlu dilakukan perhitungan tebal minimum pipa *discharge* yang direkomendasikan sesuai dengan standar perhitungan tebal pipa *steel* yang dikeluarkan oleh AWWA (*American Water Works Association*). Sehingga akan didapatkan rekomendasi tebal pipa yang aman dalam menahan beban tekanan maksimum akibat efek *water hammer*.

#### 1. Desain tebal pipa untuk tekanan internal maksimum

Dengan data tekanan maksimum diketahui, tebal pipa didapatkan dengan menggunakan persamaan *Barlow* sebagai berikut.

- *Internal pressure maximum* (P) = 20 bar
- *Allowable design stress for steel* (S) = 15000 psi  
= 103,421 bar
- *Outside diameter, exc. coatings* (D) = 619,04 mm

$$\bullet \quad t = \frac{PD}{2S} = \frac{20 \text{ bar} \times 619,04 \text{ mm}}{2 \times 103,421 \text{ bar}} = 5,98 \text{ mm}$$

#### 2. Tebal pipa minimum

Dari desain tebal pipa yang didapat, kemudian ditentukan tebal pipa minimum dengan mempertimbangkan faktor toleransi manufaktur yang diijinkan.

- Desain tebal pipa untuk *internal pressure maximum* (t) = 5,98 mm

$$t_m = \frac{t}{0.875} = \frac{5,98 \text{ mm}}{0.875} = \mathbf{6,83 \text{ mm}}$$

- ✚ Didapatkan kesimpulan bahwa dengan tekanan maksimum internal yang terjadi sebesar  $P = 20$  bar dan dengan pertimbangan toleransi manufaktur yang diijinkan maka tebal pipa minimum yang direkomendasikan sesuai perhitungan adalah  $t_m = \mathbf{6,83 \text{ mm}}$ . Sehingga dengan tebal pipa yang digunakan sesuai data eksisting yakni  $t = \mathbf{9,52 \text{ mm}}$  (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*.

## LAMPIRAN A

### Data Spesifikasi Pipa Pada Sistem Perpipaan IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya

Tabel A.1 Spesifikasi Pipa Pada Simulasi Tanpa *Gas Accumulator*

Nomor Pipa	Panjang Pipa (meter)	Material Pipa	Diameter Pipa (milimeter)	Tebal Pipa (milimeter)
P1	30,2	<i>Steel</i>	1200	12,7
P2	30,2	<i>Steel</i>	1200	12,7
P3	2,8	<i>Steel</i>	700	12,7
P4	5	<i>Steel</i>	700	12,7
P5	2,6	<i>Steel</i>	600	9,52
P6	4	<i>Steel</i>	600	9,52
P7	6	<i>Steel</i>	600	9,52
P8	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P9	2,8	<i>Steel</i>	700	12,7
P10	5	<i>Steel</i>	700	12,7
P11	2,6	<i>Steel</i>	600	9,52
P12	4	<i>Steel</i>	600	9,52
P13	6	<i>Steel</i>	600	9,52
P14	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P15	2,8	<i>Steel</i>	700	12,7
P16	5	<i>Steel</i>	700	12,7
P17	2,6	<i>Steel</i>	600	9,52
P18	4	<i>Steel</i>	600	9,52
P19	6	<i>Steel</i>	600	9,52
P20	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P21	2,8	<i>Steel</i>	700	12,7
P22	5	<i>Steel</i>	700	12,7
P23	2,6	<i>Steel</i>	600	9,52
P24	4	<i>Steel</i>	600	9,52
P25	6	<i>Steel</i>	600	9,52

**Tabel A.1 Spesifikasi Pipa Pada Simulasi Tanpa Gas Accumulator  
(Lanjutan)**

<b>Nomor Pipa</b>	<b>Panjang Pipa (meter)</b>	<b>Material Pipa</b>	<b>Diameter Pipa (milimeter)</b>	<b>Tebal Pipa (milimeter)</b>
P26	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P27	2,8	<i>Steel</i>	700	12,7
P28	5	<i>Steel</i>	700	12,7
P29	2,6	<i>Steel</i>	600	9,52
P30	4	<i>Steel</i>	600	9,52
P31	6	<i>Steel</i>	600	9,52
P32	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P33	5	<i>Steel</i>	700	12,7
P34	2,6	<i>Steel</i>	600	9,52
P35	4	<i>Steel</i>	600	9,52
P36	6	<i>Steel</i>	600	9,52
P37	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P38	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P39	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P40	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05
P41	180	<i>Steel</i>	1400	19,05
P42	1263,5	<i>Steel</i>	1400	19,05
P43	3943,7	<i>Steel</i>	1400	19,05
P44	2,8	<i>Steel</i>	700	12,7
P45	5,6	<i>Steel</i>	1400	19,05

**Tabel A.2 Spesifikasi Pipa Pada Simulasi Dengan Gas Accumulator**

<b>Nomor Pipa</b>	<b>Panjang Pipa (meter)</b>	<b>Material Pipa</b>	<b>Diameter Pipa (milimeter)</b>	<b>Tebal Pipa (milimeter)</b>
P41	15	<i>Steel</i>	1400	19,05
P46	165	<i>Steel</i>	1400	19,05

## LAMPIRAN B

### Data Spesifikasi Sambungan Pipa dan Komponen Penyusun Pipa Pada Sistem Perpipaan IPAM Karang Pilang 2 PT PDAM Surya Sembada Surabaya

Tabel B.1 Spesifikasi Sambungan Pipa dan Komponen Penyusun Pipa Pada Simulasi

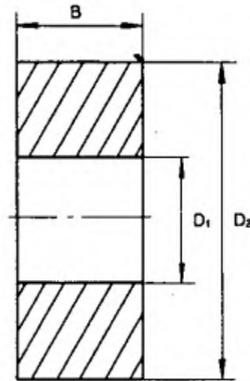
<b>Nomor <i>Junction</i></b>	<b>Jenis <i>Junction</i></b>	<b>Elevasi (meter)</b>
J1	Reservoir Karang Pilang 2	5,9
J2	<i>Butterfly valve</i>	2
J3	<i>Tee</i>	2
J4	<i>Butterfly valve</i>	2
J5	<i>Pump 1</i>	2
J6	<i>Check valve</i>	2
J7	<i>Butterfly valve</i>	2
J8	<i>Tee</i>	2
J9	<i>Tee</i>	2
J10	<i>Butterfly valve</i>	2
J11	<i>Pump 2</i>	2
J12	<i>Check valve</i>	2
J13	<i>Butterfly valve</i>	2
J14	<i>Tee</i>	2
J15	<i>Tee</i>	2
J16	<i>Butterfly valve</i>	2
J17	<i>Pump 3</i>	2
J18	<i>Check valve</i>	2
J19	<i>Butterfly valve</i>	2
J20	<i>Tee</i>	2
J21	<i>Tee</i>	2
J22	<i>Butterfly valve</i>	2
J23	<i>Pump 4</i>	2
J24	<i>Check valve</i>	2

**Tabel B.1 Spesifikasi Sambungan Pipa dan  
Komponen Penyusun Pipa Pada Simulasi  
(Lanjutan)**

<b>Nomor Junction</b>	<b>Jenis Junction</b>	<b>Elevasi (meter)</b>
J25	<i>Butterfly valve</i>	2
J26	<i>Tee</i>	2
J27	<i>Tee</i>	2
J28	<i>Butterfly valve</i>	2
J29	<i>Pump 5</i>	2
J30	<i>Check valve</i>	2
J31	<i>Butterfly valve</i>	2
J32	<i>Tee</i>	2
J33	<i>Butterfly valve</i>	2
J34	<i>Pump 6</i>	2
J35	<i>Check valve</i>	2
J36	<i>Butterfly valve</i>	2
J37	<i>Butterfly valve</i>	2
J38	<i>Butterfly valve</i>	5
J39	Tandon Putat Gede	25
J40	<i>Branch</i>	2
J41	<i>Branch</i>	2
J42	<i>Gas accumulator</i>	2,5

## LAMPIRAN C

### Data Perhitungan Momen Inersia Untuk Variasi Ukuran *Flywheel* 1, 2 dan 3.



Gambar C.1 Dimensi *Flywheel*

#### 1. Momen inersia *flywheel* variasi ke 1:

Data diketahui:

- Diameter luar *flywheel* ( $D_1$ ) = 0,15 meter
- Diameter luar *flywheel* ( $D_2$ ) = 1,1 meter
- Tebal *flywheel* ( $B$ ) = 0,3 meter
- Massa jenis material *flywheel* ( $\gamma$ ) = 7850 kg/m<sup>3</sup>

$$\bullet \quad I_f = \frac{\pi}{8} (D_2^4 - D_1^4) B \gamma = \frac{\pi}{8} (1,1^4 - 0,15^4) (0,3) (7850)$$

$$\bullet \quad I_f = 1353,54 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

✚ Momen inersia untuk variasi ukuran *flywheel* 1 adalah

$$I_f = 1353,54 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

## 2. Momen inersia *flywheel* variasi ke 2:

Data diketahui:

- Diameter luar *flywheel* ( $D_1$ ) = 0,15 meter
- Diameter luar *flywheel* ( $D_2$ ) = 1,2 meter
- Tebal *flywheel* (B) = 0,4 meter
- Massa jenis material *flywheel* ( $\gamma$ ) = 7850 kg/m<sup>3</sup>

- $I_f = \frac{\pi}{8}(D_2^4 - D_1^4)B\gamma = \frac{\pi}{8}(1,2^4 - 0,15^4)(0,4)(7850)$
- $I_f = 2556,28 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

✚ Momen inersia untuk variasi ukuran *flywheel* 2 adalah  
 $I_f = 2556,28 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ .

## 3. Momen inersia *flywheel* variasi ke 3:

Data diketahui:

- Diameter luar *flywheel* ( $D_1$ ) = 0,15 meter
- Diameter luar *flywheel* ( $D_2$ ) = 1,3 meter
- Tebal *flywheel* (B) = 0,5 meter
- Massa jenis material *flywheel* ( $\gamma$ ) = 7850 kg/m<sup>3</sup>

- $I_f = \frac{\pi}{8}(D_2^4 - D_1^4)B\gamma = \frac{\pi}{8}(1,3^4 - 0,15^4)(0,5)(7850)$
- $I_f = 4401,45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

✚ Momen inersia untuk variasi ukuran *flywheel* 3 adalah  
 $I_f = 4401,45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ .

## LAMPIRAN D

### Data Perhitungan Momen Inersia *Impeller* Pompa & Air Yang Tertahan Pada *Casing* Pompa Dan Momen Inersia Motor Penggerak.

1. Perhitungan momen inersia untuk *impeller* pompa dan air yang tertahan pada *casing* pompa:

Data diketahui:

- Daya pompa (P) = 400 kW
- Putaran motor (N) = 994 rpm

- $I_p = 1,5(10^7) \left(\frac{P}{N^3}\right)^{0,9556} = 1,5(10^7) \left(\frac{400}{994^3}\right)^{0,9556}$
- $I_p = 11,74 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

✚ Momen inersia dari *impeller* pompa dan air yang tertahan pada *casing* pompa adalah  $I_p = 11,74 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  .

2. Perhitungan momen inersia untuk motor penggerak pompa:

- $I_m = 118 \left(\frac{P}{N}\right)^{1,48} = 118 \left(\frac{400}{994}\right)^{1,48} = 30,68 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

✚ Momen inersia untuk motor penggerak pompa adalah  $I_m = 30,68 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  .

[halaman ini sengaja dikosongkan]

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **V.1 Kesimpulan**

Dari simulasi yang dilakukan, untuk mengetahui serta mengevaluasi pengaruh penggunaan alat proteksi *water hammer* yakni penambahan *gas accumulator* dan juga variasi ukuran *flywheel* yang digunakan terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi akibat kegagalan operasi pompa. Kesimpulan yang dapat diambil:

1. Berdasarkan simulasi dan analisa pemodelan yang dilakukan untuk *layout* sistem instalasi perpipaan di unit IPAM Karang Pilang 2, diketahui bahwa 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. Berdasarkan analisa *transient* yang dilakukan pada simulasi, terlihat bahwa pengaruh penggunaan *flywheel* adalah untuk memperlambat terjadinya lonjakan tekanan akibat efek *water hammer*. Aliran balik yang bergerak menuju pompa akan dilawan dengan momen inersia total yang tersimpan pada *flywheel* ditambah dengan momen inersia komponen berputar pada pompa lainnya. *Flywheel* kurang berperan dalam meredam fluktuasi tekanan yang terjadi, namun semakin besar ukuran *flywheel* maka semakin besar momen inersia yang tersimpan dan akan semakin memperlambat terjadinya lonjakan tekanan ketika terjadi kegagalan pompa operasi.
3. Pemodelan sistem perpipaan dengan menggunakan penambahan *gas accumulator* pada pipa keluaran utama memberikan pengaruh terhadap fluktuasi tekanan yang terjadi

akibat kegagalan pompa operasi. Dari analisa yang dilakukan diketahui bahwa lonjakan tekanan yang terjadi di daerah *discharge* pompa dan titik analisa lainnya mengalami penurunan baik dari nilai *peak pressure*nya maupun dari segi waktu berlangsungnya lonjakan tekanan. Dengan penggunaan *gas accumulator*, 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*. Semakin besar volume udara dalam *gas accumulator* maka akan semakin baik dalam meredam fluktuasi tekanan.

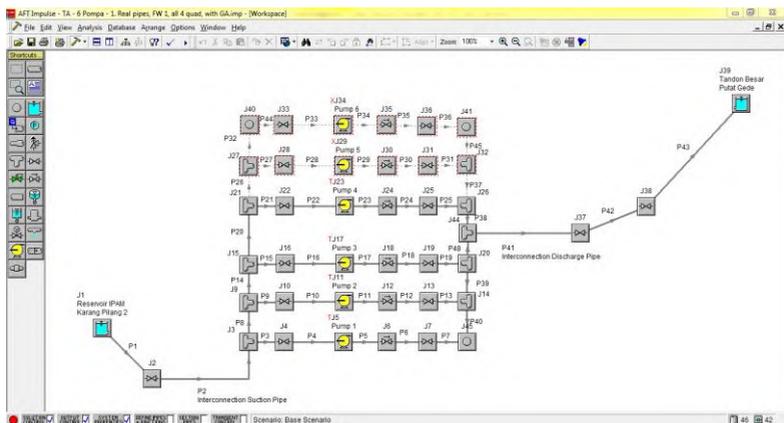
4. Untuk sistem perpipaan dengan menggunakan *gas accumulator*, nilai fluktuasi tekanan di daerah *discharge* pompa jauh lebih tinggi dibandingkan nilai fluktuasi tekanan di daerah dekat *gas accumulator* (pipa P41 dan pipa P46). Terutama untuk pipa P5 yang merupakan pipa *discharge* dari pompa 1, jarak yang dekat dengan pipa distribusi utama menjadi alasan daerah *discharge* pompa ini paling rentan terkena hantaman lonjakan akibat *water hammer*. Secara keseluruhan hal ini dipengaruhi oleh jarak pompa dengan *gas accumulator* yang terlalu jauh sehingga *gas accumulator* kurang maksimal untuk meredam fluktuasi tekanan tersebut.
5. Dari analisa secara simulasi untuk sistem perpipaan di unit IPAM Karang Pilang 2 yang sudah terpasang alat proteksi *water hammer* berupa *flywheel*, dan dengan 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. Namun dengan kondisi pipa *discharge* yang

rentan menerima lonjakan tekanan perlu dipertimbangkan alat proteksi tambahan yang bertugas meredam fluktuasi tekanan sehingga mampu memperpanjang umur pakai pipa ataupun mencegah kerusakan komponen perpipaan.

## V.2 Saran

Dari hasil studi numerik mengenai evaluasi sistem proteksi *water hammer* pada instalasi perpipaan di unit IPAM Karang Pilang 2 didapatkan beberapa saran untuk optimasi sistem perpipaan dalam menghadapi fenomena *water hammer*. Saran yang perlu dipertimbangkan adalah sebagai berikut.

1. Melakukan modifikasi atau perubahan susunan instalasi perpipaan pada pemodelan. Dengan memindahkan posisi pipa distribusi pada posisi sentral, akan memberikan pengaruh terhadap posisi pipa-pipa di daerah *discharge* pompa sehingga posisi pipa pada *discharge* pompa yang rentan menerima lonjakan tekanan akibat efek *water hammer* akan lebih merata.



**Gambar 5.1 Alternatif *Layout* Pemodelan Pada Simulasi *Water Hammer* Dengan AFT Impulse**

2. Optimasi ukuran volume udara pada *gas accumulator* yang digunakan pada pemodelan. Mengingat semakin besar volume udara pada *gas accumulator* maka akan semakin baik dalam meredam fluktuasi tekanan. Memvariasikan volume udara pada *gas accumulator* bisa menjadi alternatif untuk mendapatkan hasil simulasi terbaik untuk menentukan spesifikasi *gas accumulator* yang layak digunakan pada sistem perpipaan.
3. Dengan penempatan *gas accumulator* yang terlalu jauh dari lokasi *discharge* pompa, maka disarankan untuk menempatkan *gas accumulator* pada masing-masing *discharge* pompa agar didapatkan hasil yang maksimal dalam meredam *water hammer*, tentu dengan pertimbangan-pertimbangan yang perlu dilakukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Webb, T.H. 1981. **Waterhammer Control in Pipelines**, Published for James Hardie & Coy. Pty. Limited, 276pp.
- [2] [Http://simplyplumbing.wordpress.com/](http://simplyplumbing.wordpress.com/). Diakses Sabtu 7 Mei 2016 pukul 20:05 WIB.
- [3] Applied Flow Technology. 2008. **AFT Impulse User's Guide, Water Hammer Modeling in Piping System, AFT Impulse version 4.0**. United States of America: Applied Flow Technology.
- [4] Wylie, E.B., V.L. Streeter., dan L. Suo. 1993. **Fluid Transients in Systems**. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- [5] Sularso, Harou Tahara. 1983. **Pompa dan Kompresor**. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- [6] Chaudhry, M. H. 1979. **Applied Hydraulic Transients 2nd Edition**. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- [7] Nourbakhsh, Ahmad, André Jaumotte, Charles Hirsch, dan Hamideh B. Parizi. 2007. **Turbopumps and Pumping Systems**. New York: Springer Berlin Heidelberg.
- [8] Torishima Guna Indonesia. 1994. **Torishima Pump Hand Book**. Jakarta: PT Torishima Guna Indonesia.
- [9] American Water Works Association (AWWA). 2004. **Steel Pipe – A Guide for Design and Installation, AWWA Manual M11, Fourth Edition**. United States of America: American Water Works Association.

- [10] Simpson, Angus R., Victor Cantone, Ross Stevens, dan Martin F. Lambert. 2008. **A Comparison of a Pressure Vessel and Flywheel for Surge Mitigation in a Long Pipeline System.** (10th International Conference on Pressure Surges, Edinburgh, May 14-16, 2008, South Australia).
  
- [11] Constantin, Anca. 2011. **Simulation of Water Hammer Phenomenon in a Pumping Discharge Duct Protected by Air.** Latest Trend on Computers, vol.1.
  
- [12] PDAM Kota Surabaya. 2009. **Data-data Teknis IPAM Karang Pilang II.** Surabaya: PT PDAM Surya Sembada Surabaya.

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Bandung pada 22 Juni 1991, merupakan anak kedua dari 3 (tiga) bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SD Angkasa I Bandung, SMP Negeri 9 Bandung dan SMA Negeri 4 Bandung. Setelah lulus dari SMAN pada tahun 2009, penulis kemudian melanjutkan studi ke perguruan tinggi di Politeknik Manufaktur Negeri Bandung (POLMAN) untuk Program Studi Diploma Teknik Perancangan Manufaktur dan lulus pada September 2012. Penulis sempat bekerja di PT

Sugity Creatives selama satu tahun sampai dengan Oktober 2013 di divisi *Painting Production*. Dan setelahnya pada Januari 2014, penulis melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin. Penulis tertarik pada bidang studi Konversi Energi khususnya di bidang mekanika fluida yakni sistem perpipaan. Oleh karena itu penulis mendedikasikan Tugas Akhir pada bidang mekanika fluida dan penulis mempunyai harapan agar ilmu yang telah didapatkan mampu diamalkan semaksimal mungkin sehingga bermanfaat bagi keluarga, lingkungan, bangsa dan negara.

Penulis dapat dihubungi melalui email di [handyprast23@gmail.com](mailto:handyprast23@gmail.com) atau nomor telepon 085624062022.

[halaman ini sengaja dikosongkan]