

**TESIS**

**ANALISIS PENGARUH KECEPATAN PENUTUPAN  
KATUP TERHADAP TEKANAN PUNCAK *WATER*  
*HAMMER* PADA SISTEM PERPIPAAN DISTRIBUSI AIR**

Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan  
Guna Mencapai Gelar Magister Teknik (MT)



Oleh:

**Gavin A. Sani**

**NIM : 20202400099**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIS  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG  
2025**

**LEMBAR PERSETUJUAN TESIS**

**ANALISIS PENGARUH KECEPATAN PENUTUPAN KATUP  
TERHADAP TEKANAN PUNCAK *WATER HAMMER* PADA  
SISTEM PERPIPAAN DISTRIBUSI AIR**

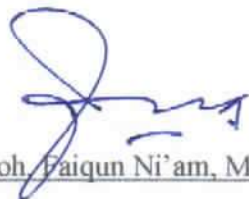
Disusun oleh :

**GAVIN A. SANI**

**NIM : 20202400099**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Tanggal, ..... Tanggal, .....  
Pembimbing I, ..... Pembimbing II,



Ir. Moh. Faiqun Ni'am, MT., Ph.D

NIK.210296020



Dr. Hj. Hermin Poedjiastoeti, S.Si., M.Si.

NIK.210299028

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

# ANALISIS PENGARUH KECEPATAN PENUTUPAN KATUP TERHADAP TEKANAN PUNCAK *WATER HAMMER* PADA SISTEM PERPIPAAN DISTRIBUSI AIR

Disusun oleh :


**GAVIN A. SANI**

**NIM : 20202400099**

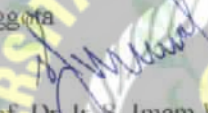
Tanggal: 12 Februari 2026

Tim Penguji:

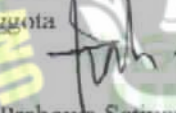
1. Ketua

  
(Dr. Hermapoedjastocti, S.Si, M.Si.)  
NIK. 210299028

2. Anggota

  
(Prof. Dr. Ir. S. Imam Wahyudi, DEA.)  
NIK. 210294014

3. Anggota

  
(Ir. Prabowo Setiawan, MT, Ph.D.)  
NIK. 210293017

Testis ini diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (MT)

Semarang, 12 Februari 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

  
Prof. Dr. Ir. Antonius, MT

NIK. 210202033

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik

  
Dr. Abdul Rochim, ST, MT

NIK. 210200031

## MOTTO

(QS. Al-Imran: 110)

كُنْتُمْ خَيْرَ أُمَّةٍ أُخْرِجَتْ لِلنَّاسِ تَأْمُرُونَ بِالْمَعْرُوفِ وَتَنْهَوْنَ عَنِ الْمُنْكَرِ وَتُؤْمِنُونَ بِاللَّهِ وَلَوْ آمَنَ أَهْلُ الْكِتَابِ لَكَانَ خَيْرًا لَهُمْ مِّنْهُمْ الْمُؤْمِنُونَ وَأَكْثَرُهُمُ الْفَاسِقُونَ

“Kamu adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk umat manusia, yang menyuruh kepada yang ma'ruf dan mencegah dari yang munkar, serta beriman kepada Allah”

Makna:

Menjadi umat terbaik, yang berkontribusi dengan kebaikan, mencegah keburukan, dan senantiasa beriman kepada Allah.

(QS. Tāhā: 114)

وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا

“Dan katakanlah: Ya Tuhanku, tambahkanlah kepadaku ilmu.”

Makna:

Proses menuntut ilmu adalah perjalanan panjang yang menuntut ketekunan, kerendahan hati, dan kesadaran bahwa setiap pemahaman yang diperoleh merupakan anugerah. Dengan karya ilmiah yang jujur, bermanfaat, dan dapat menjadi bagian kecil dari upaya memajukan ilmu pengetahuan.

(QS. Al-Qamar: 49)

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

“Dan Dia-lah yang menjadikan segala sesuatu dengan ukuran (ketentuan).”

Makna:

“Tidak ada yang terjadi tanpa ketentuan. Bahkan tekanan, aliran, dan gelombang pun tunduk pada hukum-Nya. Tugas peneliti hanyalah membaca keteraturan itu.”

*Even the silent flow of water holds a force powerful enough to reshape its path, a reminder that unseen pressures shape us just the same. — penulis, 2025.*

## HALAMAN PERSEMBAHAN

Tesis ini saya persembahkan dengan penuh rasa syukur dan kerendahan hati kepada:

Keluarga tercinta, yang tidak pernah berhenti memberikan dukungan moral, spiritual, dan kasih sayang yang tulus tanpa batas. Dalam setiap langkah yang saya ambil, doa-doa mereka menjadi kekuatan yang menguatkan, nasihat mereka menjadi penerang, dan cinta mereka menjadi sumber keteguhan yang membuat saya mampu bertahan dalam setiap proses, tantangan, dan perjuangan selama penyusunan tesis ini. Segala pencapaian dalam karya ini adalah buah dari pengorbanan, keikhlasan, dan ketulusan mereka.

Para dosen pembimbing dan pengajar, yang telah dengan sabar membimbing saya melalui setiap proses akademik. Terima kasih atas ilmu, arahan, ketelitian, dan dorongan yang telah diberikan. Bimbingan Bapak/Ibu bukan hanya membentuk pemahaman akademik saya, tetapi juga karakter berpikir, etika ilmiah, dan kedisiplinan yang menjadi bekal penting dalam perjalanan profesional saya ke depan. Dedikasi dan keikhlasan Bapak/Ibu menjadi bagian yang sangat berarti dalam penyelesaian tesis ini.

Dan kepada diri saya sendiri, atas keteguhan, kerja keras, dan komitmen untuk terus melangkah meski menghadapi berbagai tantangan. Terima kasih telah memilih untuk tidak menyerah, tetap berdiri, dan menyelesaikan perjalanan panjang ini hingga tuntas. Tesis ini menjadi bukti bahwa ketekunan dan keyakinan pada proses mampu membawa hasil yang terbaik.

Semoga karya ini dapat menjadi langkah kecil yang memberi manfaat, baik di dunia akademik maupun dalam praktik nyata di lapangan.

## ABSTRAK

Fenomena *water hammer* atau lonjakan tekanan mendadak pada sistem perpipaan distribusi air merupakan salah satu tantangan utama dalam menjaga keandalan dan keamanan infrastruktur air bersih. *Water hammer* terjadi akibat perubahan mendadak kecepatan aliran fluida, yang biasanya dipicu oleh penutupan katup secara cepat. Fenomena ini menghasilkan gelombang tekanan yang merambat dengan cepat dan dapat menyebabkan kerusakan pada pipa, sambungan, serta perangkat lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap tekanan puncak *water hammer* pada sistem distribusi air, dengan studi kasus pada Jaringan Distribusi Utama (JDU) dan Jaringan Distribusi Pembagi (JDP) Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku menggunakan material pipa baja dan HDPE.

Metode yang digunakan adalah simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Bentley Hammer yang mengimplementasikan Metode Karakteristik (MOC) untuk memodelkan fenomena transien. Variasi waktu penutupan katup (30 detik, 60 detik, dan 120 detik) dianalisis untuk memahami hubungan antara kecepatan penutupan dan lonjakan tekanan. Analisis juga mencakup distribusi tekanan, gaya dinamis, serta identifikasi titik rawan pada sistem perpipaan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin cepat waktu penutupan katup, semakin tinggi lonjakan tekanan yang dihasilkan. Pada skenario penutupan tercepat (30 detik), tekanan puncak mencapai 17,0 bar, dengan fluktuasi gaya yang sangat tajam, berisiko tinggi terhadap kerusakan sistem. Pada skenario penutupan lambat (120 detik), tekanan puncak menurun menjadi 13,8 bar, dengan gaya yang lebih stabil. Waktu penutupan katup minimal 60 - 120 detik sangat direkomendasikan untuk meminimalkan risiko *water hammer*, mencegah tekanan negatif, serta menjaga umur panjang infrastruktur pipa. Selain itu, pemasangan perangkat proteksi seperti *pressure relief valve*, *surge tank*, serta pemantauan tekanan secara *real-time* sangat penting sebagai langkah mitigasi tambahan.

**Kata kunci:** *water hammer*, penutupan katup, tekanan puncak, distribusi air, simulasi Bentley Hammer.



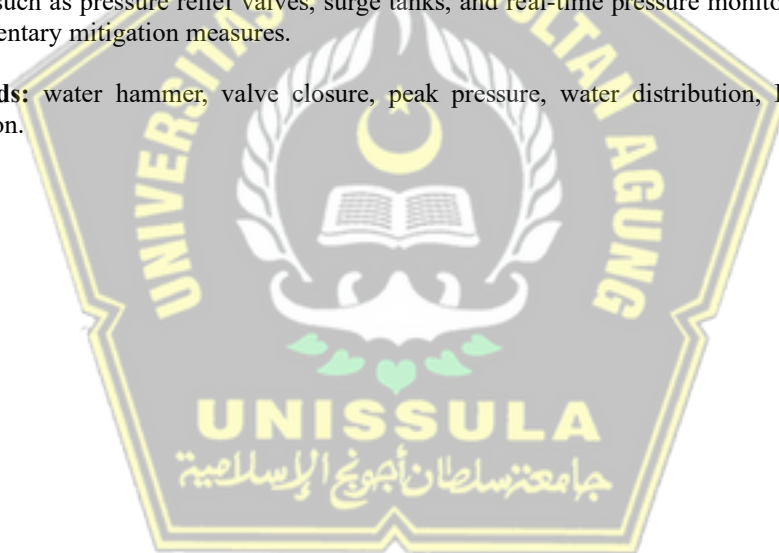
## ***ABSTRACT***

The phenomenon of water hammer, or sudden pressure surge in water distribution piping systems, is one of the main challenges in ensuring the reliability and safety of clean water infrastructure. Water hammer occurs due to a sudden change in the flow velocity of the fluid, typically triggered by rapid valve closure. This results in pressure waves that propagate quickly and can cause damage to pipes, joints, and other supporting devices. This study aims to analyze the effect of valve closure speed on the peak pressure of water hammer in water distribution piping systems, with case studies on the Main Distribution Network (JDU) and Sub-Division Distribution Network (JDP) Sub-WP 1B and 1C of the Sepaku Water Supply System (SPAM), using steel and HDPE pipe materials.

The method used is numerical simulation with Bentley Hammer software, which implements the Method of Characteristics (MOC) to model the transient phenomena. Simulation scenarios include variations in valve closure times (30 seconds, 60 seconds, and 120 seconds) to analyze the relationship between closure speed and the resulting pressure surge. The analysis also includes pressure distribution, dynamic forces, and identification of critical points in the piping system.

The results indicate that the faster the valve closure time, the higher the resulting pressure surge. In the fastest closure scenario (30 seconds), the peak pressure reaches 17.0 bar, with sharp fluctuations in force, posing a high risk to the system. In contrast, in the slowest closure scenario (120 seconds), the peak pressure decreases to 13.8 bar, with more stable forces. A valve closure time of 60 - 120 seconds is strongly recommended to minimize the risk of water hammer, prevent negative pressure, and extend the lifespan of the pipe infrastructure. Additionally, the installation of protective devices such as pressure relief valves, surge tanks, and real-time pressure monitoring is critical as supplementary mitigation measures.

**Keywords:** water hammer, valve closure, peak pressure, water distribution, Bentley Hammer simulation.



## **SURAT PERNYATAAN KEASLIAN**

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : GAVIN A SANI

NIM : 20202400099

Dengan ini saya nyatakan bahwa Tesis yang berjudul:

**ANALISIS PENGARUH KECEPATAN PENUTUPAN KATUP TERHADAP  
TEKANAN PUNCAK *WATER HAMMER* PADA SISTEM PERPIPAAN  
DISTRIBUSI AIR**

Semua karya saya asli, dan saya sepenuhnya menyadari bahwa saya tidak melakukan plagiarisme atau mengambil seluruh atau sebagian besar karya orang lain tanpa mencantumkan sumbernya. Jika terbukti bersalah, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.



Semarang, 12 Februari 2026

**Materai 10.000**

GAVIN A SANI

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, petunjuk, dan kemudahan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis berjudul “**Analisis Pengaruh Kecepatan Penutupan Katup Terhadap Tekanan Puncak *Water Hammer* Pada Sistem Perpipaan Distribusi Air**” ini dengan baik. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Penyusunan tesis ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. **Bapak Dr. Abdul Rochim, ST., MT.** selaku Dekan Fakultas Teknik, serta seluruh jajaran yang senantiasa memberikan dukungan akademik.
2. **Bapak Prof. Dr. Ir. Antonius, MT.** selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil, yang selalu memfasilitasi dan mendukung kelancaran proses pendidikan.
3. **Bapak Ir. Moh. Faiqun Ni'am, MT., Ph.D** selaku Pembimbing I dan **Ibu Dr. Hj. Hermin Poedjiastoeti, S.Si., M.Si.** selaku Pembimbing II, atas bimbingan, arahan, koreksi, dan motivasi yang sangat berarti dalam proses penyusunan tesis ini.
4. Seluruh dosen pengajar di Program Studi Magister Teknik Sipil, yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan pengalaman berharga selama masa studi.
5. Seluruh anggota keluarga yang tidak pernah berhenti memberikan doa, dukungan, dan semangat dalam setiap langkah perjalanan pendidikan penulis.
6. Seluruh pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan penelitian ini. Semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang hidraulika, sistem perpipaan, dan analisis transien pada jaringan distribusi air.

Akhir kata, semoga segala kebaikan dan bantuan yang diberikan kepada penulis menjadi amal jariyah yang bernilai di sisi Allah SWT.

## DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN TESIS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN TESIS .....	iii
MOTTO.....	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	v
ABSTRAK .....	vi
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN .....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
BAB I     PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Keaslian Penelitian.....	4
1.5. Tujuan Penelitian.....	5
1.6. Manfaat Penelitian.....	5
1.7. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II    TINJAUAN PUSTAKA DAN KERANGKA TEORI.....	7
2.1. Sistem Perpipaan Distribusi Air .....	7
2.1.1 Komponen Jaringan Distribusi Air.....	8
2.1.2 Material Pipa Distribusi Air .....	11
2.1.3 Prinsip Hidraulika Distribusi Air .....	12
2.2. Fenomena <i>Water Hammer</i> .....	14
2.3. Kecepatan Gelombang Tekanan ( <i>Wave Speed</i> ) .....	19
2.4. Model Matematis dan Analisis <i>Water Hammer</i> .....	21
2.4.1 Persamaan Momentum dan Kontinuitas .....	21
2.4.2 <i>Method of Characteristics</i> / MOC .....	25
2.4.3 Model Numerik dan Simulasi .....	26

	2.4.4 Bentley Hammer .....	26
	2.5. Pengaruh Suhu Terhadap Properti Air.....	28
	2.6. <i>Valve</i> Dalam Sistem Perpipaan.....	30
	2.6.1 Jenis-Jenis Katup dan Mekanisme Kerja .....	30
	2.6.2 Konsep <i>Closing Law</i> .....	31
	2.6.3 Hubungan Waktu Penutupan <i>Valve</i> dengan Tekanan Puncak .....	34
	2.7. Penelitian Terdahulu.....	38
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN .....	44
	3.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian.....	44
	3.2. Lokasi dan Objek Penelitian .....	44
	3.2.1 Alat dan Bahan Penelitian .....	52
	3.3. Variabel Penelitian.....	53
	3.3.1 Variabel Bebas ( <i>Independent Variable</i> ).....	53
	3.3.2 Variabel Terikat ( <i>Dependent Variable</i> ).....	54
	3.3.3 Variabel Kendali ( <i>Controlled Variable</i> ) .....	54
	3.4. Metode Pengumpulan Data .....	55
	3.4.1 Data Sekunder .....	55
	3.4.2 Data Primer (Hasil Simulasi) .....	55
	3.5. Tahapan Alur Penelitian .....	56
	3.5.1 Studi Literatur .....	57
	3.5.2 Pemodelan Sistem Pipa.....	58
	3.5.3 Pengaturan Skenario.....	59
	3.5.4 Analisa Data .....	60
	3.5.5 Interpretasi dan Kesimpulan .....	66
BAB IV	ANALISA DAN PEMBAHASAN .....	67
	4.1. Gambaran Umum Sistem Jaringan JDU-JDP Sub-WP 1B dan 1C .....	67
	4.1.1 Karakteristik Teknis dan Desain Pipa .....	67
	4.1.2 Parameter Hidraulik Dasar .....	71
	4.2. Hasil Simulasi <i>Water Hammer</i> dengan Bentley Hammer .....	74
	4.2.1 Pengaturan Skenario Simulasi.....	74

4.2.2 Hasil Simulasi: Pengaruh Variasi Kecepatan Penutupan <i>Valve</i> terhadap Tekanan Puncak.....	78
4.2.3 Distribusi Tekanan Akibat Penutupan Katup Cepat.....	86
4.2.4 Profil Gelombang Tekanan pada Titik Pengukuran .....	87
4.3. Analisis Hasil Simulasi terhadap Variasi Waktu Penutupan Katup .....	91
4.3.1 Perbandingan Tekanan Puncak.....	91
4.3.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Waktu Penutupan Katup terhadap Lonjakan Tekanan Puncak.....	93
4.3.3 Perubahan Tekanan Sepanjang Pipa.....	94
4.3.4 Identifikasi Titik Rawan.....	96
4.3.5 Evaluasi Model Simulasi dan Keakuratan Hasil.....	97
4.4. Interpretasi Fisik Terkait Fenomena Transien .....	99
4.4.1 Hubungan Dengan Kecepatan Gelombang ( <i>Wavespeed</i> )... ..	99
4.4.2 Validitas Simulasi dengan Persamaan Joukowsky .....	101
4.4.3 Peran Gelombang Tekanan dalam Dinamika Aliran.....	103
4.5. Evaluasi Keamanan Sistem Pipa Berdasarkan Batas Kecepatan Penutupan Katup yang Aman.....	104
4.5.1 Dampak Jangka Panjang terhadap Sistem Pipa .....	104
4.6. Rekomendasi Operasional Dan Proteksi Teknis .....	106
4.6.1 Rekomendasi Waktu Penutupan <i>Valve</i> .....	106
4.6.2 Rekomendasi Mitigasi Tambahan.....	107
4.6.3 Pemantauan dan Sistem Kontrol .....	110
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	<b>112</b>
5.1. Kesimpulan.....	112
5.2. Saran.....	113
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>115</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>119</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Skema Mekanisme <i>Water Hammer</i> .....	15
<b>Gambar 2. 2</b> Grafik Profil Tekanan .....	18
<b>Gambar 2. 3</b> Grafik Profil Tekanan dengan Sistem Proteksi .....	19
<b>Gambar 2. 4</b> Pengaruh Hukum Penutupan Katup Berdasarkan Waktu Penutupan $t^*$ = 31,25 terhadap <i>Water Hammer</i> : (a) <i>Closing Law</i> II; (B) <i>Closing Law</i> IV .....	33
<b>Gambar 2. 5</b> Kurva Variasi <i>Water Hammer</i> Dengan Waktu Penutupan Katup: (a) $t^* = 31.25$ ; (b) $t^* = 97.35$ ; (c) $t^* = 125$ .....	37
<b>Gambar 3. 1</b> Peta Lokasi Penelitian SPAM Sepaku Sub-WP 1B dan 1C .....	45
<b>Gambar 3. 2</b> Peta Jaringan Pipa Distribusi SPAM Sepaku Sub-WP 1B dan 1C .	46
<b>Gambar 3. 3</b> Peta Master Plan JDU JDP 1B dan 1C SPAM Sepaku .....	48
<b>Gambar 3. 4</b> Hasil Analisis Hidrolis <i>Layout</i> Jaringan Distribusi Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku (Pemodelan EPANET) .....	49
<b>Gambar 3. 5</b> Alur Penelitian .....	56
<b>Gambar 3. 6</b> Alur Metode Numerik Analisis Transien .....	63
<b>Gambar 4. 1</b> <i>Layout</i> Potongan Sistem Pipa .....	70
<b>Gambar 4. 2</b> Detail Komponen Cabang Pipa HDPE DN 160 mm .....	71
<b>Gambar 4. 3</b> Skema Sistem Jaringan Pipa JDU Sub-WP 1B dan 1C .....	72
<b>Gambar 4. 4</b> Profil Reservoir Induk <i>Inlet</i> 1B dan 1C .....	72
<b>Gambar 4. 5</b> Skema Penutupan <i>Valve</i> .....	76
<b>Gambar 4. 6</b> Kurva Penutupan Katup Transien 30 detik .....	79
<b>Gambar 4. 7</b> Grafik <i>Pressure</i> Hasil Analisis Simulasi 1 .....	80
<b>Gambar 4. 8</b> Kurva Penutupan Katup Transien 60 detik .....	82
<b>Gambar 4. 9</b> Grafik <i>Pressure</i> Hasil Analisis Simulasi 2 .....	82
<b>Gambar 4. 10</b> Kurva Penutupan Katup Transien 120 detik .....	84
<b>Gambar 4. 11</b> Grafik <i>Pressure</i> Hasil Analisis Simulasi 3 .....	85
<b>Gambar 4. 12</b> Grafik Pola Perubahan Gaya pada Penutupan <i>Valve</i> 30 Detik .....	88
<b>Gambar 4. 13</b> Grafik Pola Perubahan Gaya pada Penutupan <i>Valve</i> 60 Detik .....	89
<b>Gambar 4. 14</b> Grafik Pola Perubahan Gaya pada Penutupan <i>Valve</i> 120 Detik .....	90

**Gambar 4. 15** Profil Elevasi dan Distribusi Tekanan pada Sistem Perpipaan dengan Variasi Waktu Penutupan Katup..... 93

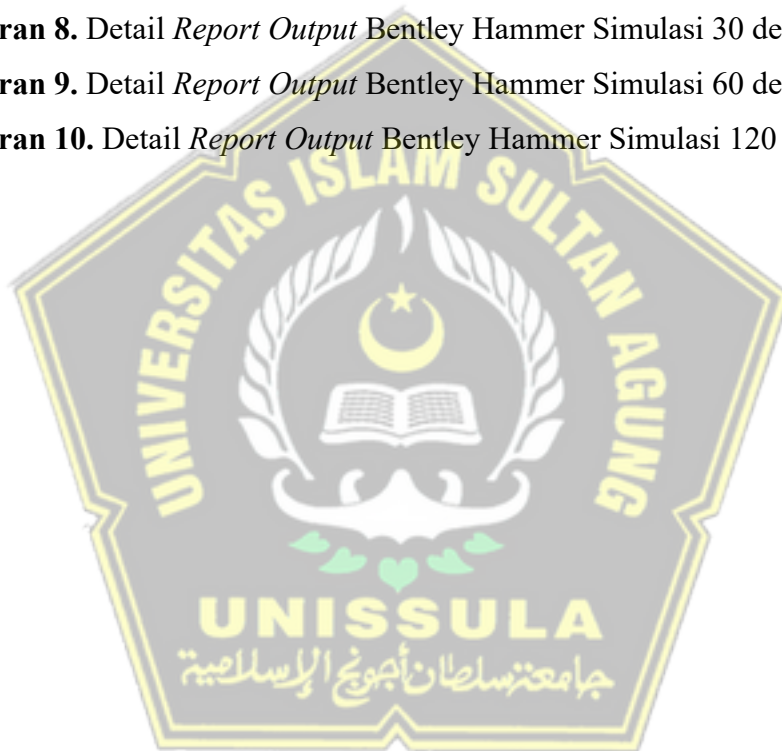


## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Elevasi dan Tekanan Statis .....	17
<b>Tabel 2. 2</b> Tabel Empiris Sifat Fisik Air pada Berbagai Suhu .....	30
<b>Tabel 2. 3</b> Penelitian Terdahulu .....	38
<b>Tabel 3. 1</b> Karakteristik Lokasi Penelitian.....	50
<b>Tabel 3. 2</b> Data Teknis dan Parameter Input Pemodelan Sistem Perpipaan .....	51
<b>Tabel 3. 3</b> Variabel Penelitian Kendali .....	54
<b>Tabel 3. 4</b> Skenario Penutupan Katup .....	59
<b>Tabel 4. 1</b> Spesifikasi Teknis Pipa <i>Steel</i> .....	68
<b>Tabel 4. 2</b> Spesifikasi Teknis Pipa HDPE.....	69
<b>Tabel 4. 3</b> Kriteria Desain dan Batasan Operasional.....	77
<b>Tabel 4. 4</b> Kurva Penutupan Katup Transien 30 detik.....	78
<b>Tabel 4. 5</b> Kurva Penutupan Katup Transien 60 detik.....	81
<b>Tabel 4. 6</b> Kurva Penutupan Katup Transien 120 detik.....	83
<b>Tabel 4. 7</b> Rekapitulasi Pressure Hasil Simulasi .....	86
<b>Tabel 4. 8</b> Ringkasan Pressure pada Tiap Variasi Waktu Penutupan Katup .....	92
<b>Tabel 4. 9</b> Hasil Perhitungan <i>Wave Speed</i> Tiap Jenis Pipa .....	100
<b>Tabel 4. 10</b> Kriteria pada Pipa <i>Steel</i> dan Pipa HDPE .....	101
<b>Tabel 4. 11</b> Perbandingan Tekanan Puncak pada Simulasi dan Persamaan Joukowsky.....	102

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b> Peta <i>Layout</i> Lokasi Penelitian.....	119
<b>Lampiran 2.</b> Peta Jaringan Pipa dan Aksesoris.....	120
<b>Lampiran 3.</b> <i>Layout</i> Pemasangan Pipa Area Persil RS Mayapada.....	121
<b>Lampiran 4.</b> Detail Aksesoris .....	122
<b>Lampiran 5.</b> <i>Fitting</i> Pipa .....	123
<b>Lampiran 6.</b> Detail Chamber Persil.....	124
<b>Lampiran 7.</b> Detail Chamber Persil (2) .....	125
<b>Lampiran 8.</b> Detail <i>Report Output</i> Bentley Hammer Simulasi 30 detik .....	126
<b>Lampiran 9.</b> Detail <i>Report Output</i> Bentley Hammer Simulasi 60 detik .....	127
<b>Lampiran 10.</b> Detail <i>Report Output</i> Bentley Hammer Simulasi 120 detik .....	128



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Perencanaan sistem jaringan perpipaan merupakan salah satu aspek penting dalam pengelolaan air, baik untuk kebutuhan distribusi domestik maupun industri. Kompleksitas sistem ini mencakup tantangan teknis, ekonomi, dan sosial yang harus dipertimbangkan secara matang. Dalam praktiknya, sistem perpipaan tidak hanya berfungsi sebagai media transportasi fluida, tetapi juga menjadi komponen vital yang menunjang keberlangsungan sistem produksi maupun distribusi. Misalnya, pada instalasi jaringan air bersih, sistem perpipaan dirancang untuk mengalirkan air dari sumber ke titik distribusi dengan memperhitungkan jarak, elevasi, topografi, material pipa, hingga proyeksi kebutuhan air di masa mendatang. Oleh karena itu, perencanaan teknis yang tepat, termasuk pemodelan hidrolik dan evaluasi kondisi operasi, menjadi faktor penentu keandalan sistem.

Namun, fenomena hidraulik yang sering diabaikan dalam perencanaan adalah *water hammer* atau pukulan air, yang dapat menimbulkan kerusakan serius pada sistem perpipaan. *Water hammer* merupakan lonjakan tekanan drastis yang terjadi akibat perubahan mendadak kecepatan aliran fluida, misalnya karena penutupan katup secara cepat, kegagalan pompa, perubahan arah aliran, maupun adanya udara yang terperangkap di dalam pipa (American Water Works Association, 2001). Fenomena ini menghasilkan gelombang kejut yang merambat dengan kecepatan suara, memberikan pukulan kuat pada dinding pipa dari dalam. Kondisi tersebut dapat mengakibatkan kebocoran, pecahnya pipa, bahkan kegagalan sistem distribusi secara total. Mengabaikan aspek ini dalam perencanaan dan operasi akan menimbulkan konsekuensi biaya perbaikan yang tinggi, gangguan layanan, hingga risiko kecelakaan kerja.

Studi-studi terdahulu menegaskan bahwa fenomena *water hammer* merupakan masalah yang tidak dapat dihindari sepenuhnya pada sistem pipa bertekanan. Menurut (Kubrak et al., 2021), sistem perpipaan selalu terekspos

pada kondisi aliran transien, sehingga strategi mitigasi menjadi fokus utama dalam penelitian maupun praktik. Peningkatan tekanan akibat *water hammer* tidak hanya berpotensi merusak jaringan pipa, tetapi juga dapat menciptakan tekanan negatif yang membahayakan operasi pembangkit listrik tenaga air (Li et al., 2025). Berbagai pendekatan telah diteliti, antara lain penggunaan perangkat pelindung seperti *surge tank*, tangki tekanan, serta penerapan hukum penutupan katup yang optimal untuk mengendalikan lonjakan tekanan (Bazargan-Lari et al., 2013; Wan & Li, 2016; J. Zhou et al., 2017).

Waktu penutupan katup menjadi salah satu faktor paling signifikan yang memicu terjadinya *water hammer*. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa waktu kecepatan penutupan katup berkorelasi erat dengan besarnya tekanan puncak yang terjadi. (Kodura, 2016), melalui studi eksperimental pada pipa baja dan polietilen, menemukan bahwa penutupan mendadak menghasilkan tekanan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan penutupan bertahap. (E. Yao et al., 2015) juga mengonfirmasi bahwa semakin cepat katup ditutup, semakin besar tekanan *water hammer* yang muncul. Temuan ini diperkuat oleh (Cao et al., 2022), yang menekankan pentingnya hukum penutupan nonlinier optimal dalam merancang strategi penutupan katup secara *real-time* untuk meredam gelombang tekanan. Dengan demikian, kecepatan dan karakteristik waktu penutupan katup memainkan peran sentral dalam pengendalian fenomena transien ini.

Seiring berkembangnya teknologi komputasi, metode numerik seperti *Method of Characteristics* (MOC) digunakan secara luas untuk mensimulasikan dinamika *water hammer* pada berbagai kondisi material dan dimensi pipa (Kodura, 2016; Tijsseling, 2007). Namun, penelitian eksperimental tetap diperlukan untuk memvalidasi model matematis dengan kondisi nyata di lapangan. Misalnya, studi (Miji Cherian et al., 2022) berfokus pada evaluasi pengaruh waktu penutupan katup terhadap terjadinya kavitasi selama aliran transien, menunjukkan bahwa fenomena tekanan ekstrem tidak hanya dipengaruhi oleh kecepatan aliran, tetapi juga interaksi kompleks antara durasi penutupan, sifat fluida, serta kondisi operasi.

Dengan mempertimbangkan berbagai temuan tersebut, jelas bahwa kecepatan waktu penutupan katup merupakan faktor krusial yang menentukan tingkat keparahan *water hammer*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan waktu penutupan katup terhadap tekanan puncak *water hammer* pada sistem perpipaan distribusi air. Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi perencanaan dan pengoperasian jaringan perpipaan, khususnya dalam merancang prosedur penutupan katup yang aman dan efektif, sehingga keandalan sistem distribusi air dapat ditingkatkan serta risiko kerusakan infrastruktur dapat diminimalkan.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang, permasalahan yang akan dianalisis dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

- a. Bagaimana pengaruh kecepatan waktu penutupan katup (*valve*) terhadap besarnya pukulan air atau lonjakan tekanan (*water hammer*) yang terjadi pada sistem pipa?
- b. Berapa besar lonjakan tekanan maksimum ( $\Delta P$ ) akibat variasi waktu penutupan katup (30 s, 60 s, 120s) pada pipa HDPE DN160 mm di area persil?
- c. Bagaimana menentukan waktu penutupan katup yang paling optimal untuk meminimalkan terjadinya lonjakan tekanan (*water hammer*) tanpa mengurangi efisiensi operasional sistem perpipaan?
- d. Apa saja langkah mitigasi umum yang dapat diterapkan untuk mengurangi risiko *water hammer* pada sistem distribusi air?

## 1.3. Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus dan konsistensi penelitian, maka ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

- a. Objek penelitian berupa model sistem jaringan perpipaan distribusi air pada Jaringan Distribusi Utama (JDU) Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku yang berlokasi di Persil RS Mayapada.

- b. Analisis dilakukan dengan metode simulasi numerik menggunakan perangkat lunak khusus analisis aliran transien, yaitu Bentley Hammer.
- c. Fluida kerja yang digunakan adalah air dengan asumsi properti fisik (massa jenis, viskositas, dan modulus elastisitas) bersifat konstan (*inkompresibel*).
- d. Variasi yang dianalisis meliputi beberapa kecepatan waktu penutupan katup, yaitu 30 detik, 60 detik, dan 120 detik.

#### 1.4. Keaslian Penelitian

Fenomena *water hammer* pada sistem perpipaan telah banyak diteliti oleh para peneliti sebelumnya. Misalnya, (Kodura, 2016) meneliti pengaruh kecepatan waktu penutupan katup terhadap lonjakan tekanan pada pipa baja dan polietilen melalui uji eksperimental. (E. Yao et al., 2015) juga menunjukkan bahwa semakin cepat katup ditutup, maka semakin besar tekanan transien yang dihasilkan. Sementara itu, (Cao et al., 2022) mengembangkan model hukum penutupan nonlinier untuk merancang strategi pengendalian penutupan katup secara *real time*.

Penelitian-penelitian tersebut memberikan kontribusi penting, namun umumnya masih terbatas pada kondisi laboratorium atau pada model perpipaan dengan parameter yang spesifik. Belum banyak kajian yang secara langsung mengaitkan variasi waktu penutupan katup dengan sistem distribusi air bersih berskala proyek aktual, khususnya menggunakan perangkat lunak simulasi numerik yang mampu memodelkan kondisi lapangan dengan lebih detail.

Oleh karena itu, penelitian ini memiliki keaslian dalam hal penerapan analisis pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap tekanan puncak *water hammer* pada model Jaringan Distribusi Utama (JDU) Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku. Pendekatan yang digunakan adalah simulasi numerik dengan perangkat lunak Bentley Hammer, serta memfokuskan pada variasi kecepatan penutupan (30, 60, dan 120 detik) untuk menentukan batas waktu optimal penutupan katup. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengisi celah kajian sebelumnya sekaligus memberikan kontribusi praktis bagi pengelolaan sistem distribusi air bersih.

### 1.5. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a. Menganalisis secara numerik hubungan antara kecepatan waktu penutupan katup dengan tekanan puncak *water hammer*.
- b. Mengukur lonjakan tekanan maksimum ( $\Delta P$ ) akibat variasi waktu penutupan katup dalam simulasi.
- c. Menentukan batas kecepatan waktu penutupan katup yang aman bagi sistem perpipaan yang dikaji sehingga dapat dijadikan dasar rekomendasi operasional.
- d. Menyusun rekomendasi operasional guna mitigasi risiko *water hammer* dengan mempertimbangkan faktor kecepatan penutupan katup (*valve*).

### 1.6. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

- a. Manfaat Akademis: Menambah referensi dalam bidang teknik hidrolika, khususnya terkait pengaruh variabel kecepatan penutupan katup pada analisis transien hidrolik.
- b. Manfaat Praktis: Memberikan acuan bagi pengelola sistem perpipaan (seperti PDAM atau operator PLTA) dalam menyusun prosedur operasi standar (SOP) yang lebih aman dan adaptif, sehingga dapat menekan risiko kerusakan infrastruktur serta menurunkan biaya perawatan jangka panjang.

### 1.7. Sistematika Penulisan

Struktur penulisan laporan ini disusun dengan tujuan agar pembaca serta pihak-pihak terkait dapat dengan mudah memahami isi laporan. Berikut adalah sistematika penulisan laporan yang digunakan:

## BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, serta sistematika penulisan yang digunakan dalam laporan ini.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini menyajikan kajian literatur dan penelitian terdahulu yang relevan dengan topik yang diteliti. Studi tersebut akan dikembangkan menjadi landasan teori yang digunakan untuk menjawab permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini.

## **BAB III METODE PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan secara rinci mengenai jenis penelitian, sampel yang digunakan, teknik pengumpulan data, variabel yang diteliti beserta cara pengukuran, serta metode yang digunakan dalam analisis data.

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

Pada bab ini dipaparkan hasil penelitian yang diperoleh melalui pengolahan dan analisis data. Selain itu, juga dibahas hubungan antara temuan penelitian dengan teori atau penelitian sebelumnya, yang bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai permasalahan yang diteliti.

## **BAB V PENUTUP**

Bab ini menyajikan kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan memberikan saran yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan penelitian di masa depan atau penerapan praktis berdasarkan temuan yang ada.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN KERANGKA TEORI

#### 2.1. Sistem Perpipaan Distribusi Air

Sistem perpipaan distribusi air merupakan salah satu infrastruktur vital yang berfungsi menyalurkan air bersih dari sumber atau Instalasi Pengolahan Air (IPA) hingga sampai ke konsumen akhir. Dalam konteks penyediaan air minum, sistem ini harus mampu menjamin terpenuhinya aspek kuantitas, kualitas, serta kontinuitas pasokan agar kebutuhan masyarakat di berbagai sektor baik domestik, komersial, maupun industri dapat terpenuhi secara andal. Karena itu, perencanaan dan pengoperasian jaringan distribusi harus selalu berlandaskan pada kriteria teknis, hidraulis, serta standar keselamatan yang berlaku, agar sistem dapat berfungsi optimal dalam jangka panjang (SNI 7831:2012; SNI 39:2024 (BSN, 2012, 2024)).

Menurut SNI 7831:2012 tentang Sistem Penyediaan Air Minum, jaringan distribusi air dirancang dengan tujuan menjaga ketersediaan pasokan air yang berkesinambungan, baik dari sisi kualitas, kuantitas, maupun tekanan. Aspek ini mencakup tidak hanya kemampuan teknis jaringan yang meliputi pemilihan material pipa, perhitungan hidraulika, dan konfigurasi jalur, tetapi juga aspek operasional seperti pengaturan tekanan dan pemeliharaan kualitas air, serta aspek keandalan yang berkaitan dengan kemampuan sistem dalam menghadapi gangguan, termasuk fenomena hidraulis transien seperti lonjakan tekanan.

Secara umum, sistem distribusi air terdiri atas tiga kelompok elemen utama. Pertama, pipa utama yang berfungsi sebagai saluran transmisi maupun distribusi. Kedua, komponen pengendali seperti katup, pompa, dan tangki tekanan, yang berperan menjaga kestabilan dan keteraturan aliran. Ketiga, perlengkapan pelindung seperti *surge tank*, *pressure relief valve*, dan *air chamber*, yang dirancang untuk meminimalkan risiko kerusakan akibat perubahan tekanan mendadak (Chaudhry, 2014). Seluruh komponen ini bekerja bersama untuk memastikan air tetap mengalir dengan tekanan positif yang

cukup, bahkan hingga ke konsumen yang berada pada wilayah dengan elevasi lebih tinggi.

. Pemilihan material pipa merupakan faktor teknis yang krusial dalam menentukan performa sistem distribusi air. Dalam analisis ini, pipa HDPE 160 mm digunakan untuk menganalisis potensi *water hammer* yang dapat terjadi dalam sistem distribusi air. Meskipun pipa HDPE lebih fleksibel dibandingkan dengan pipa baja, kemampuannya untuk meredam dampak transien seperti *water hammer* masih menjadi perhatian. Pipa HDPE memiliki keuntungan dalam menyerap sebagian energi lonjakan tekanan berkat fleksibilitasnya, tetapi juga rentan terhadap deformasi jika tekanan yang dihasilkan terlalu besar. Oleh karena itu, meskipun pipa HDPE dapat mengurangi efek dari fluktuasi tekanan, perhitungan yang cermat terhadap potensi *water hammer* tetap diperlukan untuk memastikan keandalan dan daya tahan jangka panjang sistem.

Dari perspektif hidraulika, perancangan sistem distribusi air didasarkan pada prinsip kontinuitas aliran serta persamaan energi. Perhitungan harus mempertimbangkan adanya kehilangan energi (*headloss*) akibat gesekan dalam pipa, perubahan arah aliran, maupun perubahan diameter saluran. Secara umum, kondisi operasi normal menjaga tekanan berada dalam kisaran 10–100 meter kolom air (mka) sesuai dengan standar teknis penyediaan air minum (Permen PUPR No. 27/PRT/M/2016). Namun, pada kondisi tertentu, seperti penutupan katup secara tiba-tiba atau berhentinya pompa secara mendadak, dapat terjadi peningkatan tekanan ekstrem yang dikenal sebagai fenomena *water hammer*. Kondisi ini perlu diperhitungkan secara serius dalam perencanaan maupun operasional sistem, karena berpotensi merusak infrastruktur jika tidak diantisipasi dengan baik.

### **2.1.1 Komponen Jaringan Distribusi Air**

Sistem jaringan distribusi air merupakan tulang punggung penyediaan air minum, yang berfungsi memastikan air dari Instalasi Pengolahan Air (IPA) atau sumber utama dapat sampai ke konsumen dengan kuantitas, kualitas, dan kontinuitas yang sesuai standar pelayanan. Menurut SNI 39:2024 tentang Perencanaan Sistem Penyediaan Air Minum, jaringan distribusi air dapat dibagi

ke dalam tiga tingkatan utama, yaitu jaringan transmisi, jaringan distribusi utama (JDU), serta jaringan distribusi sekunder dan tersier (JDS/JDT).

**a. Jaringan Transmisi**

Jaringan transmisi berfungsi menyalurkan air dari IPA atau sumber utama menuju reservoir distribusi. Pipa pada jaringan ini umumnya berdiameter besar, dirancang untuk menahan tekanan relatif tinggi, serta menggunakan material yang memiliki ketahanan mekanis tinggi, seperti baja atau *ductile iron*. Karena perannya sebagai penghubung dari sumber ke pusat distribusi, keandalan transmisi menjadi aspek krusial agar kontinuitas suplai tetap terjaga (Walski et al., 2003).

**b. Jaringan Distribusi Utama (JDU)**

JDU dapat diibaratkan sebagai tulang punggung dari sistem distribusi air. Jaringan ini menyalurkan air dari reservoir ke wilayah pelayanan dan harus mampu mengalirkan air dengan stabil, meskipun terjadi perubahan kondisi operasi. Pipa yang digunakan biasanya terbuat dari baja, *ductile iron*, atau HDPE yang memiliki ketahanan tinggi terhadap tekanan menengah hingga tinggi. Keberadaan JDU sangat strategis karena menjadi jalur utama yang memastikan kontinuitas distribusi ke berbagai sektor layanan (Chaudhry, 2014).

**c. Jaringan Distribusi Pembagi (JDP)**

Jaringan pembagi berfungsi menyalurkan air dari JDU ke tingkat konsumen akhir, baik rumah tangga maupun industri. Pipa pada jaringan ini berdiameter lebih kecil dan bekerja pada tekanan operasi lebih rendah dibandingkan JDU. Meskipun demikian, keandalan tetap menjadi syarat utama, terutama untuk meminimalkan kehilangan air atau *non-revenue water* yang dapat mengurangi efisiensi layanan.

Selain dibedakan berdasarkan tingkatan distribusi, sistem jaringan air juga dilengkapi dengan sejumlah komponen pendukung yang berperan dalam menjaga kinerja dan stabilitas hidraulis, antara lain:

### **a. Pipa**

Sebagai elemen utama penyalur air, pipa harus memenuhi standar terkait dimensi, kekuatan, serta ketahanan terhadap tekanan transien. Pada JDU, material yang umum digunakan adalah baja, *ductile iron*, dan HDPE karena sifat mekanisnya yang mampu menahan beban internal maupun eksternal (Kodura, 2016).

### **b. Pompa**

Pompa berfungsi menambah energi ke dalam sistem, sehingga dapat mengatasi kehilangan tekanan akibat gesekan maupun perbedaan elevasi. Keberadaan pompa juga berpengaruh besar terhadap fenomena transien, karena operasi *start-up* maupun *shut-down* dapat memicu perubahan tekanan yang signifikan (Walski et al., 2003).

### **c. Reservoir**

Reservoir, baik berupa *ground tank* maupun *elevated tank*, berfungsi sebagai penyeimbang antara suplai dan kebutuhan air. Selain itu, reservoir juga membantu menjaga stabilitas tekanan jaringan agar tetap berada dalam rentang yang diizinkan, serta menyediakan cadangan air untuk kondisi darurat.

### **d. Katup**

Katup berperan penting dalam pengaturan aliran, pembagian distribusi, serta perlindungan sistem terhadap kondisi abnormal. Jenis katup yang umum digunakan antara lain *gate valve*, *butterfly valve*, dan *pressure reducing valve*. Operasi katup yang tidak tepat, terutama penutupan mendadak, dapat memicu terjadinya lonjakan tekanan atau *water hammer* (A.R David, 2004). Dalam sistem distribusi modern, *Automatic Control Valve* menjadi sangat krusial karena katup otomatis ini dapat mengatur laju aliran, tekanan, atau level air secara presisi sesuai sinyal dari sistem kontrol. Katup ini umumnya dilengkapi dengan aktuator elektrik/hidrolik dan sensor. Untuk monitoring kinerja dan aliran aktual, digunakan *pulse flow meter*, yang dapat terintegrasi dengan sistem SCADA atau data *logger*. Kombinasi kontrol otomatis dan monitoring

*real-time* ini penting pada sistem distribusi modern agar operasi katup tetap stabil, mengurangi risiko *water hammer*, dan memastikan data aliran terekam dengan baik.

Dengan memahami setiap komponen beserta perannya, perencana sistem distribusi air dapat merancang jaringan yang tidak hanya efisien dan ekonomis, tetapi juga tangguh menghadapi berbagai kondisi operasi, termasuk fenomena hidraulis transien.

### **2.1.2 Material Pipa Distribusi Air**

Pemilihan material pipa merupakan salah satu faktor yang sangat menentukan kinerja, keandalan, dan umur layanan sistem distribusi air. Material yang digunakan tidak hanya harus memenuhi persyaratan kekuatan mekanis, tetapi juga harus mampu beradaptasi terhadap kondisi operasi yang dinamis, termasuk adanya fluktuasi tekanan dan potensi terjadinya aliran transien.

Di antara berbagai material pipa yang digunakan dalam jaringan distribusi air di lokasi penelitian, pipa HDPE 160 mm adalah pipa yang menjadi objek utama dalam analisis *water hammer*. Dalam sistem ini, pipa HDPE dengan diameter 160 mm digunakan untuk pipa persil yang mengalirkan air ke berbagai titik di area distribusi. Meskipun pipa HDPE memiliki keuntungan dalam hal fleksibilitas yang membantu meredam efek transien seperti *water hammer*, pipa ini tetap rentan terhadap deformasi atau pemanjangan jika terjadi lonjakan tekanan yang besar. Oleh karena itu, meskipun pipa HDPE lebih baik dalam menyerap sebagian energi lonjakan tekanan dibandingkan pipa baja, penting untuk menghitung dan menganalisis potensi *water hammer* pada pipa persil ini untuk memastikan keandalan sistem dalam jangka panjang. Dalam penelitian ini, pipa persil dengan diameter 160 mm yang terhubung dengan pipa utama memiliki potensi yang perlu dianalisis lebih mendalam, mengingat dampak dari perubahan tekanan mendadak yang dapat terjadi pada titik distribusi tersebut.

Dalam konteks regulasi nasional, penggunaan pipa HDPE untuk sistem distribusi air, termasuk untuk analisis *water hammer*, juga mengacu pada

standar yang relevan, seperti SNI 06-2428-1991 untuk pipa HDPE yang digunakan dalam jaringan perpipaan. Standar ini menetapkan ketentuan mengenai dimensi, ketebalan dinding, tekanan kerja maksimum, serta metode uji kebocoran dan kekuatan hidrostatis pada pipa HDPE. Penerapan standar ini bertujuan untuk memastikan bahwa perencanaan dan instalasi jaringan pipa tetap memenuhi aspek keamanan, keandalan, serta efisiensi dalam menghadapi fenomena transien seperti *water hammer*. Meskipun pipa HDPE memiliki fleksibilitas yang lebih tinggi dan dapat meredam dampak lonjakan tekanan, penerapan standar yang tepat sangat penting untuk meminimalkan risiko deformasi atau kerusakan pada pipa akibat lonjakan tekanan yang berlebihan.

### **2.1.3 Prinsip Hidraulika Distribusi Air**

Dalam perencanaan jaringan distribusi air, asumsi yang sering digunakan adalah aliran berada pada kondisi *steady flow*, yaitu laju aliran konstan terhadap waktu. Namun, kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa sistem distribusi tidak selalu berada pada kondisi ideal tersebut. Perubahan operasi seperti pembukaan dan penutupan katup, pengaktifan maupun penghentian pompa, serta keberadaan udara yang terperangkap dalam pipa dapat menimbulkan fenomena aliran tak tunak (transien) yang berpotensi menimbulkan lonjakan tekanan (*water hammer*) atau bahkan penurunan tekanan mendadak (*cavitation*) (Chaudhry, 2014; Wylie & Streeter, 1993).

Untuk memahami perilaku aliran dalam sistem distribusi air, analisis hidraulika digunakan sebagai dasar evaluasi. Analisis ini tidak hanya membantu dalam menentukan kapasitas pipa dan diameter yang sesuai, tetapi juga penting untuk menilai risiko tekanan berlebih yang dapat mengancam integritas sistem perpipaan (A.R David, 2004; Meniconi et al., 2012)

Dua persamaan fundamental yang menjadi acuan utama dalam kajian ini adalah sebagai berikut:

## 1. Persamaan Kontinuitas

$$Q = v \cdot A \quad (2.1)$$

dengan:

$Q$  = debit aliran (m<sup>3</sup>/s)

$v$  = kecepatan aliran (m/s)

$A$  = luas penampang pipa (m<sup>2</sup>)

Persamaan ini menegaskan bahwa debit aliran bergantung langsung pada kecepatan aliran dan luas penampang pipa. Dalam konteks distribusi air, persamaan kontinuitas memastikan bahwa air yang masuk ke sistem sama dengan air yang keluar, kecuali ada kehilangan akibat kebocoran atau penggunaan (Wan et al., 2019).

## 2. Persamaan Darcy–Weisbach untuk Kehilangan Energi Akibat Gesekan

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.2)$$

dengan:

$h_f$  = kehilangan energi akibat gesekan (m)

$f$  = faktor gesekan Darcy–Weisbach (tak berdimensi)

$L$  = panjang pipa (m)

$D$  = diameter pipa (m)

$v$  = kecepatan aliran (m/s)

$g$  = percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Persamaan ini digunakan untuk menghitung kehilangan energi yang disebabkan oleh gesekan antara air dan permukaan pipa. Faktor gesekan  $f$  tergantung pada bilangan Reynolds dan kekasaran relatif pipa. Analisis ini penting dalam perencanaan diameter pipa serta evaluasi kondisi tekanan internal, baik pada operasi normal maupun ketika sistem mengalami kondisi transien (Chaudhry, 2014; Colombo et al., 2002).

Dengan memahami kedua persamaan dasar ini, peneliti dapat memodelkan perilaku hidraulika jaringan distribusi secara lebih akurat, serta mengantisipasi risiko kerusakan akibat fenomena transien seperti *water hammer*. Hal ini sejalan dengan tujuan desain modern yang menekankan pada efisiensi hidraulika, keandalan distribusi, dan keberlanjutan infrastruktur.

## 2.2. Fenomena *Water Hammer*

*Water hammer* atau pukulan air merupakan salah satu fenomena hidraulik paling berbahaya dalam sistem perpipaan distribusi. Fenomena ini terjadi akibat penutupan atau pembukaan katup, penghentian pompa, perubahan arah aliran, atau adanya udara yang terjebak di dalam pipa, sehingga kecepatan aliran pada pipa berubah secara tiba-tiba. (American Water Works Association, 2001; Chaudhry, 2014). Lonjakan tekanan yang muncul merambat dalam bentuk gelombang kejut dengan kecepatan hampir setara kecepatan bunyi dalam fluida, sehingga dampaknya dapat menjalar ke seluruh sistem hanya dalam waktu singkat.

Secara mekanis, fenomena ini dijelaskan melalui **Persamaan Joukowsky**:

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V \quad (2.3)$$

dengan:

$\Delta P$  = lonjakan tekanan (Pa)

$\rho$  = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)

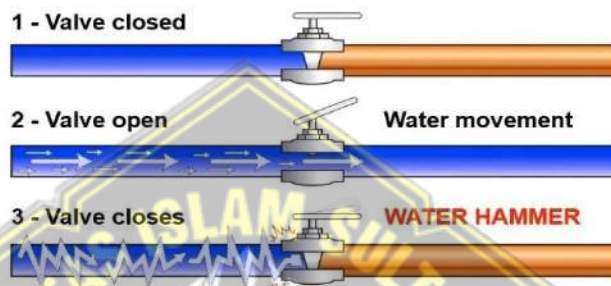
$c$  = kecepatan rambat gelombang (m/s)

$\Delta V$  = perubahan kecepatan fluida (m/s).

Persamaan ini menegaskan bahwa semakin besar perubahan kecepatan aliran dan semakin tinggi kecepatan rambat gelombang, maka lonjakan tekanan yang terjadi akan semakin besar. Pada pipa HDPE 160 mm, meskipun memiliki fleksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan pipa baja, kecepatan rambat gelombang cenderung lebih rendah. Namun, meskipun pipa HDPE lebih fleksibel dan dapat meredam sebagian energi dari lonjakan tekanan, perubahan

kecepatan aliran yang tiba-tiba masih dapat menyebabkan efek *water hammer* yang signifikan, terutama pada titik tertentu dalam jaringan distribusi. Oleh karena itu, perhitungan dan analisis terhadap potensi *water hammer* tetap sangat penting untuk memastikan keandalan sistem pipa HDPE dalam menghadapi fluktuasi tekanan mendadak (Kodura, 2016; Tijsseling, 2007).

Untuk memperjelas, **Gambar 2.1** dapat menampilkan skema mekanisme *water hammer*, yang memperlihatkan perubahan arah gelombang tekanan ketika katup ditutup secara tiba-tiba.



**Gambar 2.1** Skema Mekanisme *Water Hammer*

sumber: *Modo Pump*, 2022

Beberapa kondisi yang paling sering memicu terjadinya *water hammer* adalah:

1. Penutupan katup mendadak  
Faktor utama penyebab lonjakan tekanan. Han et al. (2022) melalui simulasi berbasis CFD menunjukkan bahwa semakin cepat penutupan katup, semakin besar tekanan puncak yang terjadi.
2. Kegagalan pompa  
Penghentian mendadak operasi pompa menimbulkan perubahan drastis pada kecepatan aliran balik, menghasilkan tekanan transien yang tinggi.
3. Perubahan arah aliran  
Pada belokan tajam atau sistem bercabang yang menyebabkan ketidakstabilan aliran.
4. Udara terjebak di dalam pipa  
Dapat memperbesar amplitudo gelombang tekanan dan memicu kavitasi.

Dampak dari fenomena ini sangat serius bagi sistem distribusi. Lonjakan tekanan dapat menyebabkan:

1. Pecahnya pipa atau kerusakan sambungan akibat tekanan berlebih,
2. Kavitasi, ketika tekanan turun di bawah tekanan atmosfer dan terbentuk gelembung uap yang mempercepat degradasi material,
3. Kerusakan pompa dan katup,
4. Berhentinya operasi sistem distribusi secara total, yang berimplikasi pada gangguan layanan air bersih (Lupa et al., 2022).

Selain menimbulkan lonjakan tekanan yang berbahaya, fenomena *water hammer* juga memiliki implikasi teknis yang dapat merusak integritas jaringan perpipaan. Salah satu dampak paling serius adalah kavitasi, yaitu terbentuknya gelembung uap ketika tekanan lokal turun di bawah tekanan uap jenuh air. Gelembung-gelembung ini dapat pecah secara tiba-tiba dan menghasilkan *micro-jet* yang mengikis permukaan dalam pipa maupun katup. Meskipun pipa HDPE 160 mm lebih fleksibel dan dapat meredam sebagian dampak transien, fenomena kavitasi tetap dapat terjadi jika lonjakan tekanan sangat besar. Studi oleh (Wylie & Streeter, 1993) menunjukkan bahwa kavitasi berulang dapat mempercepat degradasi material, dan meskipun pipa HDPE lebih tahan terhadap korosi dibandingkan dengan pipa baja, fenomena ini masih dapat menyebabkan deformasi atau kerusakan pada pipa dan sambungannya. Oleh karena itu, analisis terhadap potensi kavitasi pada pipa HDPE sangat penting untuk memastikan keandalan dan daya tahan jangka panjang sistem distribusi.

Dampak berikutnya adalah kerusakan sambungan (*joint failure*). Lonjakan tekanan transien yang terjadi secara berulang-ulang dapat melemahkan komponen sambungan, seperti gasket, baut, maupun las. (Bergant et al., 2006) melaporkan bahwa kegagalan sambungan merupakan salah satu penyebab utama kebocoran besar di jaringan distribusi perkotaan yang mengalami *water hammer*.

Selain itu, tekanan berlebih juga berkontribusi terhadap kebocoran (*leakage*), terutama pada pipa tua yang sudah memiliki retakan mikro. Lonjakan transien memperbesar retakan ini, sehingga meningkatkan kehilangan air (*non-revenue water*). (Colombo et al., 2002) menegaskan bahwa

selain memperburuk kebocoran, *water hammer* juga menambah biaya energi akibat meningkatnya frekuensi pompa bekerja untuk mengganti air yang hilang.

Sejalan dengan itu, penelitian terbaru banyak menekankan strategi mitigasi melalui pengaturan kurva penutupan katup. (Cao et al., 2022) mengembangkan metode penutupan katup optimal yang terbukti lebih efektif dalam mengurangi lonjakan tekanan dibandingkan metode linear konvensional. Penelitian ini menegaskan bahwa strategi pengendalian operasi katup memiliki peranan penting dalam mengurangi risiko *water hammer* pada jaringan distribusi air. Namun demikian, proteksi mekanis tetap penting, karena studi-studi terbaru menunjukkan bahwa kombinasi strategi operasional dengan perlindungan mekanis seperti *surge tank* memberikan hasil paling efektif dalam meningkatkan keandalan sistem.

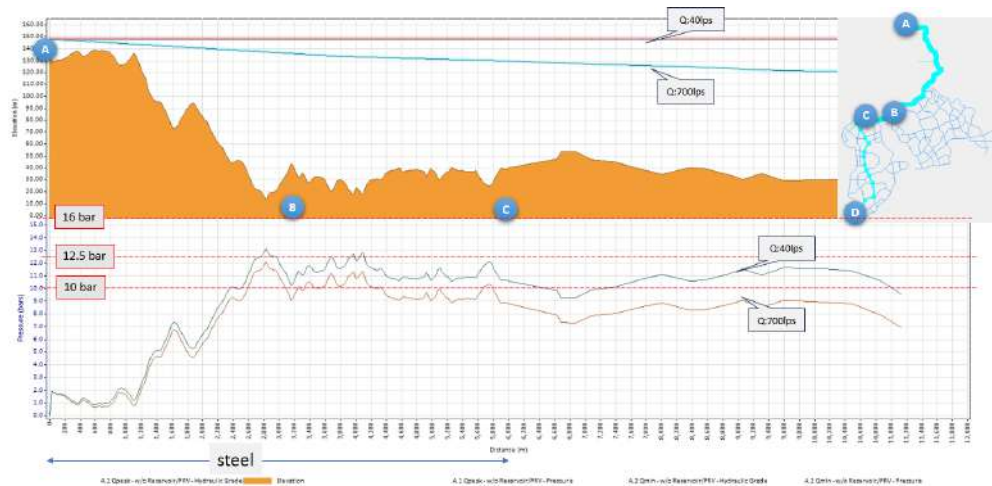
Perbedaan elevasi antara Reservoir Induk dan titik terendah trase transmisi berpotensi menghasilkan tekanan statis yang signifikan. Sebagai ilustrasi, Tabel 2.1 berikut menampilkan potensi tekanan statis pada beberapa titik jalur JDU berdasarkan data elevasi lapangan

**Tabel 2. 1** Elevasi dan Tekanan Statis

Lokasi	Elevasi (m)	Selisih (m)	Tekanan Statis (bar)
Reservoir Induk	+148	–	–
Trase transmisi terendah	+13.7	134	13.4
<i>Service area</i> 1B	+33	115	11.5
<i>Service area</i> 1C	+39.2	108.8	10.9

Sumber: Evaluasi Data Elevasi Hidrolis JDU 1B dan 1C

Distribusi tekanan sepanjang jalur pipa dapat dilihat pada **Gambar 2.2**, yang menunjukkan kenaikan tekanan seiring turunnya elevasi dari Reservoir Induk menuju titik terendah trase transmisi. Pola ini sesuai dengan prinsip hidraulika dasar, di mana tekanan statis akan meningkat sebanding dengan perbedaan tinggi kolom air ( $p = \rho \cdot g \cdot h$ ).

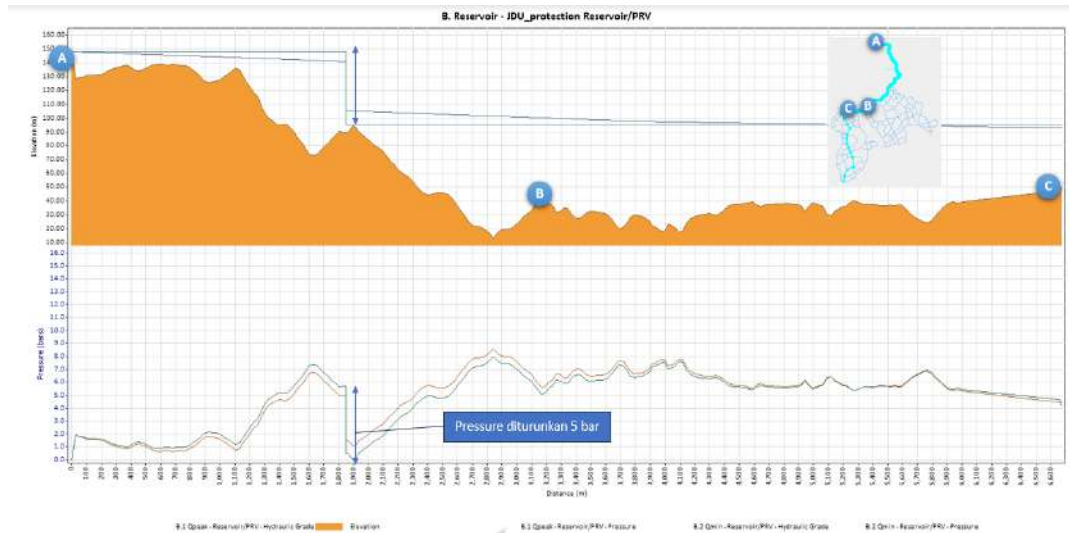


**Gambar 2.2** Grafik Profil Tekanan

Sumber: Evaluasi Data Elevasi Hidrolis JDU 1B dan 1C

Grafik ini juga menunjukkan adanya gradien tekanan yang cukup tajam pada beberapa titik perubahan elevasi, yang menandakan lokasi dengan risiko besar terhadap terjadinya tekanan transien bila terjadi perubahan operasi mendadak, seperti penutupan katup secara cepat atau kegagalan pompa. Karakteristik ini sangat penting untuk dipertimbangkan dalam desain dan operasi sistem, karena kombinasi antara tekanan statis tinggi dan tekanan dinamis akibat *water hammer* dapat menghasilkan lonjakan tekanan melebihi kemampuan pipa baja, yang pada akhirnya meningkatkan risiko kebocoran, pecah pipa, atau kerusakan sambungan.

Sebagai ilustrasi, **Gambar 2.3** berikut memperlihatkan sistem pipa dengan perangkat perlindungan *water hammer* yaitu *pressure relief valve* (PRV), yang mampu menurunkan lonjakan tekanan transien secara signifikan.



**Gambar 2.3** Grafik Profil Tekanan dengan Sistem Proteksi

Sumber: Evaluasi Data Elevasi Hidrolis JDU 1B dan 1C

Dari berbagai uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa *water hammer* merupakan fenomena kompleks yang dipicu oleh perubahan mendadak kecepatan aliran dan berdampak serius terhadap sistem distribusi. Dengan memahami profil tekanan sepanjang jalur pipa, operator sistem dapat mengidentifikasi segmen-segmen yang memerlukan perangkat proteksi seperti *surge tank*, *pressure relief valve* (PRV), atau pengaturan kecepatan penutupan katup yang lebih terkendali, guna meminimalkan dampak *water hammer* pada sistem distribusi air. Oleh karena itu, fokus penelitian diarahkan pada analisis pengaruh waktu kecepatan penutupan katup terhadap tekanan puncak *water hammer* pada sistem perpipaan distribusi air, sehingga hasilnya dapat memberikan kontribusi praktis dalam penyusunan strategi operasional dan desain perlindungan jaringan perpipaan.

### 2.3. Kecepatan Gelombang Tekanan (*Wave Speed*)

Fenomena *water hammer* sangat erat kaitannya dengan kecepatan rambat gelombang tekanan (*wave speed*) dalam pipa. Gelombang tekanan merupakan bentuk energi yang merambat akibat perubahan mendadak kecepatan fluida, misalnya saat katup ditutup dengan cepat. Pemahaman mengenai kecepatan rambat gelombang menjadi penting karena besarnya lonjakan tekanan tidak

hanya bergantung pada karakteristik fluida, tetapi juga pada material pipa yang digunakan.

Adapun kecepatan rambat gelombang ( $c$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Kodura, 2016; Tijsseling, 2007):

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho(1 + \frac{KD}{Ee})}} \quad (2.4)$$

dengan:

$K$  = modulus bulk fluida (Pa),

$\rho$  = densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ ),

$D$  = diameter dalam pipa (m),

$E$  = modulus elastisitas material pipa (Pa),

$e$  = tebal dinding pipa (m).

Persamaan ini memperlihatkan bahwa selain sifat fluida, karakteristik material pipa berpengaruh langsung terhadap kecepatan rambat gelombang. Pipa HDPE 160 mm, yang memiliki modulus elastisitas lebih rendah dibandingkan pipa baja (sekitar 200 GPa), menghasilkan kecepatan rambat gelombang yang lebih rendah. Kecepatan gelombang yang lebih rendah ini berarti *water hammer* pada pipa HDPE cenderung memiliki dampak yang lebih terkontrol dibandingkan pada pipa baja yang lebih kaku. Meskipun pipa HDPE lebih fleksibel dan mampu meredam sebagian energi lonjakan tekanan, fenomena *water hammer* tetap dapat menyebabkan deformasi pada pipa atau sambungannya jika terjadi perubahan tekanan yang mendalam (Kodura, 2016; Tijsseling, 2007).

Hasil penelitian (Sisiwanto Adi et al., 2014) menunjukkan bahwa kenaikan tekanan akibat *water hammer* secara signifikan meningkatkan tegangan pada sisi *discharge* pipa. Meskipun tegangan yang terjadi masih dapat ditoleransi, lonjakan tekanan yang melebihi batas yang diizinkan dapat menimbulkan risiko kegagalan struktural. Oleh karena itu, prosedur penutupan katup yang tepat sangat diperlukan agar sistem perpipaan tetap beroperasi dalam kondisi aman.

## 2.4. Model Matematis dan Analisis *Water Hammer*

Fenomena *water hammer* merupakan masalah transien hidrolis yang secara fundamental dikendalikan oleh hukum kekekalan massa dan momentum. Untuk memahami serta memprediksi besarnya lonjakan tekanan, digunakan berbagai pendekatan matematis yang dapat dibedakan menjadi model analitis, semi-analitis, dan model numerik berbasis simulasi komputer. Subbab ini membahas kerangka dasar analisis *water hammer* yang relevan dengan penelitian ini.

### 2.4.1 Persamaan Momentum dan Kontinuitas

Analisis fenomena *water hammer* berakar pada dua hukum dasar mekanika fluida, yaitu hukum kekekalan massa (kontinuitas) dan hukum momentum (Newton II) (Chaudhry, 2014; Wylie & Streeter, 1993). Kedua persamaan ini diformulasikan dalam bentuk persamaan diferensial parsial yang mampu menjelaskan dinamika aliran fluida di dalam pipa, khususnya pada kondisi transien akibat perubahan kecepatan aliran secara mendadak.

Menurut (Chaudhry, 2014), Persamaan momentum untuk aliran fluida dalam pipa dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + hf = 0 \quad (2.5)$$

dengan:

- v = kecepatan aliran (m/s)
- t = waktu (s)
- x = koordinat sepanjang pipa (m)
- P = tekanan fluida (Pa)
- $\rho$  = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $\theta$  = sudut kemiringan pipa terhadap horizontal (° atau rad)
- hf = kehilangan energi akibat gesekan (m/s<sup>2</sup>)

Persamaan ini menunjukkan bahwa perubahan kecepatan aliran fluida ( $\partial h/\partial t$ ) dipengaruhi oleh percepatan konvektif, gradien tekanan, gaya gravitasi, dan rugi energi akibat gesekan dinding pipa (Bergant et al., 2006; Wylie & Streeter, 1993). Dalam konteks *water hammer*, gradien tekanan mendominasi respon sistem, karena penutupan katup mendadak menghasilkan perubahan drastis distribusi tekanan sepanjang pipa.

Menurut (Chaudhry, 2014), untuk fluida inkompresibel dalam pipa, hukum kontinuitas dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + a^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

dengan:

h = tinggi tekanan (m)

a = kecepatan rambat gelombang (m/s)

v = kecepatan aliran (m/s)

Persamaan ini menyatakan bahwa perubahan tinggi tekanan ( $\partial h/\partial t$ ) berhubungan langsung dengan gradien kecepatan aliran sepanjang pipa (Ghidaoui et al., 2005). Artinya, ketika kecepatan fluida berubah mendadak (misalnya karena katup ditutup cepat), akan timbul fluktuasi tekanan yang merambat dengan kecepatan tertentu.

Selain formulasi dengan variabel kecepatan dan tekanan, fenomena aliran tak tunak pada sistem perpipaan juga dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan dasar dengan variabel *piezometric head* (H) dan debit aliran (Q). Formulasi ini banyak digunakan dalam pemodelan numerik *water hammer* karena lebih sesuai dengan pendekatan praktis di perangkat lunak teknik. Persamaan tersebut terdiri atas persamaan kontinuitas (kekekalan massa) dan persamaan momentum (kekekalan momentum), yang secara bersamaan membentuk sistem persamaan diferensial parsial untuk menggambarkan perilaku transien aliran (Chaudhry, 2014; Wylie & Streeter, 1993)

Persamaan kontinuitas menggambarkan bagaimana massa fluida tetap terjaga di dalam sistem. Untuk kondisi tak tunak, kontinuitas menyatakan bahwa perubahan *piezometric head* (H) terhadap waktu dipengaruhi oleh distribusi debit aliran (Q) sepanjang pipa:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

dengan:

H = piezometric head (m)

t = waktu (s)

a = kecepatan rambat gelombang (m/s)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

A = luas penampang pipa (m<sup>2</sup>)

Q = debit aliran (m<sup>3</sup>/s)

Persamaan ini menegaskan bahwa perubahan tekanan air (dinyatakan dalam *head*) pada suatu titik akan berbanding lurus dengan perubahan distribusi debit di sepanjang pipa. Dengan kata lain, semakin mendadak debit berubah (misalnya akibat penutupan katup), maka semakin besar pula fluktuasi tekanan yang dihasilkan.

Persamaan momentum menjelaskan keseimbangan gaya yang bekerja pada aliran fluida. Dalam konteks aliran tak tunak, persamaan ini dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + R(Q) = 0 \quad (2.8)$$

dengan:

H = piezometric head (m)

t = waktu (s)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

A = luas penampang pipa (m<sup>2</sup>)

Q = debit aliran (m<sup>3</sup>/s)

R(Q) = rugi gesek non-linear, umumnya dinyatakan sebagai:

$$R(Q) = \frac{fQ|Q|}{2gDA} \quad (2.9)$$

dengan:

f = *factor* gesekan Darcy-Weisbach

D = diameter pipa (m)

Persamaan ini menyatakan bahwa perubahan debit aliran  $\partial Q/\partial t$  bergantung pada gradien head  $\partial H/\partial x$  dan resistansi akibat gesekan dinding pipa. Dalam kondisi *water hammer*, gesekan berperan meredam amplitudo lonjakan tekanan, meskipun tidak sepenuhnya menghilangkan gelombang transien.

Gabungan persamaan momentum dan kontinuitas menghasilkan persamaan gelombang tekanan atau *water hammer wave equation* (Wylie & Streeter, 1993). Sistem ini berbentuk persamaan diferensial parsial yang kompleks sehingga jarang dapat diselesaikan secara analitis. Oleh karena itu, metode numerik seperti Metode Karakteristik (MOC) digunakan untuk memperoleh profil tekanan dan debit sepanjang pipa dalam domain ruang dan waktu. Inilah dasar teoritis yang menjelaskan terbentuknya gelombang transien yang merambat bolak-balik di sepanjang pipa ketika terjadi gangguan pada aliran (Bergant et al., 2006; Chaudhry, 2014). Analisis matematis inilah yang kemudian disederhanakan dalam Persamaan Joukowsky, yang secara khusus digunakan untuk memperkirakan lonjakan tekanan maksimum akibat penghentian aliran instan (Ghidaoui et al., 2005).

Dalam penelitian ini, fokus diberikan pada pengaruh waktu penutupan katup terhadap lonjakan tekanan. Persamaan momentum dan kontinuitas menjadi pondasi teoretis yang sangat penting karena dari sinilah dapat dijelaskan mengapa semakin cepat penutupan katup, semakin besar gradien kecepatan ( $\Delta v/\Delta t$ ) yang timbul (Chaudhry, 2014). Akibatnya, tekanan puncak ( $\Delta P$ ) yang dihitung melalui Persamaan Joukowsky juga semakin tinggi (Bergant et al., 2006). Kedua persamaan ini bukan hanya memberikan dasar matematis, tetapi juga berperan sebagai kerangka analisis dalam perangkat lunak Bentley Hammer yang digunakan untuk mengevaluasi variasi waktu penutupan katup terhadap tekanan puncak *water hammer*.

#### 2.4.2 Method of Characteristics / MOC

Metode Karakteristik (MOC) merupakan salah satu metode numerik paling banyak digunakan dalam analisis transien hidraulik atau fenomena *water hammer*. Prinsip utama dari metode ini adalah mentransformasikan persamaan diferensial parsial yang kompleks, yakni persamaan momentum dan kontinuitas menjadi bentuk yang lebih sederhana sepanjang dua garis karakteristik, yaitu  $C^+$  dan  $C^-$ . Transformasi ini menghasilkan persamaan:

$$\frac{dh}{dt} \pm \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (2.10)$$

dengan:

$h$  = tinggi tekanan (m)

$Q$  = debit aliran ( $m^3/s$ )

$A$  = luas penampang ( $m^2$ )

$a$  = kecepatan rambat gelombang (m/s)

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ).

Keunggulan MOC adalah kemampuannya memodelkan fenomena kompleks, seperti kavitasi, pemisahan kolom air (*column separation*), dan interaksi fluida-struktur yang sulit dianalisis dengan pendekatan analitis sederhana (Ghidaoui et al., 2005). Dalam konteks penelitian ini, MOC relevan karena mampu merepresentasikan secara detail bagaimana variasi kecepatan penutupan katup memengaruhi distribusi gelombang tekanan di sepanjang pipa.

Selain itu, MOC telah banyak diimplementasikan dalam perangkat lunak teknik modern seperti Bentley Hammer, AFT Impulse, dan SIMSEN, yang menjadi standar internasional dalam analisis transien. Penelitian oleh (Karadžić et al., 2014) menegaskan bahwa MOC merupakan metode yang paling stabil dan akurat dalam memperkirakan puncak tekanan akibat penutupan katup mendadak dibandingkan metode numerik lainnya.

Dengan demikian, MOC menjadi pendekatan fundamental yang tidak hanya digunakan dalam kajian akademis, tetapi juga dipakai secara praktis dalam desain dan evaluasi sistem distribusi air berskala besar.

### 2.4.3 Model Numerik dan Simulasi

Walaupun model analitis (seperti Persamaan Joukowsky) penting untuk memberikan pemahaman dasar, kenyataannya sistem perpipaan distribusi air di lapangan jauh lebih kompleks. Pipa bercabang, variasi diameter, perubahan elevasi, serta adanya perangkat proteksi (*surge tank, relief valve, atau air chamber*) membuat analisis berbasis persamaan sederhana tidak lagi cukup. Oleh karena itu, pendekatan model numerik berbasis simulasi komputer menjadi krusial. Perangkat lunak seperti Bentley Hammer mampu memodelkan kondisi nyata dengan mempertimbangkan non-linearitas, rugi energi, serta efek transien hidraulik secara detail.

Studi oleh (C. Yao et al., 2014) menunjukkan bahwa variasi waktu penutupan katup yang disimulasikan dengan perangkat lunak numerik mampu memberikan prediksi *attenuation* gelombang tekanan yang jauh lebih akurat dibandingkan dengan perhitungan analitis semata. Temuan ini konsisten dengan temuan (L. Zhou et al., 2018), yang menegaskan bahwa simulasi numerik tidak hanya membantu memahami perilaku transien, tetapi juga menjadi dasar penting dalam merumuskan strategi mitigasi risiko.

### 2.4.4 Bentley Hammer

Bentley Hammer adalah perangkat lunak analisis transien hidraulik yang dikembangkan oleh Bentley Systems, USA, dan banyak digunakan di sektor air minum, energi, dan utilitas. Software ini juga berbasis *Method of Characteristics* (MOC), tetapi memiliki keunggulan integrasi dengan sistem jaringan distribusi yang besar dan kompleks (Walski et al., 2003).

Keunggulan utama dari perangkat ini adalah integrasinya yang kuat dengan platform manajemen jaringan perpipaan seperti WaterGEMS dan WaterCAD, sehingga memungkinkan analisis transien dilakukan secara langsung pada model jaringan distribusi yang sudah digunakan dalam perencanaan maupun operasi.

Bentley Hammer menggunakan Metode Karakteristik (*Method of Characteristics/MOC*) sebagai dasar perhitungan numerik untuk menyelesaikan persamaan momentum dan kontinuitas dalam kondisi transien.

Hal ini memungkinkan simulasi perubahan tekanan dan kecepatan aliran dilakukan secara detail sepanjang pipa, sehingga pola rambatan gelombang tekanan akibat penutupan katup dapat ditelusuri dengan presisi tinggi (Ghidaoui et al., 2005; Wylie & Streeter, 1993).

Fitur yang menjadi sorotan adalah kemampuannya dalam memodelkan dan menganalisis perangkat proteksi terhadap lonjakan tekanan, seperti *surge tank*, *pressure relief valve*, *air chamber*, hingga *pump bypass system*. Dengan simulasi ini, pengguna dapat mengevaluasi efektivitas masing-masing perangkat dalam meredam lonjakan tekanan dan mencegah kerusakan sistem. Kajian (Bergant et al., 2006) menekankan bahwa perangkat proteksi yang tepat dapat secara signifikan menurunkan risiko kegagalan sistem akibat *water hammer*.

Bentley Hammer juga menyediakan fleksibilitas dalam mendefinisikan pola penutupan katup (*closing law*). Penelitian (Cao et al., 2022; Han et al., 2022) menyatakan tentang variasi pola penutupan non-linear, seperti eksponensial atau *two-stage closure*, dapat mengurangi tekanan puncak hingga 20–30% dibanding penutupan linear. Fasilitas ini sangat relevan dengan penelitian ini, karena memungkinkan eksplorasi skenario simulasi sesuai variasi kecepatan dan pola penutupan katup yang diuji.

Selain itu, Bentley Hammer unggul dalam aspek visualisasi hasil simulasi. *Output* berupa grafik tekanan terhadap waktu, profil kecepatan aliran, hingga animasi pergerakan gelombang tekanan sepanjang jaringan pipa mempermudah interpretasi hasil penelitian. Fitur visual ini memberikan nilai tambah penting, karena memungkinkan korelasi langsung antara fenomena matematis dengan implikasi praktis pada sistem distribusi air.

Keunggulan lainnya adalah kemampuan Bentley Hammer untuk mengintegrasikan simulasi dengan kondisi operasional nyata. Data lapangan, seperti variasi *demand* air, kondisi reservoir, dan pengaturan operasi pompa, dapat dimasukkan ke dalam model untuk mendapatkan hasil yang lebih representatif. Hal ini mendukung tujuan penelitian untuk menghasilkan simulasi yang tidak hanya teoritis, tetapi juga mendekati kondisi aktual lapangan.

Dengan fitur-fitur tersebut, Bentley Hammer menjadi perangkat yang sangat relevan bagi penelitian ini, karena mampu menguji secara komprehensif hubungan antara kecepatan penutupan katup dengan lonjakan tekanan puncak dalam sistem distribusi air, serta mengevaluasi opsi mitigasi yang dapat diterapkan guna meningkatkan keandalan sistem.

## 2.5. Pengaruh Suhu Terhadap Properti Air

Fluida, menurut definisi klasik, adalah zat yang dapat mengalir karena partikel-partikelnya memiliki kebebasan bergerak dan mudah berubah bentuk tanpa memisahkan massa (Triatmodjo B, 1993). Ciri khas fluida adalah hambatan yang relatif kecil terhadap perubahan bentuk sehingga mampu beradaptasi dengan bentuk wadah atau pipa yang membatasinya. Dalam aliran nyata (riil), partikel fluida yang bersentuhan langsung dengan dinding pipa memiliki kecepatan nol akibat kondisi *no-slip*, sedangkan partikel yang berada lebih jauh dari dinding bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi. Distribusi kecepatan ini menimbulkan fenomena viskositas atau kekentalan (Triatmodjo B, 1996).

Viskositas merupakan sifat penting air yang menyebabkan adanya tegangan geser ketika air bergerak. Tegangan ini mengubah sebagian energi mekanis aliran menjadi panas atau energi lain, sehingga menimbulkan kehilangan energi (*energy loss*) dalam sistem perpipaan (White, 2011). Sifat viskositas air sangat bergantung pada suhu. Ketika suhu meningkat, viskositas air menurun, sehingga air menjadi lebih "encer" dan lebih mudah mengalir (Kestin et al., 1978). Penurunan viskositas ini berdampak langsung pada pengurangan kerugian gesekan (*friction loss*) di sepanjang pipa, sehingga energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan debit tertentu menjadi lebih kecil.

Selain viskositas, massa jenis ( $\rho$ ) air juga berubah terhadap suhu. Massa jenis air mencapai maksimum pada suhu sekitar 4°C, kemudian menurun seiring dengan kenaikan suhu. Dalam konteks aliran transien, perubahan densitas ini akan memengaruhi respon tekanan, karena densitas muncul secara langsung dalam Persamaan Joukowsky  $\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta V$ . Dengan demikian,

semakin rendah massa jenis fluida akibat suhu tinggi, lonjakan tekanan cenderung berkurang, meskipun faktor lain seperti modulus bulk juga berperan.

Modulus Bulk ( $K$ ) adalah parameter yang menyatakan tingkat kompresibilitas air. Nilai ini meningkat seiring dengan kenaikan suhu, meskipun pengaruhnya relatif lebih kecil dibandingkan viskositas. Namun, dalam analisis *water hammer*, bulk modulus berperan penting karena secara langsung memengaruhi kecepatan rambat gelombang ( $a$ ).

Hipotesis utama penelitian ini adalah karena  $K=f(T)$  dan  $\rho=f(T)$ , maka kecepatan gelombang  $a=g(T)$ , yang pada akhirnya menyebabkan magnitudo lonjakan tekanan  $\Delta P=h(T)$ . Artinya, pada debit aliran dan waktu penutupan katup yang sama, kejadian *water hammer* akan menghasilkan tekanan puncak yang lebih tinggi pada kondisi suhu rendah dibandingkan suhu tinggi. Temuan ini konsisten dengan temuan penelitian (Kodura, 2016), yang menunjukkan bahwa penurunan suhu memperbesar *wave speed* dan meningkatkan risiko kerusakan pipa akibat tekanan transien.

Beberapa studi internasional memperkuat hal ini. (Ghidaoui et al., 2005) menekankan bahwa variasi sifat fluida akibat suhu merupakan salah satu faktor lingkungan yang sering diabaikan, padahal dapat memengaruhi desain proteksi transien. Air pada suhu rendah menghasilkan *water hammer* lebih destruktif, sehingga faktor suhu harus diperhitungkan dalam desain sistem distribusi. Sementara itu, (Mao & Duan, 2009) mengukur sifat kompresibilitas air pada rentang suhu berbeda dan menyimpulkan bahwa perubahan bulk modulus dapat memodifikasi *wave celerity* hingga 10–15%, cukup signifikan dalam analisis hidraulik transien.

Untuk memperjelas fenomena ini, tabel empiris sifat fisik air pada berbagai suhu (densitas, viskositas, dan bulk modulus) berikut memberikan gambaran kuantitatif mengenai bagaimana perubahan suhu memengaruhi perilaku hidraulik.

**Tabel 2. 2** Tabel Empiris Sifat Fisik Air pada Berbagai Suhu

Suhu (°C)	Densitas $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Viskositas $\mu$ (mPa·s)	Bulk Modulus K (MPa)
0	999.84	1.792	2040
10	999.70	1.308	2100
20	998.21	1.002	2150
30	995.67	0.797	2210
40	992.22	0.653	2270
50	988.05	0.547	2330
60	983.20	0.466	2390
70	977.80	0.404	2450
80	991.80	0.355	2510
90	965.30	0.315	2570
100	958.40	0.282	2630

Sumber: (Kestin et al., 1978; Triatmodjo B, 1993, 1996)

## 2.6. Valve Dalam Sistem Perpipaan

Komponen vital dalam sistem distribusi air salah satunya adalah katup karena berfungsi mengatur, mengarahkan, dan menghentikan aliran fluida di dalam pipa (Chaudhry, 2014). Pemilihan jenis katup, mekanisme kerja, serta pola penutupan (*closing law*) memiliki pengaruh besar terhadap besarnya lonjakan tekanan (*water hammer*) yang timbul ketika aliran dihentikan mendadak (Ghidaoui et al., 2005).

### 2.6.1 Jenis-Jenis Katup dan Mekanisme Kerja

Katup pintu (*gate valve*) bekerja dengan menaikkan atau menurunkan pelat (*gate*) untuk membuka atau menutup jalur aliran. Pada kondisi terbuka penuh, hambatan aliran relatif kecil, tetapi penutupan yang cepat dapat memicu perubahan kecepatan fluida secara tajam sehingga menghasilkan tekanan puncak tinggi (Wylie & Streeter, 1993).

Katup bola (*ball valve*) menggunakan bola berlubang yang diputar 90° untuk membuka atau menutup aliran. Karena mekanismenya cepat, penutupan dalam waktu singkat sering dikaitkan dengan lonjakan tekanan signifikan.

Penelitian (Han et al., 2022) menunjukkan bahwa semakin cepat penutupan katup bola, semakin tinggi tekanan puncak yang terjadi akibat *water hammer*.

Katup kupu-kupu (*butterfly valve*) memiliki cakram yang berputar di tengah pipa. Cakram ini mulai membatasi aliran sejak sudut kecil, sehingga penurunan debit terjadi lebih awal dibanding *gate* atau *ball valve*. (Kodura, 2016) menemukan bahwa pada waktu penutupan singkat, *butterfly valve* dapat menghasilkan tekanan puncak yang lebih tinggi dibanding katup lain karena perubahan debit yang tajam sejak awal penutupan.

Katup cek (*check valve*) bekerja otomatis menutup ketika aliran balik terjadi. Penutupan yang spontan ini dapat memicu *water hammer* berat, terutama bila ditempatkan di ujung pipa atau dekat terminal pompa, karena tidak ada kontrol bertahap terhadap waktu penutupan (A.R David, 2004).

Katup Kontrol Otomatis (*Automatic Control Valve*) dirancang untuk mengatur aliran atau tekanan dalam sistem distribusi secara otomatis. Katup ini menyesuaikan posisi buka-tutupnya berdasarkan sinyal kontrol yang diterima, biasanya untuk mempertahankan tekanan atau aliran tertentu dalam sistem. Meskipun dapat mengatur penutupan dengan lebih halus dibandingkan katup lainnya, *automatic control valve* tetap dapat memicu lonjakan tekanan jika terjadi perubahan posisi secara mendadak atau jika sistem kontrol tidak berfungsi dengan baik. Penelitian menunjukkan bahwa meskipun katup ini lebih efektif dalam mengatur fluktuasi aliran, jika penutupan dilakukan terlalu cepat tanpa kontrol yang tepat, *water hammer* tetap dapat terjadi (Tijsseling, 2007).

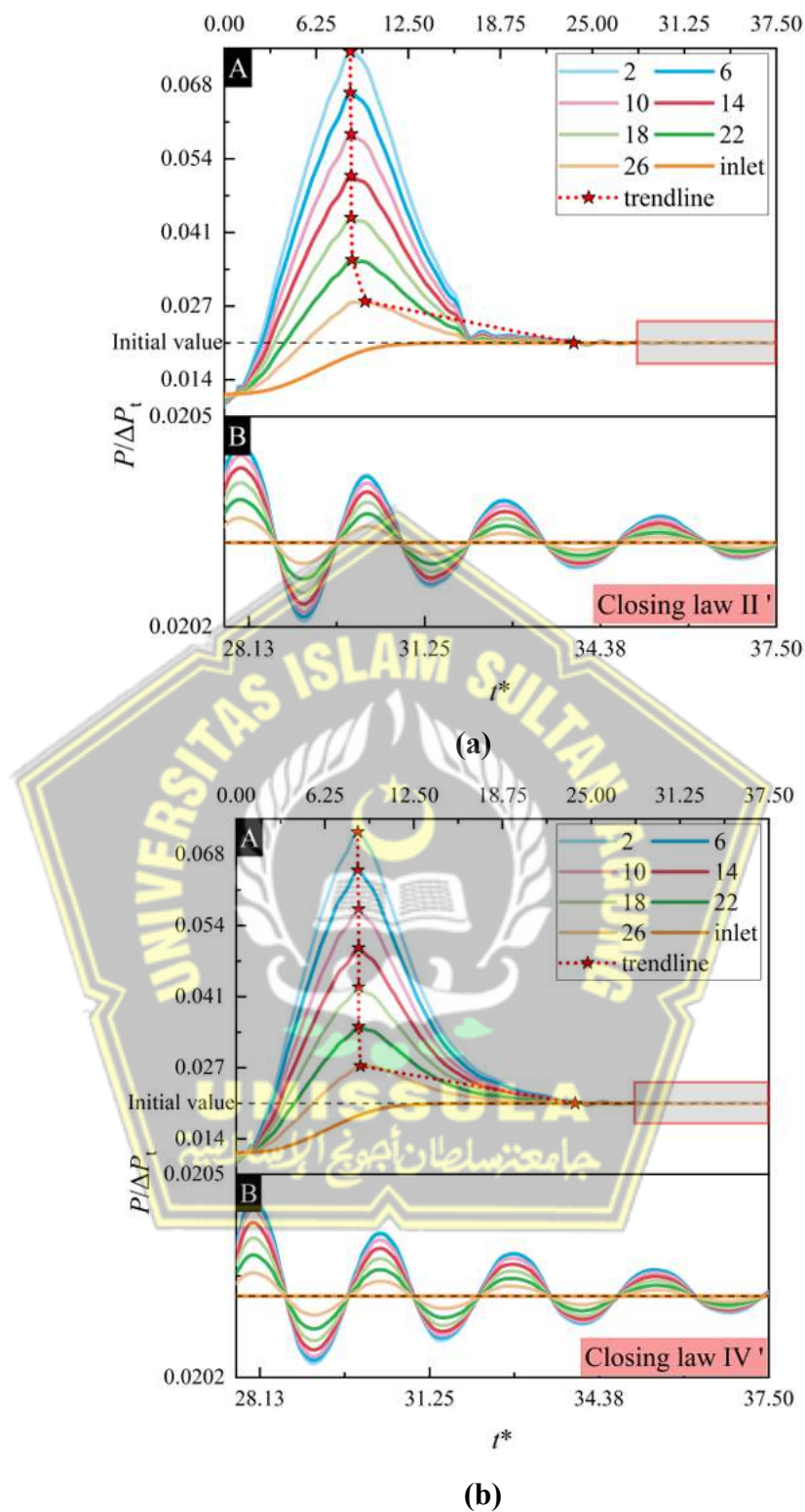
### **2.6.2 Konsep *Closing Law***

*Closing law* adalah pola perubahan posisi katup terhadap waktu selama proses penutupan (Chaudhry, 2014). Secara umum terdapat tiga pola utama: linear, eksponensial/non-linear, dan hiperbolik/adaptif.

Penutupan linear berarti sudut atau bukaan katup berkurang dengan kecepatan tetap sepanjang waktu. Namun, banyak penelitian menunjukkan bahwa pola ini sering menghasilkan tekanan puncak tinggi karena tidak memberikan “redaman” pada fase kritis penutupan (Han et al., 2022).

Sebaliknya, pola eksponensial atau non-linear misalnya penutupan cepat di awal lalu melambat menjelang akhir terbukti mampu menurunkan tekanan puncak.

(Han et al., 2022) bahkan menampilkan perbandingan beberapa *closing law* dengan waktu penutupan yang sama **Gambar 2.4**. Pada *closing law* II **Gambar 2.4-a**, penutupan katup dilakukan relatif cepat pada fase awal sehingga aliran air langsung mengalami perubahan mendadak. Perubahan mendadak ini memicu terbentuknya gelombang tekanan dengan fluktuasi yang tajam. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan kavitasi (gelembung uap akibat tekanan turun drastis) dan menambah beban pada sambungan pipa, sehingga umur infrastruktur berkurang. Sebaliknya, pada *closing law* IV **Gambar 2.4-b**, penutupan diawali dengan kecepatan yang lebih lambat sehingga perubahan debit berlangsung lebih bertahap. Strategi ini memungkinkan sistem menyerap energi transien secara lebih terkendali sebelum katup benar-benar menutup. Hasilnya, amplitudo lonjakan tekanan lebih rendah dan osilasi tekanan lebih teredam, sehingga sistem perpipaan dapat beroperasi lebih stabil dan aman. Temuan ini sangat relevan bagi sistem JDP yang menggunakan pipa HDPE 160 mm di area persil, karena menunjukkan bahwa pemilihan pola penutupan *non-linear* atau strategi dua tahap dapat menjadi alternatif mitigasi transien hidraulik, seperti *water hammer*, yang lebih efektif. Di area persil, di mana aliran air menuju titik distribusi lebih kecil dan sensitif terhadap perubahan tekanan, penerapan strategi penutupan yang bertahap dapat mengurangi dampak lonjakan tekanan yang tajam. Hal ini penting untuk menjaga keandalan dan daya tahan sistem pipa HDPE dalam menghadapi fluktuasi aliran yang cepat dan mencegah kerusakan pada pipa dan sambungan.



**Gambar 2. 4** Pengaruh Hukum Penutupan Katup Berdasarkan Waktu Penutupan  $t^* = 31,25$  terhadap *Water Hammer*: (a) *Closing Law II*; (B) *Closing Law IV*

Sumber: (Han et al., 2022)

Selain itu, penelitian terbaru oleh (Cao et al., 2022; Li et al., 2025) menguatkan gagasan ini, di mana strategi *two-stage closure* (penutupan cepat pada tahap awal kemudian diperlambat menjelang akhir) terbukti lebih efektif menurunkan tekanan puncak dibanding pola linear satu tahap.

### 2.6.3 Hubungan Waktu Penutupan *Valve* dengan Tekanan Puncak

Hubungan dasar antara waktu penutupan katup dan perubahan kecepatan fluida dapat dituliskan sebagai:

$$\Delta V = \frac{L}{t_c} \cdot \frac{\Delta h}{c} \quad (2.11)$$

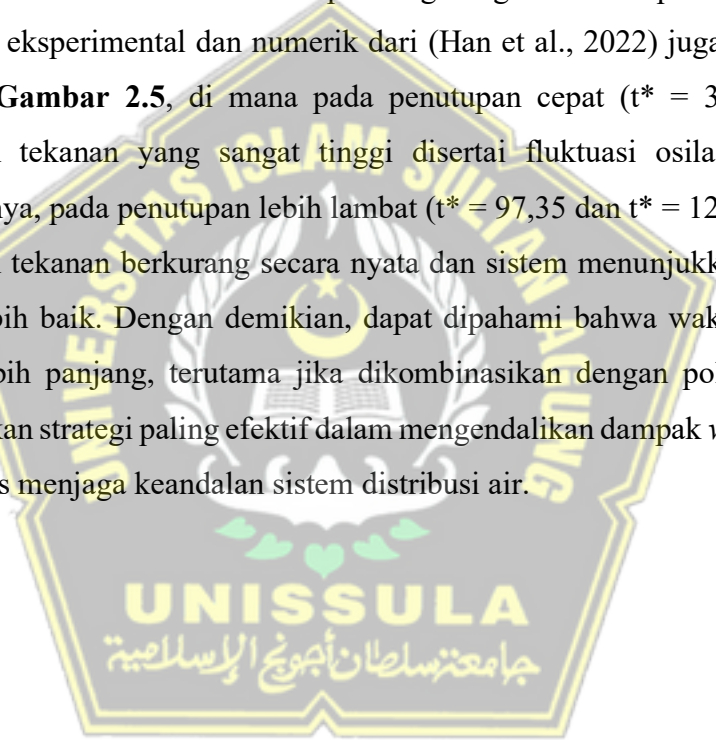
dimana:

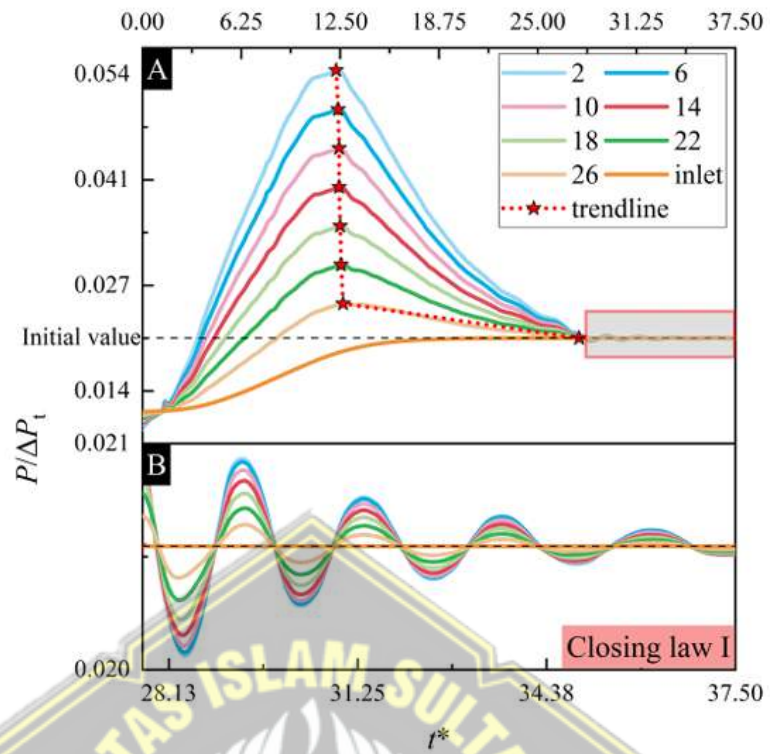
- $\Delta V$  = perubahan kecepatan fluida,
- $L$  = panjang efektif pipa,
- $t_c$  = waktu penutupan katup,
- $\Delta h$  = perubahan head,
- $c$  = kecepatan rambat gelombang.

Persamaan ini menegaskan bahwa semakin kecil  $t_c$ , semakin besar  $\Delta V$ , sehingga lonjakan tekanan ( $\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V$ ) juga semakin besar (Chaudhry, 2014; Wylie & Streeter, 1993). Fenomena hubungan terbalik antara  $t_c$  dan  $\Delta P$  telah dikonfirmasi dalam banyak penelitian. (Kodura, 2016) menunjukkan melalui eksperimen bahwa memperpanjang waktu penutupan katup secara signifikan menurunkan puncak tekanan di dalam pipa baja. Namun, dalam pipa HDPE 160 mm, meskipun lebih fleksibel dan memiliki kecepatan rambat gelombang yang lebih rendah, perubahan kecepatan aliran yang cepat tetap dapat menghasilkan dampak *water hammer* yang signifikan. Oleh karena itu, perpanjangan waktu penutupan katup pada pipa HDPE juga terbukti dapat mengurangi tekanan puncak, meskipun pipa HDPE lebih efektif dalam meredam lonjakan tekanan dibandingkan pipa baja.

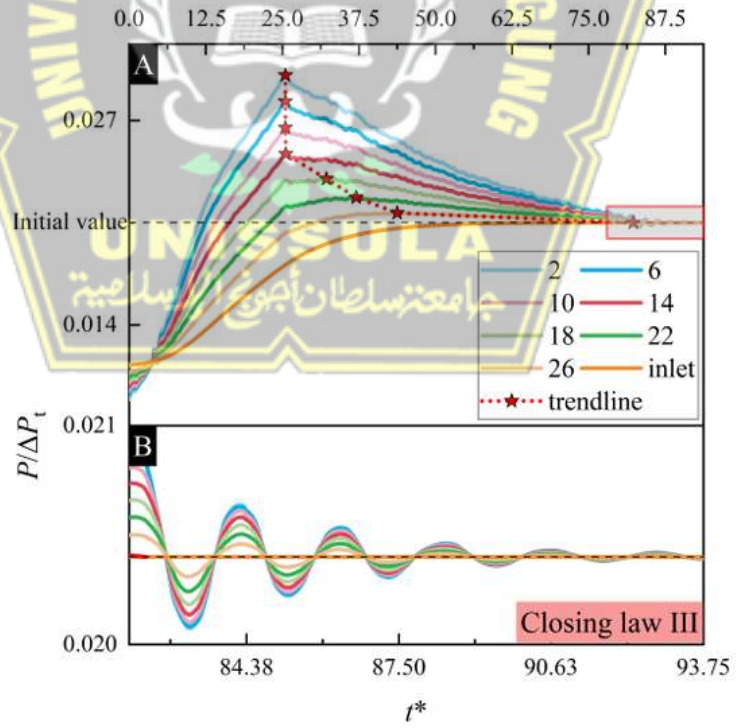
(Han et al., 2022) membuktikan dengan simulasi numerik bahwa waktu penutupan katup yang lebih lama menurunkan tidak hanya tekanan puncak, tetapi juga osilasi tekanan lanjutan yang berbahaya bagi umur pipa. Studi (Li et al., 2025) menambahkan bahwa pola penutupan dua tahap dengan  $t_c$  lebih panjang menghasilkan distribusi tekanan yang lebih stabil, sehingga risiko kerusakan pipa lebih rendah dibanding pola linear satu tahap. Penelitian (Cao et al., 2022) bahkan mengembangkan kurva aturan penutupan katup optimal (*optimal closing rule curve*), yang memperlihatkan bahwa kombinasi pola non-linear dengan waktu penutupan lebih panjang adalah cara paling efektif mengendalikan *water hammer* tanpa mengurangi efisiensi operasi.

Hasil eksperimental dan numerik dari (Han et al., 2022) juga memperkuat hal ini **Gambar 2.5**, di mana pada penutupan cepat ( $t^* = 31,25$ ) terlihat lonjakan tekanan yang sangat tinggi disertai fluktuasi osilasi signifikan. Sebaliknya, pada penutupan lebih lambat ( $t^* = 97,35$  dan  $t^* = 125$ ), amplitudo lonjakan tekanan berkurang secara nyata dan sistem menunjukkan kestabilan yang lebih baik. Dengan demikian, dapat dipahami bahwa waktu penutupan yang lebih panjang, terutama jika dikombinasikan dengan pola non-linear, merupakan strategi paling efektif dalam mengendalikan dampak *water hammer* sekaligus menjaga keandalan sistem distribusi air.

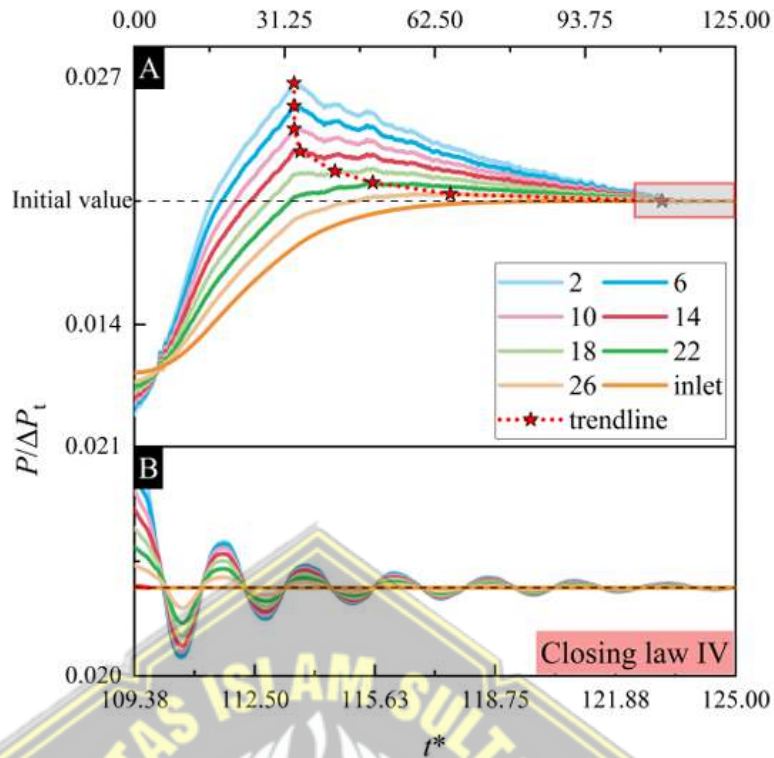




(a)



(b)



(c)

**Gambar 2. 5** Kurva Variasi *Water Hammer* Dengan Waktu Penutupan Katup:

(a)  $t^* = 31.25$  ; (b)  $t^* = 97.35$  ; (c)  $t^* = 125$

Sumber: (Han et al., 2022)

Dengan demikian, jelas bahwa waktu penutupan katup ( $t_c$ ) merupakan parameter kritis dalam menentukan besarnya lonjakan tekanan puncak ( $\Delta P$ ). Penelitian ini menekankan analisis hubungan tersebut dengan pendekatan teoritis dan simulasi numerik. Pemahaman detail mengenai jenis katup, mekanisme kerja, serta *closing law* mendukung tujuan tesis untuk menentukan strategi penutupan katup yang optimal sehingga sistem perpipaan distribusi air tetap aman dari kerusakan akibat *water hammer*.

## 2.7. Penelitian Terdahulu

Fenomena *water hammer* pada sistem perpipaan telah menjadi topik penelitian yang luas baik di tingkat eksperimental, analitis, maupun numerik. Berbagai studi terdahulu berfokus pada pengaruh waktu penutupan katup, hukum penutupan (*closing law*), serta penggunaan perangkat proteksi dalam mengendalikan lonjakan tekanan. Penelitian-penelitian tersebut memberikan dasar penting dalam memahami perilaku transien hidraulik, sekaligus menawarkan strategi mitigasi yang dapat diterapkan pada sistem distribusi nyata.

Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Penulis	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1	<i>An Analysis of the Impact of Valve Closure Time on the Course of Water Hammer</i>	Andrzej Kodura (2016)	Mengevaluasi dampak variasi waktu penutupan katup terhadap <i>water hammer</i>	Analisis numerik dan eksperimen	Hasil menunjukkan bahwa semakin lama waktu penutupan katup, semakin rendah tekanan puncak yang dihasilkan. Waktu penutupan yang lebih panjang dapat menurunkan tekanan hingga 30% dan mengurangi risiko kerusakan struktural pada pipa.

No	Judul Penelitian	Penulis	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
2	<i>Developing an Optimal Valve Closing Rule Curve for Real-Time Pressure Control in Pipes</i>	Mohammad Reza Bazargan-Lari, Reza Kerachian, Hamid Afshar, Seyed Naser Bashi-Azghadi (2013)	Mengembangkan kurva optimal penutupan katup untuk kontrol tekanan	Model optimasi numerik	Ditemukan bahwa strategi <i>two-stage closure</i> (awal cepat lalu melambat) lebih efektif dibanding linear. Strategi ini mampu menekan tekanan puncak, memperpanjang umur pipa, dan meningkatkan efisiensi operasional.
3	<i>Effect of Valve Closure Time on Transient Cavitating Flow through Piping Systems</i>	Miji Cherian, Nandakumar Sajikumar, Sajeev K. S. (2022)	Mengkaji pengaruh waktu penutupan katup terhadap kavitasi transien	Simulasi numerik dan validasi eksperimen	Penutupan cepat memicu kavitasi lebih intens dengan terbentuknya gelembung kavitasi di dalam pipa. Hal ini meningkatkan risiko erosi material dan potensi kerusakan permanen pada sistem perpipaan.

No	Judul Penelitian	Penulis	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
4	<i>Analysis of Water Hammer Attenuation in Applications with Varying Valve Closure Times</i>	Eric Yao, Geoffrey Kember, David Hansen (2015)	Menganalisis pengaruh variasi waktu penutupan katup terhadap atenuasi gelombang tekanan	Simulasi numerik (MOC)	Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin panjang waktu penutupan, semakin besar peredaman ( <i>attenuation</i> ) gelombang tekanan. Hal ini membantu memperpanjang umur infrastruktur dan menurunkan risiko kegagalan jaringan.
5	<i>Effects of Closing Times and Laws on Water Hammer in a Ball Valve</i>	Yu Han, Chunhui Zhang, Jinzhi Cao, Dezhi Ning, Shaofei Wu (2022)	Menganalisis pengaruh variasi waktu dan pola penutupan katup bola terhadap tekanan transien	Simulasi CFD dan eksperimen	Penutupan cepat menimbulkan lonjakan tekanan ekstrem. Namun, pola penutupan non-linear (misalnya eksponensial) dapat menurunkan tekanan puncak hingga 20% dibanding penutupan linear.

No	Judul Penelitian	Penulis	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
6	<i>Developing an Optimal Valve Closing Rule Curve for Real-Time Pressure Control in Pipes</i>	Lei Cao, Yifan Zhou, Zhaoliang Wu, Xiaojun Zhang, Yang Liu (2022)	Mengembangkan kurva penutupan katup optimal untuk mengendalikan tekanan transien	Model numerik dan validasi	Kurva penutupan optimal mampu mengurangi tekanan puncak hingga 25% dibanding strategi linear, serta lebih stabil untuk operasi jangka panjang.
7	<i>Sensitivity Analysis of Operational Time Differences for a Pump Valve System on a Water Hammer Response</i>	Wuyi Wan, Fuqiang Li (2015)	Mengkaji sensitivitas perbedaan waktu operasi katup pompa terhadap respons <i>water hammer</i>	Simulasi dan analisis sensitivitas	Perbedaan kecil (detik) dalam waktu operasi katup pompa dapat menimbulkan perbedaan signifikan dalam tekanan puncak. Hasil ini menegaskan pentingnya pengaturan presisi waktu penutupan
8	<i>Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward a Comprehensive Picture</i>	Anthony F. Colombo, Bryan W. Karney (2002)	Menilai hubungan kebocoran pipa dengan energi & transien hidraulik	Studi analitis + data empiris	<i>Water hammer</i> memperburuk kebocoran pipa yang sudah ada, memperbesar kehilangan air ( <i>non-revenue water</i> ), dan meningkatkan biaya energi akibat tekanan berlebih.

No	Judul Penelitian	Penulis	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
9	<i>A Novel Surge Damping Method for Hydraulic Transients with Operating Pump Using an Optimized Valve Control Strategy</i>	Cao, Z., Xia, Q., Guo, X., Lu, L., & Deng, J. (2022)	Mengembangkan metode baru untuk meredam transien hidraulik pada sistem pompa	Simulasi numerik dan strategi kontrol katup	Metode kontrol katup adaptif terbukti meredam tekanan puncak secara signifikan saat pompa beroperasi. Hasil ini meningkatkan keandalan sistem distribusi air bertekanan tinggi.
10	<i>Optimal Valve Closing Law for Improved Water Hammer Control: A Case from a Water Supply Pipeline in Guelma, Algeria</i>	Toumi, A., & Sekiouc, F. (2024)	Mengoptimalkan hukum penutupan katup pada sistem distribusi air nyata di Guelma, Aljazair	Simulasi numerik dan studi kasus lapangan	Hukum penutupan optimal terbukti mengurangi tekanan puncak dan mengoptimalkan pengendalian <i>water hammer</i> . Studi ini menunjukkan manfaat praktis penerapan strategi kontrol katup adaptif dalam sistem distribusi nyata.

Sumber: Hasil Observasi Penulis (2025)

Dari berbagai penelitian tersebut, dapat dilihat bahwa fokus utama selalu berkisar pada hubungan antara kecepatan atau hukum penutupan katup dengan tekanan puncak *water hammer*. Namun, sebagian besar studi masih terbatas pada kondisi laboratorium atau model teoritis yang disederhanakan. Sebagai respons terhadap hal tersebut, penelitian ini hadir untuk mengisi gap tersebut dengan melakukan simulasi numerik berbasis perangkat lunak Bentley Hammer, yang memungkinkan representasi sistem nyata dengan parameter operasional yang lebih detail. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis mengenai waktu penutupan katup yang optimal, sehingga risiko *water hammer* dapat diminimalkan tanpa mengorbankan efisiensi sistem distribusi air.



## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian**

Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi numerik berbasis perangkat lunak hidraulik. Pendekatan kuantitatif dipilih karena fenomena *water hammer* dapat diukur secara matematis melalui parameter tekanan, kecepatan aliran, dan waktu penutupan katup.

Metode simulasi numerik dipilih karena:

1. Aman – tidak menimbulkan risiko kerusakan pada sistem pipa eksisting yang sedang beroperasi.
2. Presisi – memungkinkan pengendalian variabel penelitian (waktu penutupan, debit, kondisi awal tekanan) secara akurat.
3. Efisiensi – mampu menganalisis berbagai skenario operasi dan kondisi transien dalam waktu singkat.

Perangkat lunak khusus yang digunakan dalam penelitian ini adalah Bentley Hammer, aplikasi simulasi hidraulik berbasis jaringan (*network-based*) yang terintegrasi dengan data lapangan dan memudahkan analisis proteksi seperti *surge tank* atau *pressure relief valve* (Cao et al., 2022; E. Yao et al., 2015).

Pendekatan ini sejalan dengan tujuan penelitian, yaitu menganalisis pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap tekanan puncak *water hammer*, serta menentukan waktu penutupan katup yang optimal untuk mencegah kerusakan pipa HDPE pada sistem distribusi JDP Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku.

#### **3.2. Lokasi dan Objek Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan pada Sistem Jaringan Distribusi Utama (JDU) dan Jaringan Distribusi Permbagi (JDP) Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku, yang merupakan bagian dari sistem transmisi air bersih utama di wilayah Kawasan Inti Pusat Pemerintahan (KIPP) Ibu Kota Nusantara. Jaringan ini berfungsi menyalurkan air dari Reservoir Induk menuju area pelayanan distribusi yang mencakup beberapa zona pengguna utama.

Secara geografis, lokasi penelitian berada di Kecamatan Sepaku, Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur. Wilayah ini memiliki topografi yang bervariasi dengan perbedaan elevasi yang cukup signifikan antara titik reservoir dan area distribusi, sehingga kondisi tersebut berpotensi menimbulkan tekanan statis tinggi serta risiko transien hidraulik (*water hammer*) pada sistem perpipaan.

Peta lokasi penelitian ditunjukkan pada **Gambar 3.1**, yang menggambarkan posisi reservoir induk, jaringan pipa utama, serta area pelayanan JDU-JDP Sub-WP 1B dan 1C berdasarkan dokumen perencanaan teknis proyek SPAM Sepaku.

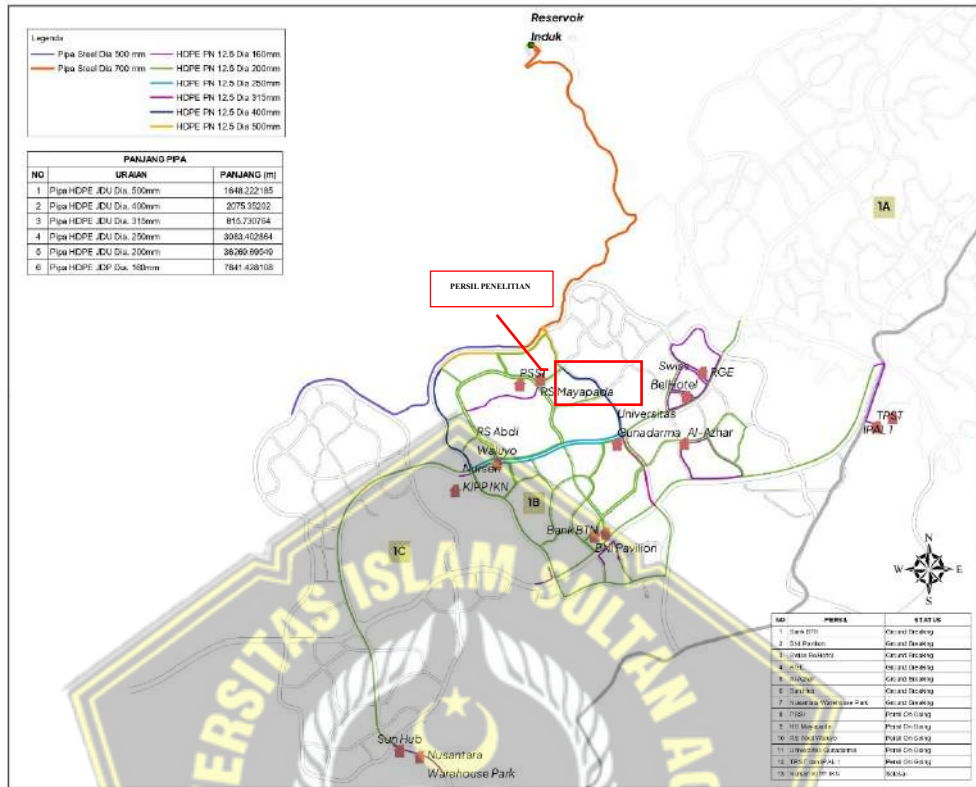


**Gambar 3. 1** Peta Lokasi Penelitian SPAM Sepaku Sub-WP 1B dan 1C

Sumber: Peta Gambaran Rencana Jalur Pelayanan Pembangunan JDU-JDP Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku Tahap I

Untuk memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai sistem yang dianalisis, **Gambar 3.2** memperlihatkan konfigurasi jaringan pipa utama yang menjadi objek penelitian. Peta ini menunjukkan jalur pipa baja dan HDPE yang menghubungkan reservoir induk dengan berbagai titik distribusi di kawasan KIPP IKN. Pada penelitian ini titik lokasi penelitian ada pada Persil RS Mayapada.

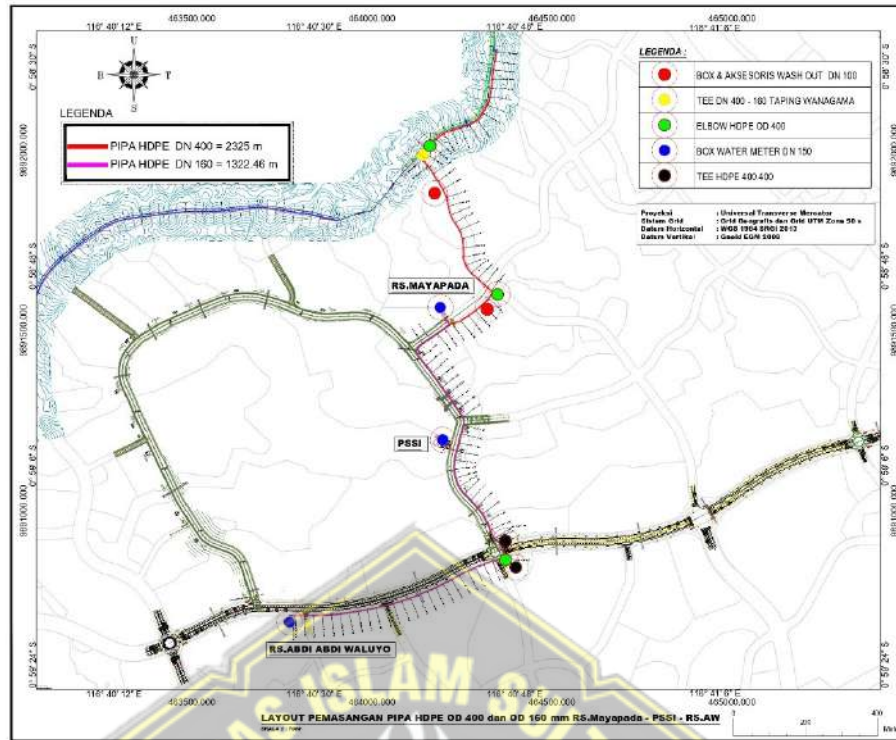
Informasi ini digunakan sebagai dasar dalam tahap pemodelan hidraulik dan analisis fenomena transien pada sistem perpipaan.



**Gambar 3. 2** Peta Jaringan Pipa Distribusi SPAM Sepaku Sub-WP 1B dan 1C

Sumber: Gambar Rencana JDU–JDP Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku Tahap I

Selain peta jaringan distribusi yang ditunjukkan pada **Gambar 3.2**, sistem penyediaan air SPAM Sepaku juga dilengkapi dengan infrastruktur utama yang menghubungkan reservoir induk ke jaringan distribusi bawah. Di JDP pada persil 1B dan 1C, digunakan pipa HDPE 160 mm untuk menyalurkan air ke area-area distribusi lebih kecil. Pipa ini merupakan bagian penting dari jaringan yang menghubungkan pipa utama dengan titik distribusi yang lebih terperinci di sepanjang jalur pipa. Untuk memastikan kestabilan aliran dan tekanan, di jalur distribusi ini terpasang beberapa katup, termasuk Air Valve 150 mm dan Gate Valve 150 mm, yang berfungsi untuk mengontrol aliran serta memitigasi potensi efek transien seperti *water hammer*.



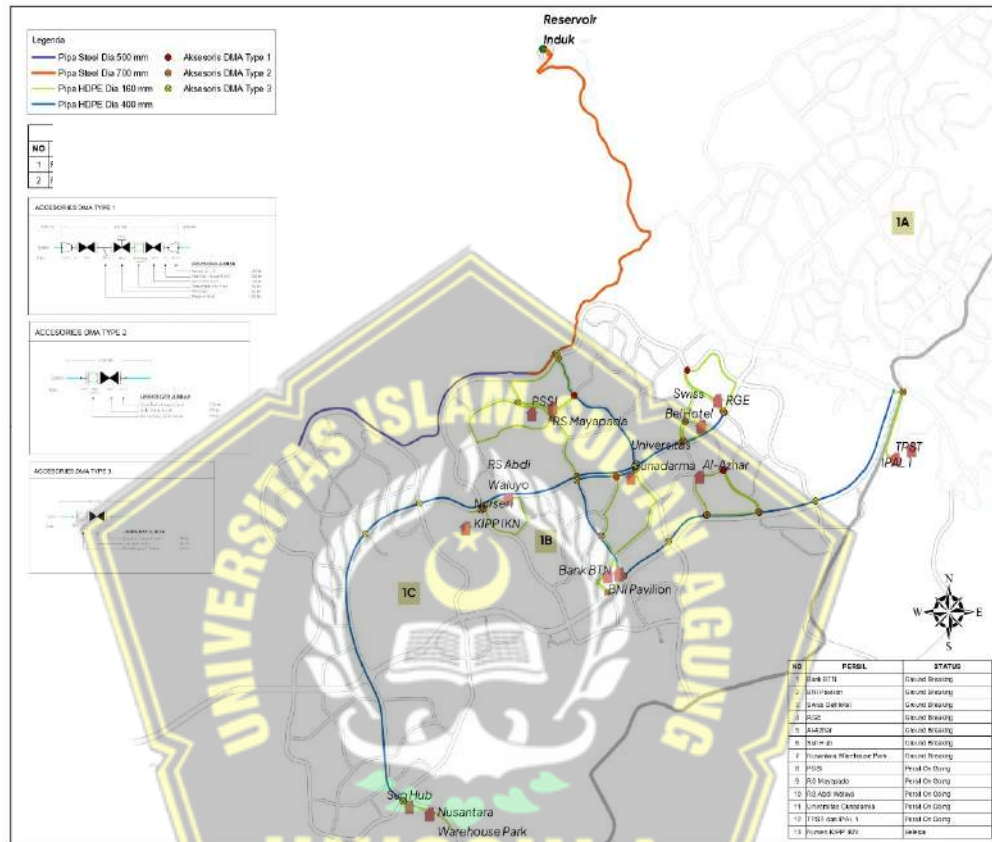
**Gambar 3.3** Layout Pipa HDPE Persil Mayapada

Sumber: Data JDU–JDP Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku Tahap I

Posisi dan konfigurasi katup di JDP pada persil 1B dan 1C menjadi sangat penting dalam konteks analisis transien hidraulik, karena perubahan kecepatan penutupan katup pada titik ini berpotensi menimbulkan lonjakan tekanan signifikan atau *water hammer* yang dapat memengaruhi stabilitas sistem distribusi air. Penutupan katup yang cepat pada pipa HDPE 160 mm dapat menyebabkan fluktuasi tekanan yang cukup besar, yang dapat berdampak pada keandalan sistem. Selain itu, area ini juga dilengkapi dengan perangkat pengukuran seperti *electromagnetic flow meter*, *pressure gauge*, serta jaringan SCADA dan pipa sampling yang digunakan untuk pemantauan debit dan tekanan secara *real-time*, guna mengawasi potensi transien dan memastikan sistem tetap beroperasi dalam batas aman.

Peta Master Plan pada **Gambar 3.4** berikut menunjukkan posisi katup, serta koneksi antar JDP persil 1B dan 1C, yang menjadi acuan penting dalam proses pemodelan numerik dan analisis simulasi *water hammer*. Peta ini menunjukkan jalur distribusi yang menghubungkan reservoir induk dengan berbagai titik distribusi di area persil. Selain itu, peta ini juga menggambarkan posisi katup utama seperti *Gate Valve* 150 mm, *Gate Valve* 400 mm, dan *Butterfly Valve* DN 400 mm,

yang memiliki peran krusial dalam mengatur aliran dan mengendalikan perubahan tekanan di dalam jaringan distribusi. Posisi katup dan pengaturan distribusi ini sangat penting dalam analisis *water hammer*, karena perubahan kecepatan penutupan katup di titik ini berpotensi menimbulkan lonjakan tekanan yang dapat memengaruhi stabilitas sistem secara keseluruhan.



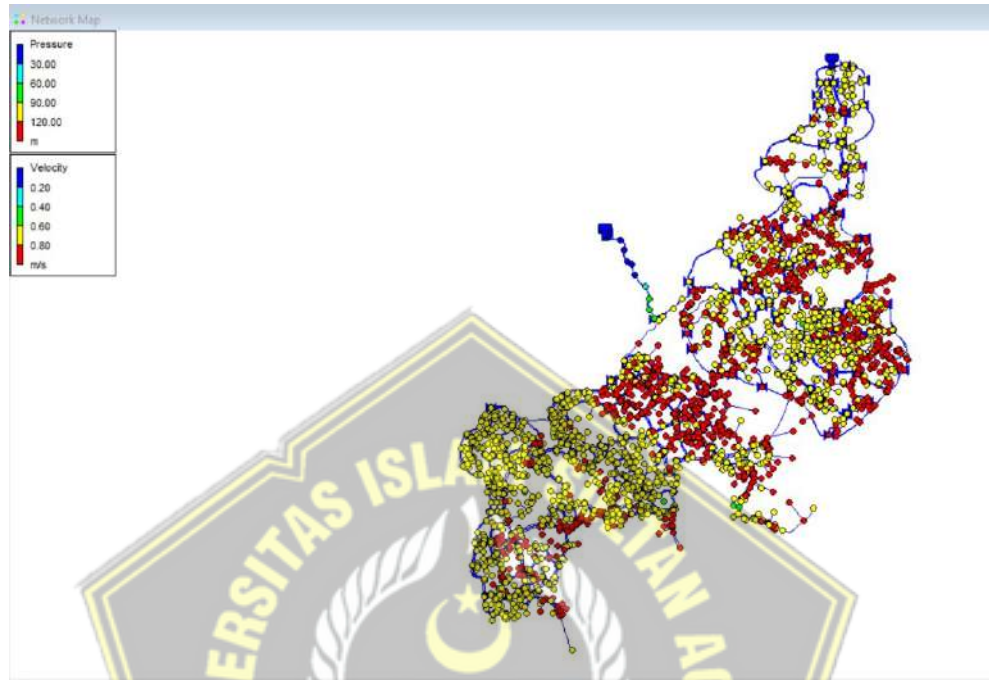
**Gambar 3.4** Peta Master Plan JDU JDP 1B dan 1C SPAM Sepaku

Sumber: Dokumen Perencanaan Teknis SPAM Sepaku Sub-WP 1B dan 1C

Hasil analisis hidraulik sistem JDU yang diterapkan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.4**. Peta tersebut merupakan hasil pemodelan jaringan menggunakan perangkat lunak EPANET, yang menampilkan distribusi tekanan (*pressure*) dan kecepatan aliran (*velocity*) pada setiap segmen pipa dan simpul jaringan. Setiap *node* merepresentasikan elemen hidraulik seperti *junction*, *reservoir*, atau *valve*, sedangkan garis penghubung menunjukkan pipa transmisi maupun distribusi.

Gradasi warna pada peta menggambarkan variasi parameter hidraulik: warna biru menunjukkan tekanan atau kecepatan rendah, sedangkan warna merah

menandakan nilai tekanan atau kecepatan yang lebih tinggi. Pola distribusi warna ini memberikan gambaran awal mengenai kondisi hidraulik sistem, termasuk area dengan potensi perubahan tekanan signifikan yang relevan untuk analisis fenomena *water hammer*.



**Gambar 3. 5** Hasil Analisis Hidrolis *Layout* Jaringan Distribusi Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku (Pemodelan EPANET)

Sumber: Hasil pemodelan hidrolis *Network Map* (EPANET)

Objek penelitian ini dipilih karena jaringan distribusi di sekitar JDP persil 1B dan 1C memiliki peran vital dalam menjaga kontinuitas pasokan air, namun pada saat yang sama juga rentan terhadap fenomena *water hammer* akibat adanya katup pengatur aliran. Kondisi ini menjadikan lokasi tersebut representatif untuk dianalisis, khususnya terkait pengaruh variasi waktu penutupan katup terhadap tekanan puncak serta implikasinya terhadap keamanan operasional pipa HDPE 160 mm yang digunakan pada JDP. Pipa HDPE, meskipun lebih fleksibel dibandingkan pipa baja, tetap rentan terhadap deformasi akibat lonjakan tekanan yang terjadi secara mendadak, sehingga penting untuk menganalisis pengaruh *water hammer* di jaringan distribusi ini.

**Tabel 3. 1** Karakteristik Lokasi Penelitian

Aspek Teknis	Deskripsi
Perbedaan Elevasi yang Signifikan	Selisih ketinggian antara Reservoir Induk (+148 m) dan titik terendah trase transmisi (+13,7 m) berpotensi menimbulkan tekanan statis hingga 13,4 bar, terutama pada kondisi aliran berhenti mendadak.
Tekanan Operasi yang Tinggi	Tekanan operasi pada debit puncak ( $Q_{peak}$ ) tercatat berada dalam kisaran 10–16 bar, mendekati batas desain material pipa.
Material Pipa Sensitif terhadap Lonjakan Tekanan	Fleksibilitas pipa HDPE memungkinkan pipa ini untuk menyerap sebagian energi lonjakan tekanan, namun jika tekanan yang terjadi sangat tinggi, pipa HDPE tetap dapat mengalami perubahan bentuk yang mempengaruhi kinerja sistem. Oleh karena itu, penting untuk menerapkan prosedur yang tepat dalam mengendalikan lonjakan tekanan dan memastikan stabilitas sistem distribusi air.

Sumber: Evaluasi Data Elevasi Hidrolis Pressure JDU JDP 1B1C

Penelitian ini menggunakan model sistem perpipaan distribusi air JDP Sub-WP 1B dan 1C, yang dibangun secara virtual pada perangkat lunak Bentley Hammer. Pemodelan tersebut ditujukan untuk menganalisis fenomena transien akibat variasi kecepatan penutupan katup.

Model sistem perpipaan disusun dengan mengacu pada data teknis lapangan dan literatur ilmiah pada tabel 3.2.

**Tabel 3. 2** Data Teknis dan Parameter Input Pemodelan Sistem Perpipaan

Kategori Data	Parameter	Nilai/Keterangan
<b>Data Teknis Lapangan</b>	Panjang Jalur Pipa	±4500 m
	Diameter Pipa	<i>Steel</i> 700 mm, <i>Steel</i> 50 mm, HDPE 400 mm, HDPE 160 mm
	Tebal Dinding Pipa	22 mm
	Material Pipa	<i>Steel</i> & HDPE
	Elevasi Sistem	Reservoir Induk +148 m, titik terendah +13,7 m
	Tekanan Operasi	Debit minimum (Q <sub>min</sub> ) Debit puncak (Q <sub>peak</sub> )
<b>Data Debit Operasi</b>	Debit Minimum (Q <sub>min</sub> )	40 liter/detik
	Debit Puncak (Q <sub>peak</sub> )	1050 liter/detik
<b>Properti Fisik Air</b>	Densitas ( $\rho$ )	Bervariasi terhadap suhu (simulasi yang digunakan 30°C: 995,7 kg/m <sup>3</sup> )
	Viskositas ( $\mu$ )	Bervariasi terhadap suhu (simulasi yang digunakan 30°C: 0,80 mPa·s)
	Bulk Modulus (K)	Bervariasi terhadap suhu (simulasi yang digunakan 30°C: 2210 MPa)

Sumber: Evaluasi Data Elevasi Hidrolis *Pressure*; Tinjauan Reservoir Induk & Distribusi; Literatur

### 3.2.1 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan perangkat keras, perangkat lunak, dan data teknis sebagai berikut:

#### 1. Perangkat Keras

- Laptop : GIGABYTE AERO 15X V8  
BIOS : F06
- Spesifikasi Teknis:
  - CPU : Intel® Core™ i7-8750H @ 2.20 GHz  
(6 Core / 12 Thread)
  - RAM : 16 GB (16384 MB)
  - Storage : 1TB
  - GPU : NVIDIA GeForce GTX 1070 Max-Q
  - DirectX Version : DirectX 12
  - Sistem Operasi : Windows 11 Home 64-bit (Build 26100)

#### 2. Perangkat Lunak

- Bentley Hammer: simulasi transien pada jaringan distribusi dengan mempertimbangkan berbagai perangkat proteksi (seperti surge tank dan PRV). Pemodelan fenomena *water hammer* dilakukan dengan pendekatan *Method of Characteristics* (MOC).
- Microsoft Excel: pengolahan data hasil simulasi.

#### 3. Lisensi Perangkat Lunak

Perangkat lunak utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah Bentley OpenFlows Hammer, yang berfungsi untuk menganalisis fenomena *water hammer* menggunakan pendekatan *Method of Characteristics* (MOC).

Bentley OpenFlows HAMMER digunakan dengan lisensi resmi institusional atas nama PT Tata Guna Patria, sebagaimana tercantum dalam *Purchase Receipt* yang diterbitkan oleh Bentley Systems International Limited, Dublin, Irlandia, pada tanggal 5 Agustus 2024. Lisensi ini mencakup hak penggunaan penuh untuk kegiatan analisis hidraulik sistem

distribusi air, termasuk simulasi *surge protection*, *valve operation*, dan *pipeline transients* sesuai dengan ketentuan Bentley Systems.

Kedua lisensi tersebut menjamin bahwa seluruh proses simulasi dan analisis dalam penelitian ini dilaksanakan secara legal, sesuai dengan standar etika akademik dan ketentuan pemegang hak cipta perangkat lunak. Dengan demikian, hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan baik secara teknis maupun administratif.

### 3.3. Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel penelitian didefinisikan secara jelas untuk memastikan bahwa proses simulasi numerik dapat menghasilkan data yang valid dan dapat dianalisis sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu menganalisis pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap tekanan puncak (*peak pressure*) karena fenomena *water hammer* dalam sistem pipa distribusi air.

#### 3.3.1 Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas adalah parameter yang diubah atau divariasikan untuk melihat pengaruhnya terhadap variabel terikat. Dalam penelitian ini, variabel bebas meliputi:

##### 1. Waktu Penutupan Katup ( $t_c$ )

Waktu yang diperlukan untuk menutup katup sepenuhnya. Variasi yang digunakan adalah 30s, 60s, 120s, yang mewakili kondisi penutupan cepat (*fast*), sedang (*medium*), dan lambat (*slow*). Variasi ini dipilih untuk mengevaluasi hubungan langsung antara kecepatan penutupan katup dan besarnya tekanan puncak yang dihasilkan (Han et al., 2022; Kodura, 2016).

### 3.3.2 Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat adalah parameter yang diamati untuk mengukur dampak perubahan variabel bebas. Dalam penelitian ini, variabel terikat adalah:

- Tekanan Puncak ( $\Delta P$ )

Besarnya lonjakan tekanan (dalam bar) yang terjadi akibat fenomena *water hammer* pada setiap skenario waktu dan pola penutupan katup. Nilai tekanan puncak diambil dari hasil simulasi Bentley Hammer, pada titik-titik kritis jaringan pipa seperti katup kontrol dan ujung pipa (Ghidaoui et al., 2005; E. Yao et al., 2015).

### 3.3.3 Variabel Kendali (*Controlled Variable*)

Variabel kendali adalah parameter yang dijaga tetap konstan untuk memastikan hasil simulasi hanya dipengaruhi oleh perubahan variabel bebas.

**Tabel 3. 3** Variabel Penelitian Kendali

Parameter	Satuan	Keterangan
Debit awal	lps	(d disesuaikan dengan data lapangan JDU Sub-WP 1B & 1C)
Diameter pipa	mm	(d disesuaikan dengan data lapangan JDU Sub-WP 1B & 1C)
Panjang pipa	m	(d disesuaikan dengan data lapangan JDU Sub-WP 1B & 1C)
Material pipa	–	(d disesuaikan dengan data lapangan JDU Sub-WP 1B & 1C)
Bulk modulus air	MPa	(d disesuaikan dengan data lapangan JDU Sub-WP 1B & 1C)

Sumber: Analisis Penulis, 2025

### 3.4. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data pada penelitian ini terdiri dari data sekunder dan data primer yang diperoleh melalui proses simulasi. Pemilihan metode ini bertujuan untuk menjamin akurasi dan keterwakilan kondisi lapangan dalam pemodelan.

#### 3.4.1 Data Sekunder

Data sekunder diperoleh melalui:

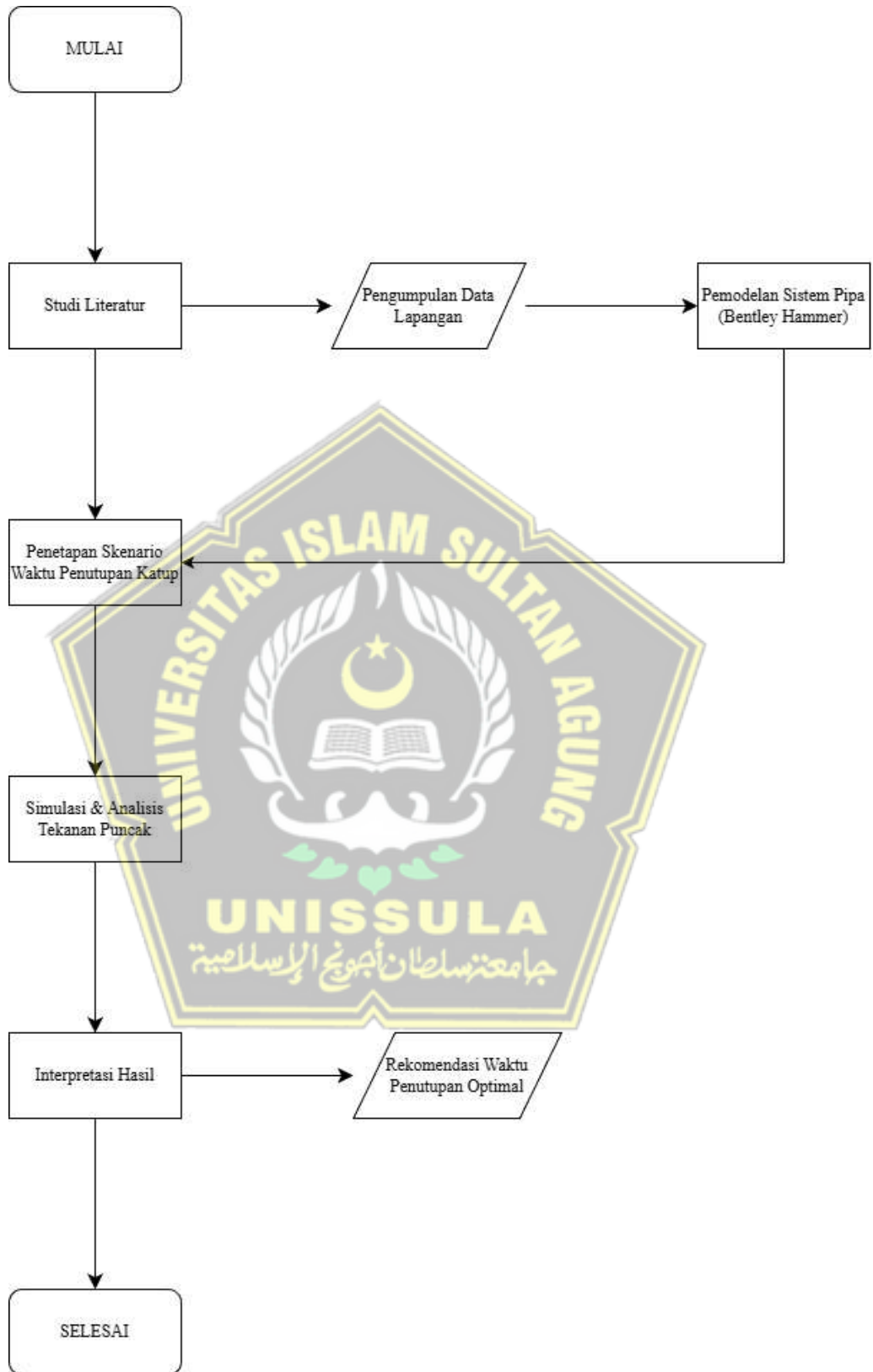
1. Dokumen Teknis JDU Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku – meliputi data pipa JDU seperti diameter, panjang, elevasi, debit operasi, dan tekanan hidrolis (Sumber: Evaluasi Data Elevasi Hidrolis *Pressure*, 2024).
2. Properti Fisik Air – data densitas, viskositas, dan bulk modulus pada berbagai suhu berdasarkan literatur ilmiah dan data lapangan.
3. Kajian Teori *Water Hammer* – literatur fenomena transien hidrolik, persamaan Joukowsky, dan metode simulasi numerik.

#### 3.4.2 Data Primer (Hasil Simulasi)

Data primer diperoleh melalui hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Bentley Hammer, dengan tahapan sebagai berikut:

1. Grafik Tekanan–Waktu – menunjukkan fluktuasi tekanan di berbagai titik jaringan untuk setiap skenario penutupan katup.
2. Nilai Tekanan Puncak ( $\Delta P$ ) – hasil perhitungan lonjakan tekanan maksimum yang terjadi pada pipa JDU akibat variasi kecepatan penutupan katup.
3. Distribusi Tekanan Sepanjang Pipa – profil tekanan sepanjang jalur pipa pada kondisi transien untuk mengidentifikasi titik kritis berisiko kegagalan.
4. Analisis Gelombang Tekanan – pemetaan pola rambatan gelombang tekanan (*wave speed analysis*) berdasarkan material pipa baja dan properti air yang divariasikan sesuai suhu operasional.

### 3.5. Tahapan Alur Penelitian



**Gambar 3. 6** Alur Penelitian

Sumber: Hasil Olahan Penulis, 2025

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan berikut:

### 3.5.1 Studi Literatur

Tahap awal penelitian ini berupa kajian pustaka secara komprehensif terhadap teori, konsep, dan hasil penelitian terdahulu yang relevan.

Kajian dilakukan untuk memahami:

#### 1. Fenomena *Water Hammer*

- Prinsip dasar terjadinya lonjakan tekanan akibat perubahan mendadak pada kecepatan aliran.
- Hubungan antara waktu penutupan katup, kecepatan gelombang tekanan, dan besarnya tekanan puncak (Chaudhry, 2014; Ghidaoui et al., 2005).

#### 2. Kecepatan Rambat Gelombang (*Wave Speed*)

- Pengaruh material pipa (*HDPE*) dan sifat fisik air seperti densitas ( $\rho$ ), viskositas ( $\mu$ ), dan bulk modulus ( $K$ ) pada kecepatan propagasi gelombang tekanan.

#### 3. Persamaan Matematis dan Metode Analisis

- Persamaan Joukowski sebagai pendekatan analitis awal.
- Metode Karakteristik (*Method of Characteristics/MOC*) sebagai dasar pemodelan numerik (Han et al., 2022).

#### 4. Penelitian Terdahulu

- Studi terkait pengaruh waktu penutupan katup terhadap tekanan puncak, baik melalui simulasi maupun eksperimen (Kodura, 2016).
- Efektivitas pola penutupan katup (*closing law*) seperti linear, eksponensial, dan *two-stage closure* dalam meredam tekanan transien (Cao et al., 2022; Han et al., 2022).

Tujuan studi literatur ini untuk menentukan parameter input yang relevan untuk simulasi, seperti panjang pipa, diameter, sifat fluida ( $\rho$ ,  $\mu$ ,  $K$ ), kecepatan rambat gelombang ( $c$ ), tekanan operasi, serta variasi waktu dan pola penutupan katup.

### 3.5.2 Pemodelan Sistem Pipa

Pada tahap ini dilakukan proses pembangunan model jaringan pipa JDP Sub-WP 1B dan 1C yang terhubung dengan Reservoir Induk. Pemodelan sistem dilakukan menggunakan Bentley OpenFlows HAMMER, yang merupakan perangkat lunak simulasi transien hidraulik berbasis *Method of Characteristics* (MOC). Perangkat lunak ini memiliki kemampuan untuk menganalisis perubahan tekanan secara dinamis (*dynamic pressure surge*), memodelkan operasi katup dan pompa, serta mengevaluasi respons sistem terhadap kondisi transien seperti penutupan katup mendadak atau gangguan aliran.

Model jaringan pipa dibangun dengan memasukkan data geometri pipa, material, ketebalan, elevasi, kondisi batas, serta karakteristik hidraulik awal. Seluruh konfigurasi pemodelan disesuaikan dengan kondisi aktual jaringan distribusi JDP 1B dan 1C, sehingga hasil simulasi dapat merepresentasikan perilaku hidraulik sistem secara lebih akurat.

#### Langkah-Langkah Pemodelan:

##### 1. Pengumpulan Data Teknis Lapangan (Sumber: *Evaluasi Data Elevasi Hidrolis Pressure; Tinjauan Reservoir Induk & Distribusi*), meliputi:

Panjang pipa	:	± 4.500 m (Reservoir ke Persil Mayapada)
Diameter & Material	:	Steel 700 mm, Steel 500 mm, HDPE 400 mm, HDPE 160 mm
Modulus Elastisitas	:	HDPE 1.0 GPa (900 Mpa) Steel 200 GPa (200.000 Mpa)
Elevasi sistem	:	+148 m (reservoir induk) hingga +16.50 m (persil mayapada), serta elevasi terendah +13.7m
Tekanan operasi	:	10–16 bar
Debit operasi	:	Pipa Steel 700 mm & 500mm Qmin = 40 lps, Qpeak = 1050 lps Pipa HDPE 400 mm Qmin = 37 lps, Qpeak = 700 lps Pipa HDPE 160 mm Qmin = 6 lps, Qpeak = 120 lps

## 2. Input Data Properti Fluida

Densitas air ( $\rho$ )	:	Simulasi yang digunakan 30°C: 995,7 kg/m <sup>3</sup>
Viskositas air ( $\mu$ ):	:	Simulasi yang digunakan 30°C: 0,80 mPa·s
<i>Bulk modulus</i> (K)	:	Simulasi yang digunakan 30°C: 2210 MPa

## 3. Pembuatan Model Hidraulik

Pemetaan jaringan pipa dengan memasukkan data topografi, elevasi, panjang segmen, dan kondisi batas.

*Output* tahap ini adalah model digital sistem perpipaan yang siap digunakan untuk simulasi kondisi transien.

### 3.5.3 Pengaturan Skenario

Tahap ini bertujuan untuk menentukan variasi skenario simulasi yang akan diuji, agar pengaruh kecepatan dan pola penutupan katup terhadap tekanan puncak dapat dianalisis secara komparatif.

Tabel 3. 4 Skenario Penutupan Katup

Skenario	Waktu Penutupan (detik)	Pola Penutupan	Debit Awal
S1	30	<i>Continuous</i>	Qpeak
S2	60	<i>Continuous</i>	Qpeak
S3	120	<i>Continuous</i>	Qpeak

Sumber: Hasil Olahan Penulis, 2025

### 3.5.4 Analisa Data

Pada tahap ini dilakukan simulasi numerik menggunakan Bentley Hammer untuk setiap skenario penutupan katup.

Proses analisis meliputi:

#### 1. *Running Simulasi*

Pada tahap ini, dilakukan penjalankan simulasi untuk setiap skenario penutupan katup yang telah ditentukan sebelumnya. Setiap skenario diprogram dengan parameter input yang mencakup waktu penutupan katup (30 detik, 60 detik, 120 detik), karakteristik material pipa, serta kondisi operasi sistem distribusi air.

Proses ini menggunakan Metode Karakteristik (MOC) untuk memprediksi distribusi tekanan dan aliran fluida dalam domain waktu dan ruang. MOC memungkinkan simulasi fenomena *water hammer* yang sangat dinamis, memodelkan pergerakan gelombang tekanan yang dipengaruhi oleh waktu penutupan katup dan karakteristik pipa, serta dampaknya terhadap sistem secara keseluruhan.

#### 2. *Pengolahan Data Output*

Setelah simulasi dijalankan, data yang diperoleh dari setiap skenario diproses untuk menghasilkan informasi yang relevan bagi tujuan penelitian ini. Pengolahan data ini melibatkan beberapa analisis utama:

- **Grafik Tekanan–Waktu**

Grafik ini digunakan untuk memantau fluktuasi tekanan pada titik-titik kritis dalam sistem perpipaan selama periode simulasi. Grafik ini memberikan gambaran yang jelas mengenai bagaimana perubahan tekanan terjadi seiring dengan waktu penutupan katup, yang menjadi dasar untuk menganalisis hubungan antara waktu penutupan katup dan lonjakan tekanan.

- **Nilai Tekanan Puncak ( $\Delta P$ )**

Untuk setiap skenario simulasi, nilai tekanan puncak dihitung sebagai selisih antara tekanan maksimum ( $\Delta P$ ) yang tercatat dan tekanan normal pada sistem.  $\Delta P$  ini menjadi indikator utama dalam mengukur tingkat risiko *water hammer* yang terjadi.

Nilai  $\Delta P$  yang lebih tinggi menunjukkan bahwa lonjakan tekanan lebih besar, yang berpotensi merusak pipa dan komponen sistem lainnya.

- **Distribusi Tekanan Sepanjang Pipa**

Analisis ini digunakan untuk memetakan distribusi tekanan sepanjang sistem pipa, dengan tujuan untuk mengidentifikasi lokasi rawan kerusakan yang terpengaruh oleh lonjakan tekanan yang terjadi. Data ini penting dalam menentukan titik-titik kritis di sepanjang sistem distribusi yang memerlukan perhatian ekstra dalam desain dan pengoperasian sistem.

- **Analisis Gelombang Tekanan**

Pada tahap ini, dianalisis gelombang tekanan yang terjadi akibat perubahan kecepatan aliran fluida pada saat penutupan katup. Penelitian ini memfokuskan pada karakteristik propagasi gelombang tekanan yang dapat dipengaruhi oleh faktor seperti material pipa. Hasil analisis ini memberikan wawasan mengenai bagaimana gelombang tekanan merambat dan berinteraksi dengan berbagai elemen dalam sistem perpipaan.

### **3. Perbandingan Hasil Antar Skenario**

Hasil yang diperoleh dari masing-masing skenario penutupan katup akan dibandingkan untuk mengevaluasi hubungan antara waktu penutupan katup dan tekanan puncak yang dihasilkan. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola hubungan yang jelas antara kecepatan penutupan katup dan besarnya lonjakan tekanan yang terjadi akibat *water hammer*.

Dengan perbandingan ini, akan dapat ditentukan waktu penutupan katup yang paling optimal untuk meminimalkan dampak *water hammer* tanpa mengurangi efisiensi operasional sistem.

### **4. Validasi dengan Persamaan Joukowsky**

Untuk memastikan keakuratan simulasi, hasil yang diperoleh dari model numerik divalidasi dengan Persamaan Joukowsky, yang merupakan persamaan dasar untuk menghitung fenomena *water hammer*. Proses validasi ini penting untuk memverifikasi apakah model simulasi memberikan hasil yang konsisten dengan teori analitik. Jika hasil simulasi sesuai dengan prediksi persamaan Joukowsky,

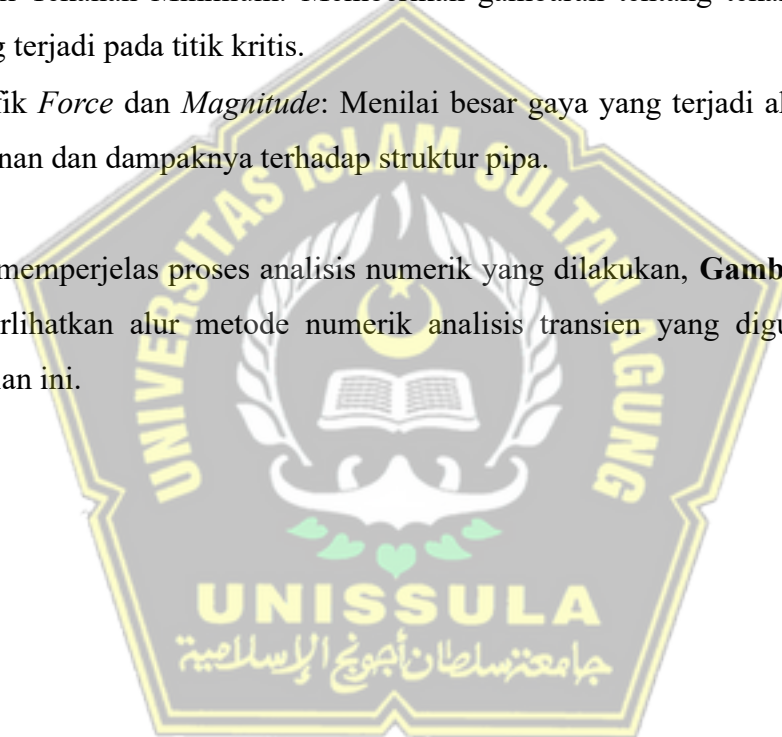
maka model numerik dianggap valid dan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan teknis di lapangan.

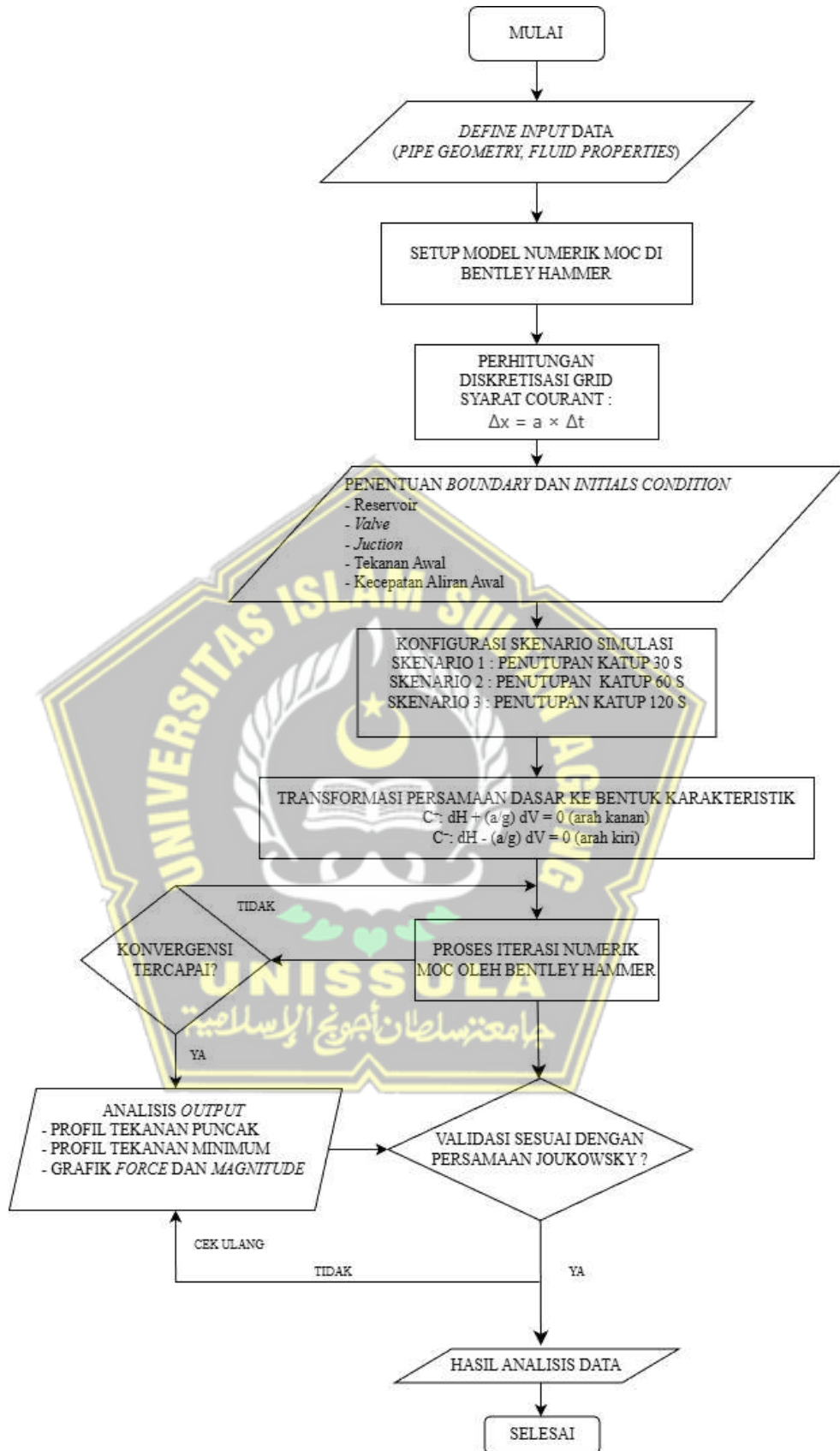
## 5. Hasil Analisis Data

Setelah proses iterasi numerik dan validasi hasil simulasi dengan persamaan Joukowsky selesai, data yang diperoleh akan dianalisis lebih lanjut untuk menghasilkan kesimpulan dan rekomendasi operasional. Analisis ini termasuk:

- Profil Tekanan Puncak: Menunjukkan dampak langsung dari variasi waktu penutupan katup terhadap lonjakan tekanan.
- Profil Tekanan Minimum: Memberikan gambaran tentang tekanan minimum yang terjadi pada titik kritis.
- Grafik *Force* dan *Magnitude*: Menilai besar gaya yang terjadi akibat lonjakan tekanan dan dampaknya terhadap struktur pipa.

Untuk memperjelas proses analisis numerik yang dilakukan, **Gambar 3.7** berikut memperlihatkan alur metode numerik analisis transien yang digunakan dalam penelitian ini.





**Gambar 3. 7** Alur Metode Numerik Analisis Transien

Sumber: Hasil Olahan Penulis, 2025

Diagram pada **Gambar 3.7** menggambarkan tahapan proses analisis transien yang digunakan dalam penelitian ini. Proses ini mencakup langkah-langkah mulai dari penentuan data masukan sistem, penerapan parameter fisik fluida, hingga simulasi dan analisis hasil menggunakan metode *Method of Characteristics (MOC)* yang diimplementasikan dalam perangkat lunak Bentley Hammer.

Setiap tahap pada alur ini memiliki peran penting untuk memastikan hasil perhitungan dan simulasi mampu merepresentasikan kondisi hidraulik secara realistis dan akurat. Rangkaian tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

#### 1. *Define Input Data* (Menentukan Data Masukan)

Tahap awal ini meliputi pengumpulan serta penginputan data teknis yang diperlukan dalam simulasi. Data yang digunakan mencakup geometri jaringan pipa (panjang, diameter, ketebalan, dan material), data topografi (elevasi sepanjang jalur pipa), serta kondisi operasi awal sistem. Selain itu, parameter fisik fluida seperti densitas ( $\rho$ ), viskositas ( $\mu$ ), dan *bulk modulus* ( $K$ ) juga ditetapkan sesuai kondisi lapangan. Pada penelitian ini, nilai parameter fluida mengacu pada standar air bersih dengan suhu operasional 28–30°C yang sesuai dengan kondisi wilayah SPAM Sepaku, Kalimantan Timur.

#### 2. *Discretize Grid*

Sistem pipa dibagi menjadi sejumlah segmen kecil (diskretisasi spasial), dan waktu simulasi dibagi menjadi langkah-langkah kecil (diskretisasi temporal). Syarat Courant ( $\Delta x = a \times \Delta t$ ) diterapkan agar solusi numerik stabil dan akurat. Proses ini memungkinkan perhitungan perubahan tekanan dan kecepatan di setiap titik sepanjang pipa pada setiap langkah waktu.

#### 3. *Define Boundary and Initial Conditions* (Menentukan Kondisi Batas dan Awal)

Tahap ini menentukan kondisi batas (*boundary conditions*) dan kondisi awal (*initial conditions*) sistem. Kondisi batas meliputi penetapan parameter hidraulik pada komponen utama seperti reservoir, katup, serta pompa, sedangkan kondisi awal menggambarkan tekanan dan kecepatan aliran fluida sebelum terjadi perubahan

mendadak (misalnya akibat penutupan katup). Nilai-nilai ini menjadi acuan awal dalam simulasi transien.

#### 4. *Solve Using Method of Characteristics* (MOC) (Penyelesaian dengan Metode Karakteristik)

Tahap ini merupakan inti dari perhitungan transien. Sistem persamaan diferensial parsial diselesaikan menggunakan MOC, yang mentransformasikan persamaan momentum dan kontinuitas menjadi dua persamaan karakteristik utama ( $C^+$  dan  $C^-$ ). Melalui pendekatan ini, nilai tekanan dan debit di setiap node dan interval waktu dapat dihitung secara berurutan, sehingga distribusi tekanan sepanjang sistem dapat diperoleh dengan akurasi tinggi.

#### 5. *Convergence Check* (Pemeriksaan Konvergensi)

Hasil komputasi dari setiap iterasi diverifikasi untuk memastikan tercapainya konvergensi, yaitu kestabilan nilai tekanan dan debit antara dua langkah perhitungan berurutan. Apabila hasil belum stabil, maka dilakukan penyempurnaan terhadap langkah waktu atau panjang segmen hingga sistem mencapai kondisi konvergen. Proses ini menjamin kestabilan numerik serta keandalan hasil simulasi.

#### 6. Validasi Hasil

Hasil simulasi numerik dibandingkan dengan perhitungan analitik sederhana (persamaan Joukowski) untuk memastikan hasil simulasi masuk akal dan dapat dipercaya. Validasi ini penting agar hasil simulasi dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis.

#### 7. *Analyze Results* (Analisis Hasil)

Setelah diperoleh hasil simulasi yang konvergen, dilakukan analisis terhadap respon tekanan dan debit. Analisis mencakup grafik tekanan–waktu (*pressure-time history*), profil tekanan sepanjang pipa, serta identifikasi titik kritis yang mengalami tekanan maksimum (*peak pressure*). Hasil analisis ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi waktu dan pola penutupan katup terhadap potensi terjadinya *water hammer* pada sistem perpipaan distribusi air.

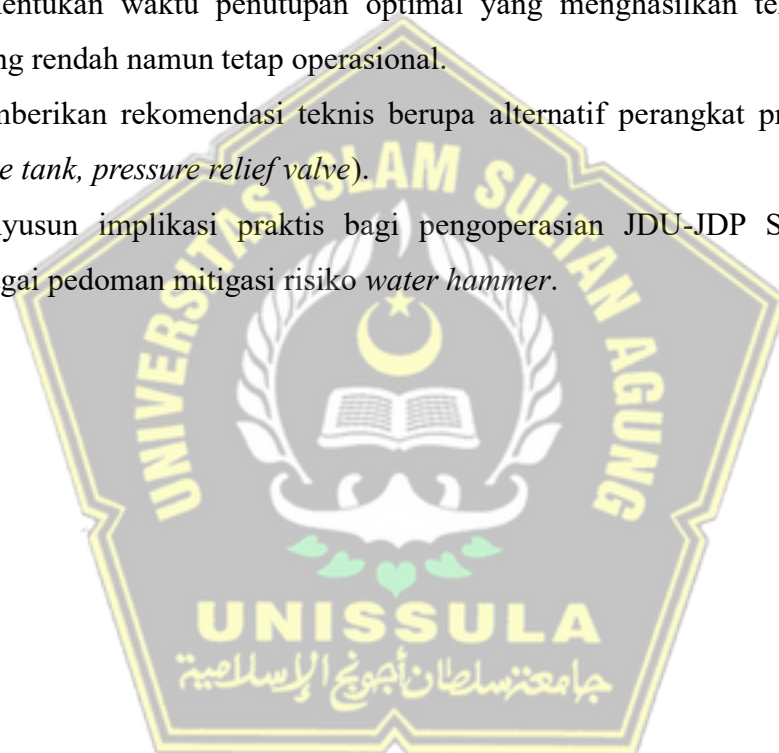
Alur ini memastikan setiap langkah simulasi dilakukan secara sistematis, sehingga hasil yang diperoleh dapat menggambarkan respon tekanan dan debit secara akurat terhadap variasi kecepatan penutupan katup.

### 3.5.5 Interpretasi dan Kesimpulan

Tahap akhir berupa interpretasi hasil simulasi untuk menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian.

Langkah-langkahnya meliputi:

1. Menentukan waktu penutupan optimal yang menghasilkan tekanan puncak paling rendah namun tetap operasional.
2. Memberikan rekomendasi teknis berupa alternatif perangkat proteksi (misal: *surge tank*, *pressure relief valve*).
3. Menyusun implikasi praktis bagi pengoperasian JDU-JDP SPAM Sepaku sebagai pedoman mitigasi risiko *water hammer*.



## **BAB IV**

### **ANALISA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1. Gambaran Umum Sistem Jaringan JDU-JDP Sub-WP 1B dan 1C**

Sistem Jaringan Distribusi Utama (JDU) dan Jaringan Distribusi Pembagi (JDP) Sub-WP 1B dan 1C merupakan bagian vital dari infrastruktur penyediaan air bersih di kawasan Sepaku, Kalimantan Timur. Sistem ini dirancang untuk menyalurkan air dari Reservoir Induk menuju dua area pelayanan utama, yaitu Pelayanan 1B dan 1C, melalui dua jalur pipa utama berdiameter besar, yakni ND 700 mm dan ND 500 mm. Di sisi lain, Jaringan Distribusi Pembagi (JDP) yang menggunakan pipa HDPE 400 mm dan 160 mm berperan penting dalam menyalurkan air ke titik distribusi lebih kecil, yaitu di persil 1B dan 1C. Pipa HDPE 160 mm ini dirancang untuk mengalirkan air dengan debit yang lebih rendah, menghubungkan pipa utama dengan area distribusi yang lebih terperinci.

Sistem ini didesain untuk mengalirkan debit besar secara kontinu dan aman, dengan memperhatikan stabilitas hidraulik dan ketahanan mekanis sesuai standar SNI dan Permen PUPR. Panjang total jaringan yang akan dianalisis  $\pm$  4.500 m, dengan konfigurasi yang mempertimbangkan variasi elevasi, kebutuhan debit puncak, serta aspek keamanan hidraulik terhadap fenomena transien seperti *water hammer*.

##### **4.1.1 Karakteristik Teknis dan Desain Pipa**

Desain pipa HDPE 160 mm yang digunakan dalam JDP persil 1B dan 1C mengacu pada standar nasional Indonesia dan standar internasional yang relevan. Pipa HDPE 160 mm dipilih untuk memastikan distribusi air yang efisien di area pembagi, dengan mempertimbangkan fleksibilitas dan ketahanan material terhadap perubahan tekanan yang cepat, seperti *water hammer*. Referensi utama yang digunakan adalah SNI 06-2428-1991 untuk pipa HDPE dan SNI 0068-2013 untuk Pipa *Steel*, yang mengatur ketentuan mengenai dimensi, ketebalan dinding, serta standar pengujian kualitas pipa.

Pipa pada kondisi actual memiliki spesifikasi teknis sebagai berikut, yang menunjukkan kualitas dan ketahanannya terhadap berbagai faktor operasional yang dapat mempengaruhi kinerja sistem distribusi air bersih:

**Tabel 4. 1** Spesifikasi Teknis Pipa *Steel*

Uraian	Kriteria Desain		Standar
	Satuan	Nilai	
Diameter pipa ND 700 mm dan ND 500 mm			
Kehilangan Air Maksimum	%	5	
Tekanan Air Dalam Pipa <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tekanan Minimum Pipa Baja</li> <li>• Tekanan Maksimum Pipa Baja</li> <li>• Lining:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Lapisan Dalam (<i>Cement lining</i>)</li> <li>Lapisan Luar (<i>Underground</i>)</li> <li>Lapisan Luar (<i>Exposed</i>)</li> </ul> </li> <li>• Sambungan Las</li> </ul>	Hmin Hmax	1 atm PN12,5	SNI 0068-2013 tentang pipa baja untuk konstruksi umum SNI 0039 – 2013 tentang Pipa baja saluran air dengan atau tanpa lapisan seng (pipa baja las melingkar/ <i>helical/spiral</i> ) AWWA C-205 HDPE 3 layer <i>Asphalt Enamel (Food Grade/Drinking Water,</i> Tahan Korosi dan Sinar UV, minimal 50thn)  SNI 07-3025-1992 tentang persyaratan sercive untuk sambungan las tersertifikasi food grade/drinking water sesuai peraturan yang

Uraian	Kriteria Desain		Standar
	Satuan	Nilai	
• Aksesoris			berlaku Amerika Utara dan Eropa Barat  Tekanan Kerja minimal sesuai dengan kebutuhan Desain dan perlindungan terhadap <i>water hammer</i>
<b>Pipa Baja 700 mm</b>			
Uraian		Ukuran (mm)	
Diameter Luar		711	
Ketebalan Pipa		12,5	
Ketebalan <i>Cement Lining</i>		13,00	
Diameter Dalam		698,5	
<b>Pipa Baja 500 mm</b>			
Uraian		Ukuran (mm)	
Diameter Luar		508	
Ketebalan Pipa		11,2	
Ketebalan <i>Cement Lining</i>		13,00	
Diameter Dalam		496,8	

Sumber: Data Teknis JDU JDP 1B 1C

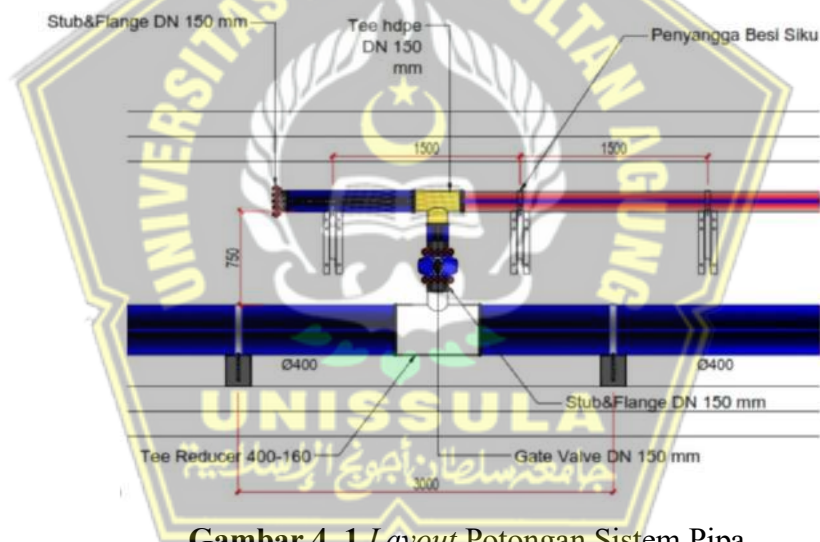
**Tabel 4. 2** Spesifikasi Teknis Pipa HDPE

Uraian	Kriteria Desain		Standar
	Satuan	Nilai	
Diameter pipa HDPE ND 400 mm dan ND 160 mm SDR13 PN 16			
Kehilangan Air Maksimum	%	5	
<b>Pipa HDPE 400 mm</b>			
Uraian		Ukuran (mm)	
Diameter Luar		400	
Ketebalan Pipa		25	
Diameter Dalam		375	

Pipa HDPE 160 mm SDR13 PN 16	
Uraian	Ukuran (mm)
Diameter Luar	182
Ketebalan Pipa	22
Diameter Dalam	160

Sumber: Data Teknis JDU JDP 1B 1C

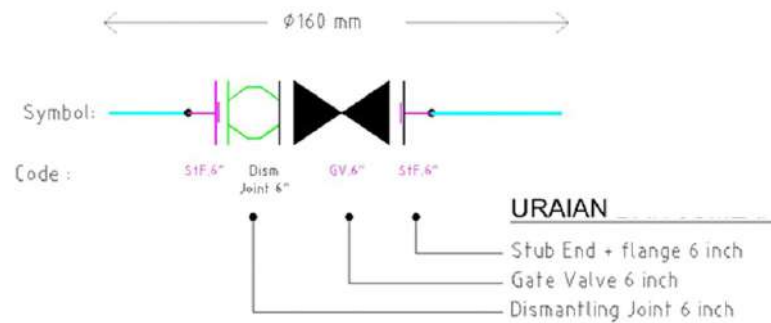
Pada Gambar 4.1 menunjukkan *layout* potongan sistem perpipaan pada area cabang, yang terdiri dari *Tee Reducer* 400-160 mm, *Gate Valve* DN 150 mm, *Stub & Flange* DN 150 mm, serta penyangga besi siku yang berfungsi menjaga kestabilan mekanis instalasi pipa. Tata letak ini menggambarkan hubungan geometris dan posisi komponen yang menjadi fokus utama dalam simulasi dan analisis tekanan transien pada penelitian ini.



**Gambar 4. 1** *Layout* Potongan Sistem Pipa

Sumber: Data JDU JDP 1B 1C

Simbol dan detail teknis dari komponen utama yang digunakan pada cabang pipa HDPE DN 160 mm, yaitu *Stub End* dengan *flange* 6 inch, *Gate Valve* 6 inch, dan *Dismantling Joint* 6 inch. Komponen-komponen ini merupakan bagian penting dalam pengaturan aliran dan pengendalian tekanan pada sistem distribusi air, serta menjadi titik kritis dalam analisis fenomena *water hammer*.



**Gambar 4. 2** Detail Komponen Cabang Pipa HDPE DN 160 mm

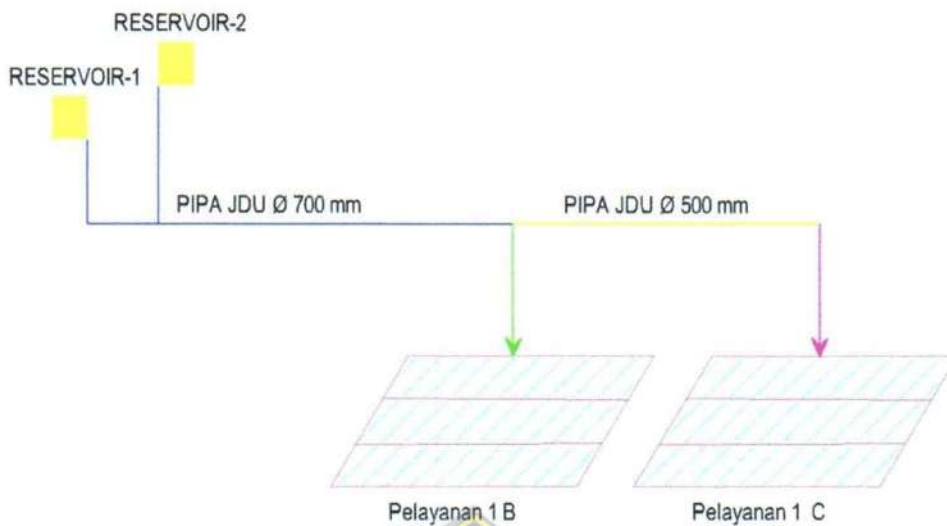
Sumber: Data JDU JDP 1B 1C

#### 4.1.2 Parameter Hidraulik Dasar

Parameter hidraulik yang digunakan dalam desain dan simulasi sistem pipa JDU Sub-WP 1B dan 1C sangat penting untuk memastikan kinerja sistem yang optimal. Beberapa parameter yang menjadi acuan dalam perancangan antara lain adalah koefisien Hazen-Williams (C), kecepatan aliran air dalam pipa, dan kehilangan tekanan maksimum yang diperbolehkan.

1. Koefisien Hazen-Williams (C) untuk pipa baja dan HDPE: 130 (SNI 0068-2013)
2. Kecepatan aliran air dalam pipa (V): 0,3–0,6 m/detik (Permen PU No. 27 Tahun 2016)
3. Kehilangan tekanan maksimum: Tidak lebih dari 30% dari total tekanan statis (head statis) pada sistem transmisi dengan pompa (Permen PU No. 27 Tahun 2016).

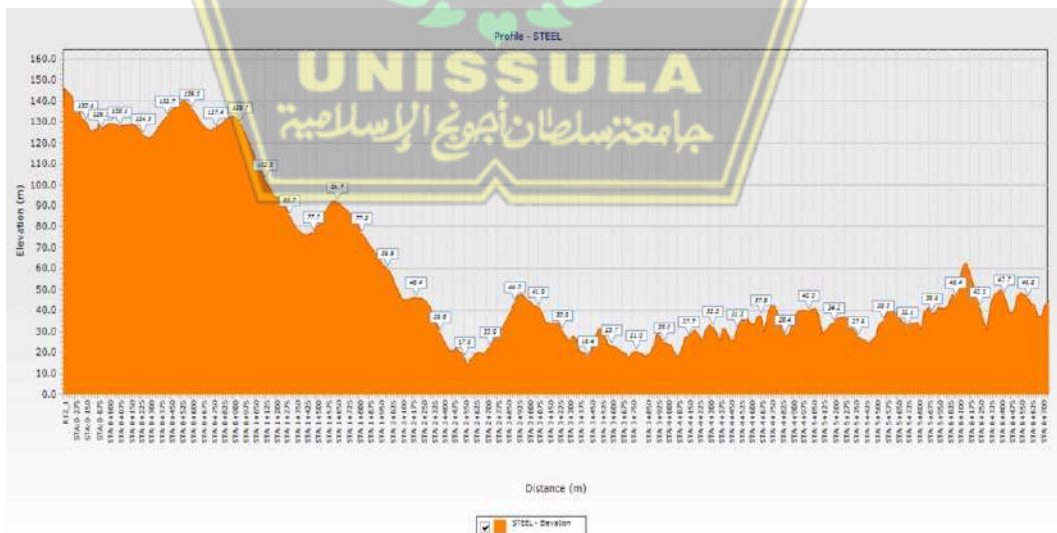
Parameter-parameter ini digunakan sebagai dasar dalam pemodelan numerik menggunakan Bentley Hammer, khususnya dalam perhitungan rugi-rugi gesekan (*friction loss*), waktu rambat gelombang, dan respons tekanan akibat penutupan *valve*.



**Gambar 4. 3** Skema Sistem Jaringan Pipa JDU Sub-WP 1B dan 1C

Sumber : Analisis Penulis, 2025

Sistem ini terdiri dari dua reservoir induk (masing-masing 6.000 m<sup>3</sup>), dengan Reservoir 1 pada elevasi +148 m dan Reservoir 2 pada elevasi +145 m. Air dialirkan secara gravitasi melalui pipa baja ND 700 mm dan ND 500 mm menuju dua area pelayanan, dengan profil elevasi yang menurun tajam hingga mencapai  $\Delta h$  geodetik sekitar 120 m.



**Gambar 4. 4** Profil Reservoir Induk Inlet 1B dan 1C

Sumber: Evaluasi Data Elevasi Hidrolis JDU 1B dan 1C

Gambar 4.4 menunjukkan profil elevasi sistem distribusi air dari Reservoir Induk 1B dan 1C, yang mengalirkan air secara gravitasi melalui pipa baja berdiameter besar menuju area pelayanan. Meskipun sistem ini mengandalkan gravitasi untuk aliran air, fenomena *water hammer* tetap dapat terjadi jika katup ditutup secara cepat.

Penutupan katup yang mendadak menyebabkan perubahan kecepatan aliran yang drastis, menghasilkan lonjakan tekanan ekstrem (*pressure surge*) yang dapat meningkatkan tekanan puncak pada sistem. Sebaliknya, jika katup dibuka kembali secara cepat atau aliran tidak terkontrol, penurunan tekanan yang tajam memicu tekanan negatif (*vacuum*), yang berisiko merusak pipa dan komponen sistem lainnya. Fluktuasi tekanan yang ekstrem ini dapat mengakibatkan kerusakan struktural pada pipa, sambungan, dan *fitting*, serta memperpendek umur sistem distribusi air.

Katup berperan penting dalam mengatur kecepatan aliran dan tekanan dalam sistem. Penutupan katup yang terlalu cepat atau pembukaan katup yang mendadak dapat menyebabkan lonjakan tekanan tinggi dan penurunan tekanan cepat yang diikuti oleh tekanan negatif. Untuk mencegah kerusakan infrastruktur, pengaturan waktu penutupan katup harus diperhatikan dengan cermat. Pengaturan waktu yang tepat dapat mengurangi risiko fluktuasi tekanan ekstrem yang berpotensi merusak sistem perpipaan.

## 4.2. Hasil Simulasi *Water Hammer* dengan Bentley Hammer

Analisis dilakukan untuk memahami perilaku alami sistem ketika terjadi penutupan katup tanpa adanya perangkat proteksi tambahan. Simulasi dilakukan menggunakan Bentley OpenFlows HAMMER, yang berbasis pada metode numerik *Method of Characteristics* (MOC). Model ini memungkinkan prediksi propagasi gelombang tekanan secara detail di sepanjang jaringan pipa.

### 4.2.1 Pengaturan Skenario Simulasi

Pengaturan skenario simulasi pada penelitian ini dirancang untuk merepresentasikan kondisi operasional aktual sistem distribusi air bersih di kawasan Persil Mayapada, yang terhubung langsung dengan Reservoir Induk melalui jaringan distribusi utama dan jaringan distribusi pembagi. Simulasi difokuskan pada analisis fenomena transien (*water hammer*) akibat penutupan valve secara bertahap pada salah satu titik kritis sistem, yaitu pada *gate valve* DN 150 mm yang terpasang pada cabang pipa HDPE 160 mm. Pengaturan skenario ini mempertimbangkan karakteristik jaringan, parameter hidraulik, serta kriteria desain yang berlaku, sehingga hasil simulasi dapat digunakan sebagai dasar evaluasi keamanan dan keandalan sistem perpipaan.

#### a. Deskripsi Sistem dan Komponen Utama

Sistem distribusi air yang dianalisis terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu Reservoir Induk sebagai sumber air, pipa transmisi baja berdiameter 500 mm dan 700 mm, serta pipa distribusi HDPE berdiameter 400 mm dan 160 mm. Transisi antara pipa utama dan cabang dilakukan menggunakan tee reducer 400-160 mm, yang berfungsi untuk menghubungkan pipa HDPE 400 mm ke pipa HDPE 160 mm secara bertahap, sehingga perubahan diameter tidak menimbulkan gangguan signifikan pada aliran maupun tekanan. Pada titik cabang ini, dipasang *gate valve* DN 150 mm yang berfungsi sebagai pengendali aliran menuju zona distribusi Persil Mayapada. Sambungan antara *valve* dan pipa menggunakan *stub & flange* DN 150 mm untuk memastikan kekuatan dan kedekatan sambungan, sedangkan penyangga besi siku digunakan untuk menjaga kestabilan instalasi pipa di lapangan.

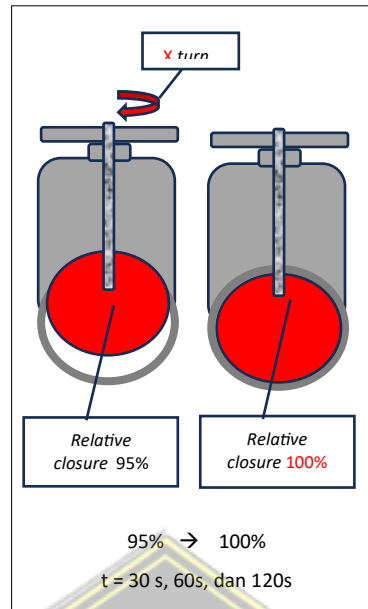
## **b. Data Dasar dan Parameter Simulasi**

Simulasi dilakukan dengan menggunakan data debit puncak ( $Q_{peak}$ ) yang telah ditetapkan berdasarkan kebutuhan sistem dan batasan desain. Debit puncak dari Reservoir Induk adalah sebesar 1050 lps, yang kemudian didistribusikan melalui jaringan pipa utama dan cabang. Untuk pipa HDPE 160 mm, debit maksimum yang diizinkan agar kecepatan aliran tidak melebihi batas desain ( $v_{max} = 6$  m/s) adalah 120,6 lps. Nilai ini diperoleh dari hasil perhitungan berdasarkan luas penampang pipa dan kecepatan maksimum yang diizinkan, sesuai dengan kriteria desain Permen PU No. 27 Tahun 2016 dan SNI 0068-2013. Koefisien Hazen-Williams (C) yang digunakan untuk pipa baja dan HDPE adalah 130, sesuai standar nasional.

Panjang pipa yang dianalisis dari Reservoir Induk hingga ke Persil Mayapada adalah  $\pm 4.500$  meter, dengan konfigurasi pipa utama baja (500 mm dan 700 mm), dilanjutkan pipa HDPE 400 mm, dan pipa HDPE 160 mm pada zona distribusi. Penempatan *valve* DN 150 mm pada cabang pipa 160 mm menjadi titik kritis untuk analisis fenomena transien akibat penutupan *valve*.

## **c. Skenario Penutupan Valve**

Skenario simulasi transien difokuskan pada proses penutupan *gate valve* DN 150 mm yang terpasang pada pipa HDPE 160 mm. Kondisi awal sistem adalah *valve* terbuka 5% (*relative closure* 95%), kemudian *valve* ditutup secara bertahap hingga posisi tertutup penuh (*relative closure* 100%). Penutupan dilakukan dengan tiga variasi durasi, yaitu 30 detik, 60 detik, dan 120 detik seperti pada **Gambar 4.5**. Pola penutupan ini diatur secara kontinu, di mana setiap interval waktu tertentu, tingkat penutupan *valve* meningkat secara bertahap hingga mencapai posisi tertutup penuh.



**Gambar 4. 5** Skema Penutupan *Valve*

Sumber: Hasil Olahan Penulis, 2025

Setiap skenario penutupan menghasilkan pola perubahan tekanan (*head*) yang berbeda sepanjang sistem pipa. Nilai *Head (Maximum, Transient)* dan *Head (Minimum, Transient)* yang dihasilkan dari simulasi merupakan indikasi tekanan maksimum dan minimum yang terjadi akibat fenomena *water hammer*. Data ini sangat penting untuk mengevaluasi apakah tekanan yang terjadi selama transien masih berada dalam batas aman desain sistem, serta untuk mengidentifikasi potensi terjadinya tekanan lebih (*overpressure*) atau tekanan negatif (subatmosferik) yang dapat membahayakan integritas pipa dan sambungan.

#### **d. Kriteria Desain dan Batasan Operasional**

Kriteria desain yang digunakan dalam simulasi mengacu pada standar nasional, yaitu kecepatan aliran minimum dan maksimum untuk pipa distribusi air bersih. Kehilangan tekanan maksimum yang diizinkan tidak boleh melebihi 30% dari tekanan statis total dalam sistem transmisi dengan pompa. Dengan demikian, debit yang digunakan pada dalam simulasi dibatasi agar kecepatan aliran tidak melampaui batas maksimum yang diizinkan. Hal ini juga memastikan bahwa tekanan yang terjadi selama proses transien tetap dalam rentang yang dapat diterima oleh sistem.

**Tabel 4. 3** Kriteria Desain dan Batasan Operasional

No	Uraian	Notasi	Kriteria
1.	Kecepatan aliran dalam Pipa		
	a. Kecepatan Minimum	V min	0,3-0,6m/det
	b. Kecepatan Maksimum	V max	3,0-4,5m/det
	Pipa HDPE	V max	6,0m/det
2.	Debit		
	Pipa <i>Steel</i> DN 700 mm	Q min	40 lps
		Q peak	1050 lps
	Pipa <i>Steel</i> DN 500 mm	Q min	40 lps
		Q peak	800 lps
	Pipa HPDE DN 400 mm	Q min	37 lps
		Q peak	700 lps
	Pipa HDPE DN 160 mm	Q min	6 lps
Q peak		120 lps	
3.	Modulus Elastisitas		
	Pipa <i>Steel</i>	E	200 GPa (200.000 Mpa)
	Pipa HDPE	E	1.0 GPa (900 Mpa)
4.	Densitas	$\rho$	995.7 kg/m <sup>3</sup>
5.	<i>Wave Speed</i>		
	Pipa HDPE	c	200 – 470 m/s
	Pipa <i>Steel</i>	c	1.000 -1400 m/s
6.	Aksesoris Pipa		
	<i>Butterfly Valve</i> DN 400 mm		
	<i>Gate Valve</i> DN 400 mm		
	<i>Gate Valve</i> DN 150 mm		
	<i>Box Water Meter</i>		
7.	Koefisien <i>Valve</i>	Cv	6600

Sumber: Data JDU JDP 1B 1C

Parameter yang diperhitungkan dalam analisis *water hammer* meliputi debit aliran, kecepatan aliran, fluida, diameter dan panjang pipa, serta karakteristik material pipa. Data tekanan dan kecepatan diperoleh melalui simulasi transien menggunakan perangkat lunak Bentley Hammer. Perangkat lunak ini memanfaatkan sensor tekanan virtual pada titik-titik tertentu di sepanjang pipa untuk merekam perubahan tekanan terhadap waktu selama proses penutupan katup.

#### e. Visualisasi dan Interpretasi Hasil

Hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk grafik tekanan dan volume udara/vapor sepanjang pipa. Setiap warna pada grafik memiliki makna tersendiri: garis merah menunjukkan tekanan maksimum, garis biru tekanan minimum, garis hitam kondisi tekanan aktual selama simulasi berjalan, dan garis hijau menggambarkan kondisi awal. Visualisasi ini memudahkan interpretasi dinamika tekanan selama proses transien dan membantu dalam mengidentifikasi titik-titik kritis yang memerlukan perhatian khusus dalam desain maupun operasi sistem.

#### 4.2.2 Hasil Simulasi: Pengaruh Variasi Kecepatan Penutupan *Valve* terhadap Tekanan Puncak

Simulasi fenomena transien akibat penutupan *valve* pada sistem distribusi air bersih di Persil Mayapada dilakukan dengan tiga variasi waktu penutupan, yaitu 30 detik, 60 detik, dan 120 detik. Simulasi ini dilakukan untuk mengevaluasi respons tekanan (*head*) dan potensi terjadinya tekanan berlebih atau tekanan negatif selama proses penutupan katup, yang berpotensi memicu fenomena *water hammer*. Pada sistem pipa ini, terdapat penggunaan *Tee Reducer* 400-160mm yang digunakan untuk melakukan penyambungan dari pipa HDPE 400mm menuju pipa HDPE 160mm. *Reducer* ini berfungsi untuk menurunkan ukuran pipa dan memastikan transisi yang halus, menghindari potensi gangguan aliran yang disebabkan oleh perbedaan diameter yang terlalu besar.

##### a. Hasil Analisis Simulasi 1 (Skenario Penutupan 30 Detik)

Pada **Tabel 4.4** skenario penutupan selama 30 detik, penutupan *valve* dilakukan secara bertahap setiap 3 detik, dengan kenaikan *relative closure* sebesar 0,5% pada setiap interval hingga mencapai 100% pada detik ke-30.

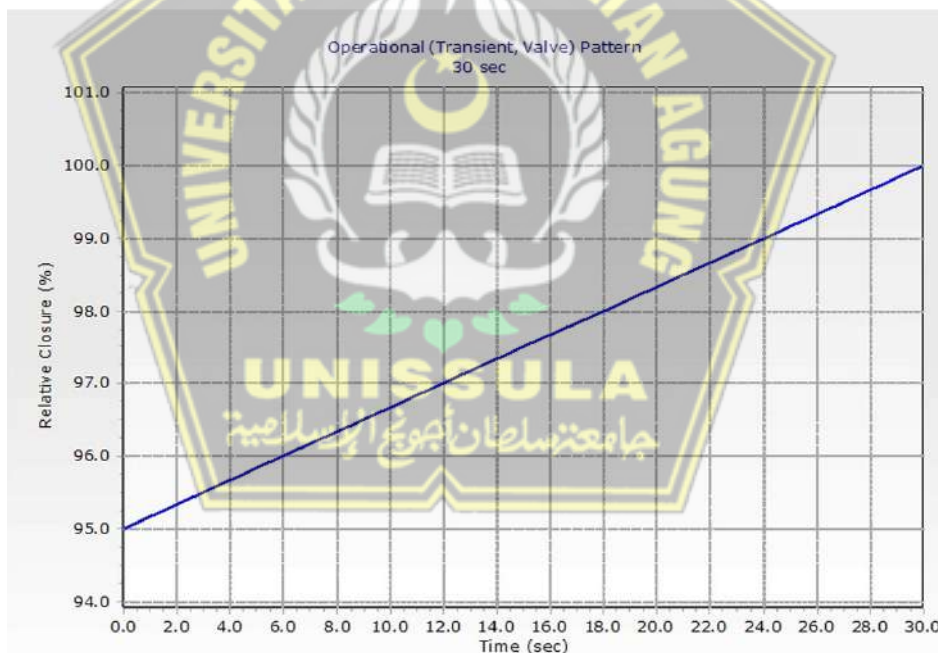
**Tabel 4. 4** Kurva Penutupan Katup Transien 30 detik

<i>Time from Start (sec)</i>	<i>Relative Closure (%)</i>
3.0	95.5
6.0	96.0
9.0	96.5
12.0	97.0

<i>Time from Start (sec)</i>	<i>Relative Closure (%)</i>
15.0	97.5
18.0	98.0
21.0	98.5
24.0	99.0
27.0	99.5
30.0	100.0

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

**Gambar 4.6** menunjukkan grafik pola penutupan katup transien selama 30 detik, yang menggambarkan hubungan antara waktu dan *relative closure* pada *valve*. Grafik ini menggambarkan proses penutupan katup yang dilakukan secara bertahap serta membantu visualisasi bagaimana perubahan relatif penutupan katup terjadi seiring berjalannya waktu dan memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai dinamika perubahan aliran yang terjadi dalam sistem.

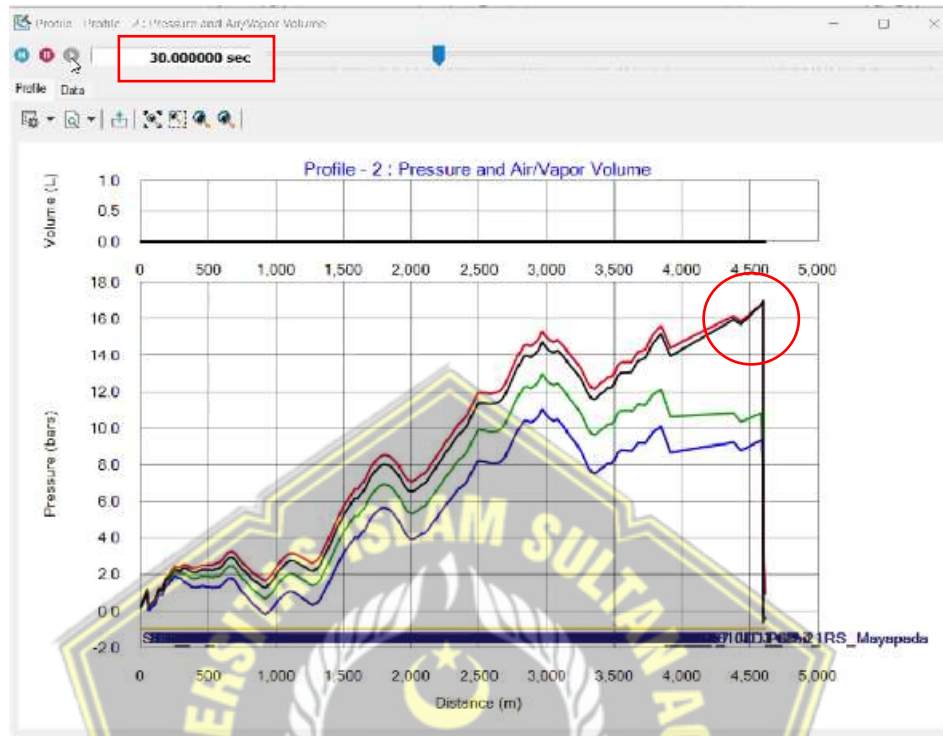


**Gambar 4. 6** Kurva Penutupan Katup Transien 30 detik

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan tekanan terjadi secara signifikan sepanjang pipa, terutama pada titik-titik dekat *valve* dan sambungan *tee reducer*. Berdasarkan data hasil simulasi, tekanan maksimum (*head maximum*,

*transient*) dan tekanan minimum (*head minimum, transient*) yang tercatat menunjukkan adanya fluktuasi tekanan yang cukup tajam, terutama pada detik ke-30.



**Gambar 4. 7** Grafik *Pressure* Hasil Analisis Simulasi 1

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Keterangan:

- : Kondisi Awal
- : Tekanan Minimum
- : Tekanan Maximum
- : Tekanan Aktual Selama Proses Penutupan

Grafik hasil simulasi pada **Gambar 4.7**, tekanan maksimum (*head maximum, transient*) tercatat sebesar **17,0 bar**, sedangkan tekanan minimum (*head minimum, transient*) turun hingga **-0,6 bar**. Rentang fluktuasi tekanan yang terjadi mencapai **17,6 bar**, menandakan adanya osilasi tekanan yang sangat ekstrem. Tekanan minimum negatif ini mengindikasikan terjadinya kondisi subatmosferik yang berpotensi menimbulkan kavitasi, yang sangat berbahaya bagi integritas pipa dan sambungan.

Proses penutupan katup yang cepat memicu lonjakan tekanan yang sangat tinggi di sistem, menciptakan fenomena *water hammer* yang mengakibatkan

tekanan bisa naik turun secara ekstrem. Lonjakan tekanan yang sangat tinggi pada skenario ini merupakan indikasi kuat terjadinya *water hammer* yang parah. Kondisi ini sangat berisiko menyebabkan kerusakan struktural pada pipa, sambungan, dan *fitting*, serta meningkatkan potensi kegagalan sistem distribusi air.

**b. Hasil Analisis Simulasi 2 (Skenario Penutupan 60 Detik)**

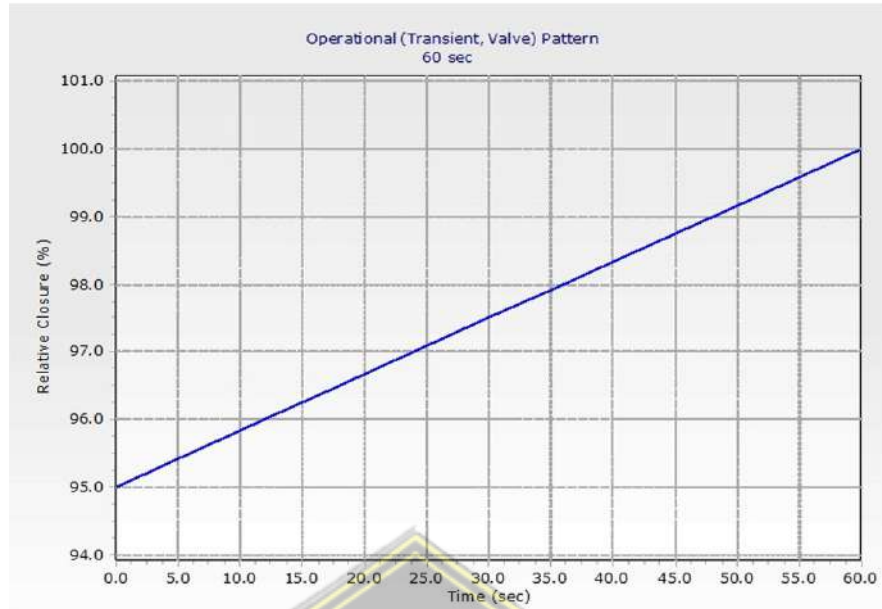
Pada **Tabel 4.5** skenario penutupan selama 60 detik, penutupan *valve* dilakukan secara bertahap setiap 6 detik, dengan kenaikan *relative closure* sebesar 0,5% pada setiap interval hingga mencapai 100% pada detik ke-60.

**Tabel 4. 5** Kurva Penutupan Katup Transien 60 detik

<i>Time from Start (sec)</i>	<i>Relative Closure (%)</i>
6.0	95.5
12.0	96.0
18.0	96.5
24.0	97.0
30.0	97.5
36.0	98.0
42.0	98.5
48.0	99.0
54.0	99.5
60.0	100.0

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

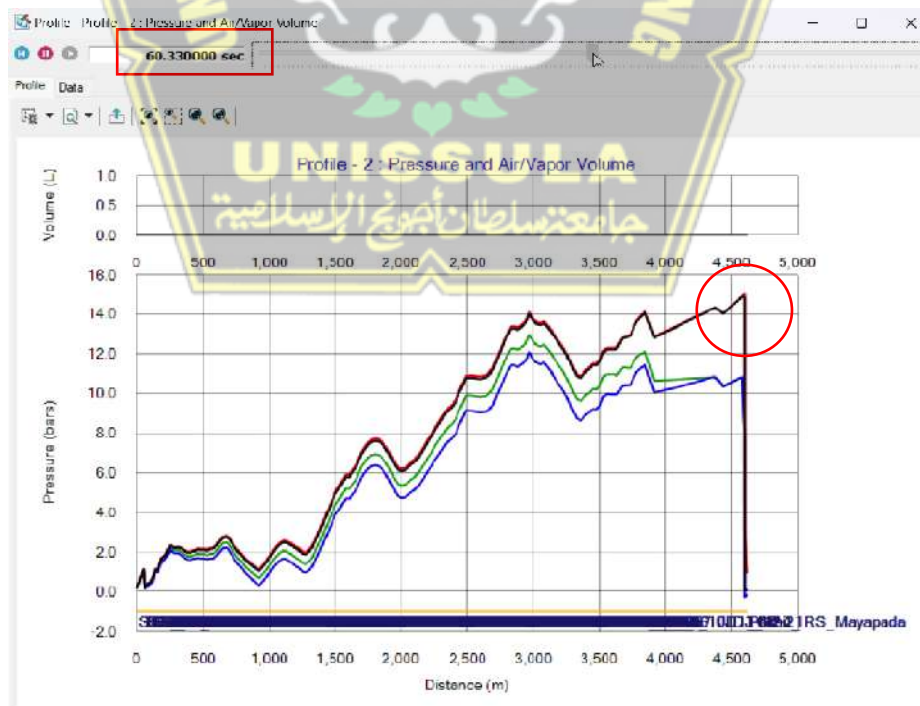
**Gambar 4.8** menunjukkan grafik pola penutupan katup transien selama 60 detik, yang menggambarkan hubungan antara waktu dan *relative closure* pada *valve*. Grafik ini menggambarkan proses penutupan katup yang dilakukan secara bertahap serta membantu visualisasi bagaimana perubahan relatif penutupan katup terjadi seiring berjalannya waktu dan memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai dinamika perubahan aliran yang terjadi dalam sistem.



**Gambar 4. 8** Kurva Penutupan Katup Transien 60 detik

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Hasil simulasi menunjukkan bahwa fluktuasi tekanan yang terjadi relatif lebih moderat dibandingkan skenario 30 detik. Tekanan maksimum dan minimum yang tercatat pada sistem masih menunjukkan adanya fenomena transien, namun dengan amplitudo yang lebih rendah.



**Gambar 4. 9** Grafik *Pressure* Hasil Analisis Simulasi 2

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Keterangan:

- : Kondisi Awal
- : Tekanan Minimum
- : Tekanan Maximum
- : Tekanan Aktual Selama Proses Penutupan

Grafik hasil simulasi pada **Gambar 4.9**, Tekanan maksimum yang tercatat adalah **15,0 bar**, sedangkan tekanan minimum mencapai **-0,3 bar**. Rentang fluktuasi tekanan sebesar **15,3 bar** menunjukkan penurunan amplitudo transien sekitar 13% dibandingkan skenario 30 detik. Meskipun tekanan minimum masih negatif, tingkat keparahan kondisi subatmosferik berkurang signifikan, sehingga risiko kavitasi dan kerusakan struktural juga menurun.

Penurunan amplitudo tekanan dan tekanan minimum yang tidak terlalu ekstrem membuktikan bahwa memperlambat proses penutupan *valve* secara signifikan menurunkan risiko *water hammer*. Namun, fenomena transien masih terjadi dan perlu diwaspadai, terutama pada operasi sistem dengan debit besar.

### c. Hasil Analisis Simulasi 3 (Skenario Penutupan 120 Detik)

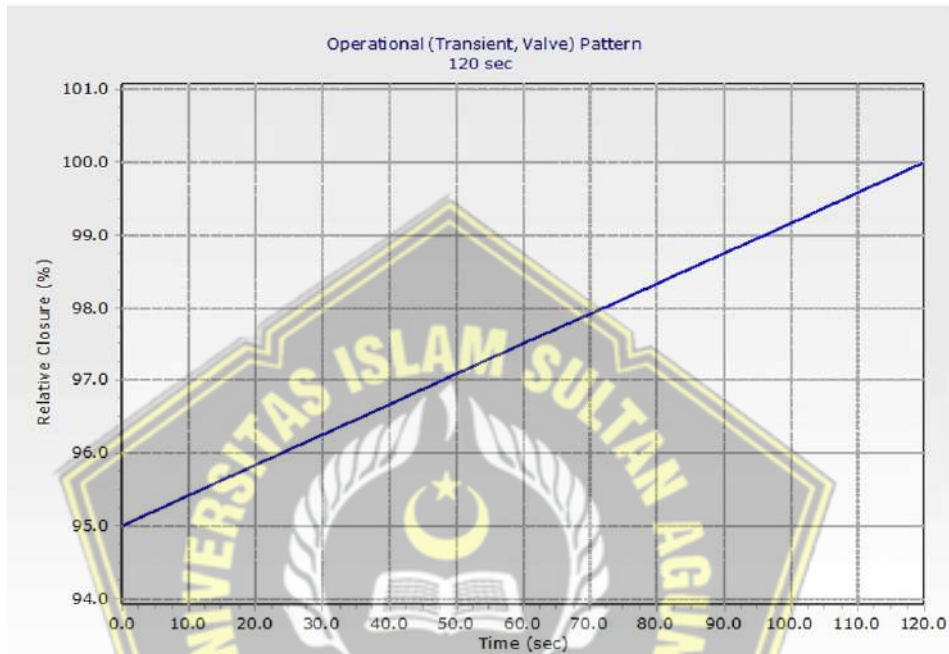
Pada **Tabel 4.6** skenario penutupan selama 120 detik, penutupan *valve* dilakukan secara bertahap setiap 12 detik, dengan kenaikan *relative closure* sebesar 0,5% pada setiap interval hingga mencapai 100% pada detik ke-120.

**Tabel 4. 6** Kurva Penutupan Katup Transien 120 detik

<i>Time from Start (sec)</i>	<i>Relative Closure (%)</i>
12.0	95.5
24.0	96.0
36.0	96.5
48.0	97.0
60.0	97.5
72.0	98.0
84.0	98.5
96.0	99.0
108.0	99.5
120.0	100.0

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

**Gambar 4.10** menunjukkan grafik pola penutupan katup transien selama 120 detik, yang menggambarkan hubungan antara waktu dan *relative closure* pada *valve*. Grafik ini menggambarkan proses penutupan katup yang dilakukan secara bertahap serta membantu visualisasi bagaimana perubahan relatif penutupan katup terjadi seiring berjalannya waktu dan memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai dinamika perubahan aliran yang terjadi dalam sistem.



**Gambar 4. 10** Kurva Penutupan Katup Transien 120 detik

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tekanan maksimum dan minimum yang terjadi selama proses transien jauh lebih stabil dan tidak menunjukkan lonjakan tekanan yang ekstrem.



**Tabel 4. 7** Rekapitulasi *Pressure* Hasil Simulasi

<b>Parameter</b>	<b>30 detik</b>	<b>60 detik</b>	<b>120 detik</b>
Tekanan Maksimum (bar)	17,0	15,0	13,8
Tekanan Minimum (bar)	-0,6	-0,3	-0,1
Rentang Fluktuasi	17,6	15,3	13,9
Risiko <i>Water Hammer</i>	Sangat Tinggi	Sedang	Rendah

Sumber: Analisa Penulis, 2025.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa waktu penutupan katup yang lebih lama dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengurangi risiko kerusakan akibat *water hammer* dalam jaringan distribusi air. Penutupan katup yang dilakukan secara bertahap dan dalam waktu yang lebih lama membantu mengurangi intensitas lonjakan tekanan dan memberikan waktu bagi sistem untuk menyesuaikan diri dengan perubahan aliran, yang pada gilirannya meningkatkan umur panjang dan keandalan infrastruktur perpipaan.

#### **4.2.3 Distribusi Tekanan Akibat Penutupan Katup Cepat**

Distribusi tekanan sepanjang sistem perpipaan sangat dipengaruhi oleh kecepatan penutupan katup, khususnya pada skenario penutupan katup secara cepat. Distribusi tekanan sepanjang pipa dapat divisualisasikan melalui grafik hasil simulasi. Pada grafik tersebut, terlihat bahwa tekanan puncak terjadi di titik-titik dekat katup, kemudian menurun secara bertahap seiring bertambahnya jarak dari katup. Fenomena ini menunjukkan bahwa efek *water hammer* paling besar terjadi di sekitar lokasi penutupan katup, dan secara bertahap teredam oleh gesekan dan karakteristik hidraulik pipa di sepanjang lintasan aliran.

Secara fisik, fenomena ini terjadi akibat perubahan momentum aliran yang sangat cepat ketika katup ditutup dalam waktu singkat. Penutupan katup yang cepat menyebabkan kecepatan aliran turun secara mendadak, sehingga terbentuk gelombang tekanan yang merambat sepanjang pipa dengan kecepatan tertentu. Gelombang tekanan ini memantul pada batas-batas sistem dan menghasilkan lonjakan tekanan puncak (*water hammer*). Sebaliknya, penutupan katup yang lebih lambat memberikan waktu bagi sistem untuk menyesuaikan perubahan kecepatan

aliran, sehingga energi gelombang tekanan yang terbentuk lebih kecil dan tekanan puncak yang terjadi dapat ditekan

Selain itu, distribusi tekanan yang tidak merata juga dapat menyebabkan terjadinya tekanan negatif di beberapa titik, terutama pada bagian pipa yang jauh dari sumber tekanan utama. Kondisi ini sangat berbahaya karena dapat memicu masuknya udara ke dalam sistem (*air ingress*) atau bahkan menyebabkan kerusakan struktural akibat kavitasi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap distribusi tekanan akibat penutupan katup cepat sangat penting dalam perancangan dan pengoperasian sistem perpipaan, agar dapat diantisipasi dengan pemasangan perangkat pelindung seperti *air valve* atau *surge tank* pada lokasi-lokasi strategis.

Secara keseluruhan, hasil simulasi pada skenario penutupan katup cepat menegaskan bahwa kecepatan penutupan katup merupakan faktor kritis yang sangat mempengaruhi distribusi tekanan dan keamanan sistem perpipaan. Penutupan katup yang terlalu cepat dapat menyebabkan lonjakan tekanan yang membahayakan, sehingga diperlukan pengaturan waktu penutupan yang optimal untuk menjaga integritas sistem distribusi air bersih.

#### **4.2.4 Profil Gelombang Tekanan pada Titik Pengukuran**

Analisis profil gelombang tekanan pada titik-titik pengukuran sangat penting untuk memahami respons dinamis sistem perpipaan terhadap fenomena transien akibat penutupan katup. Pada studi ini, profil gelombang tekanan dan gaya yang bekerja diamati pada beberapa titik strategis di jaringan distribusi air bersih Persil Mayapada, khususnya pada area sekitar katup utama DN 150 mm dan sambungan pipa HDPE 400-160 mm. Monitoring dilakukan secara komprehensif pada tiga skenario waktu penutupan katup: 30 detik, 60 detik, dan 120 detik. Fenomena ini juga diamati pada eksperimen dua-fase oleh (A. Bergant et al., 2010), di mana tekanan puncak dan depresi dapat menyebabkan kerusakan mekanis pada sambungan dan *support* pipa.

Berdasarkan hasil simulasi transien, diperoleh data *force*, serta resultan gaya (*magnitude*) pada masing-masing titik pengukuran. Grafik hasil simulasi memperlihatkan perubahan gaya secara signifikan sepanjang waktu penutupan katup, yang secara langsung merefleksikan profil gelombang tekanan dalam sistem.

### a. Skenario Penutupan 30 detik



**Gambar 4. 12** Grafik Pola Perubahan Gaya pada Penutupan *Valve* 30 Detik

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Pada skenario penutupan tercepat (30 detik), grafik gaya menunjukkan adanya lonjakan gaya yang sangat tajam sesaat setelah katup mulai menutup. Terlihat bahwa gaya pada sumbu X (biru), Y (orange), dan Z (hijau) mengalami perubahan mendadak, dengan puncak gaya *magnitude* (ungu) terjadi pada sekitar detik ke-25 hingga ke-35. Fenomena ini merupakan representasi dari gelombang tekanan (*water hammer*) yang menyebar cepat ke seluruh sistem, menyebabkan variasi tekanan yang ekstrem dan dapat membahayakan integritas pipa serta sambungan mekanis. Pola gaya yang fluktuatif ini juga menandakan terjadinya refleksi dan transmisi gelombang tekanan di titik-titik perubahan geometri dan material pipa.

## b. Skenario Penutupan 60 detik



**Gambar 4.13** Grafik Pola Perubahan Gaya pada Penutupan *Valve* 60 Detik

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Pada skenario penutupan 60 detik, profil gelombang tekanan menunjukkan fluktuasi yang lebih moderat dibandingkan skenario 30 detik. Grafik gaya pada sumbu X, Y, dan Z tetap mengalami perubahan, namun amplitudo lonjakan gaya *magnitude* lebih terkendali dan tidak se-ekstrem skenario tercepat. Peningkatan gaya masih terlihat pada fase awal penutupan, tetapi sistem lebih cepat kembali ke keadaan stabil setelah katup tertutup penuh. Hal ini menunjukkan bahwa dengan memperlambat waktu penutupan, propagasi gelombang tekanan menjadi lebih lambat dan energi transien dapat diredam secara bertahap, sehingga risiko kerusakan akibat tekanan mendadak dapat diminimalkan.

### c. Skenario Penutupan 120 detik



**Gambar 4.14** Grafik Pola Perubahan Gaya pada Penutupan Valve 120 Detik

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Pada skenario penutupan yang paling lambat (120 detik), grafik gaya pada semua sumbu menunjukkan perubahan yang sangat gradual dan terkontrol. Tidak ditemukan lonjakan gaya yang tajam, dan nilai gaya *magnitude* cenderung stabil sepanjang proses penutupan. Profil gelombang tekanan yang dihasilkan sangat halus, menunjukkan bahwa sistem mampu meredam efek transien secara optimal. Dengan demikian, risiko terjadinya kerusakan akibat tekanan dinamis dapat diminimalisir secara signifikan pada skenario ini.

Gambar 4.12 hingga 4.14 memperlihatkan hasil simulasi gaya pada titik pengukuran untuk masing-masing skenario waktu penutupan katup. Setiap sumbu gaya divisualisasikan secara terpisah, sedangkan gaya resultan (*magnitude*) menunjukkan besarnya total gaya yang diterima pipa pada titik tersebut sebagai akibat dari gelombang tekanan yang terjadi.

Profil gelombang tekanan yang terekam pada setiap titik pengukuran mempertegas peran waktu penutupan katup terhadap perilaku dinamis sistem perpipaan. Penutupan katup yang lebih cepat menghasilkan gelombang tekanan dengan amplitudo tinggi dan perubahan mendadak, sedangkan penutupan lebih

lambat mampu menurunkan amplitudo dan memperhalus profil gelombang tekanan. Hal ini menjadi dasar penting dalam penentuan strategi operasi katup dan pemilihan material sambungan serta penyangga pipa, terutama pada area rawan seperti sambungan *tee reducer* dan *valve* DN 150 mm.

Dengan demikian, pemantauan dan analisis profil gelombang tekanan pada titik-titik kritis sangat diperlukan untuk memastikan sistem distribusi air tetap aman, andal, dan berumur panjang, terutama dalam menghadapi kondisi operasi transien yang tidak terduga.

### **4.3. Analisis Hasil Simulasi terhadap Variasi Waktu Penutupan Katup**

Fenomena *water hammer* dapat menghasilkan lonjakan tekanan yang tinggi dalam sistem pipa ketika katup ditutup mendadak. Dampak dari lonjakan tekanan ini bisa sangat merusak, menyebabkan kerusakan pipa, sambungan pipa, atau bahkan katup itu sendiri. Salah satu faktor yang mempengaruhi besar kecilnya lonjakan tekanan adalah waktu penutupan katup. Penutupan katup yang cepat dapat menghasilkan lonjakan tekanan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan penutupan yang lebih lambat.

Pada penelitian ini, simulasi *water hammer* telah dilakukan menggunakan perangkat lunak Bentley Hammer, dengan fokus pada pengaruh variasi waktu penutupan katup terhadap pola dan intensitas lonjakan tekanan. Variasi waktu penutupan katup yang diuji adalah 30 detik, 60 detik, dan 120 detik, dengan tujuan untuk menganalisis seberapa besar pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap intensitas dan distribusi gelombang tekanan dalam sistem pipa.

#### **4.3.1 Perbandingan Tekanan Puncak**

Dalam analisis fenomena *water hammer*, tekanan puncak merupakan salah satu parameter utama yang sangat penting untuk diperhatikan, karena dapat memberikan gambaran mengenai potensi kerusakan yang dapat terjadi pada sistem pipa. Tekanan puncak terjadi ketika perubahan aliran dalam pipa (akibat penutupan katup mendadak) menyebabkan gelombang tekanan yang sangat besar. Fenomena ini berpotensi merusak pipa, katup, dan sambungan dalam sistem distribusi air.

Berdasarkan data hasil simulasi, tekanan puncak tertinggi tercatat pada skenario penutupan tercepat, yaitu 30 detik, dengan nilai tekanan maksimum mencapai **17,0 bar** dan tekanan minimum turun hingga **-0,6 bar**. Pada skenario penutupan 60 detik, tekanan maksimum yang terjadi adalah **15,0 bar** dengan tekanan minimum **-0,3 bar**. Sementara itu, pada skenario penutupan paling lambat, yaitu 120 detik, tekanan maksimum tercatat sebesar **13,8 bar** dan tekanan minimum hanya **-0,1 bar**. Data ini menunjukkan adanya penurunan tekanan puncak yang signifikan seiring dengan bertambahnya waktu penutupan katup.

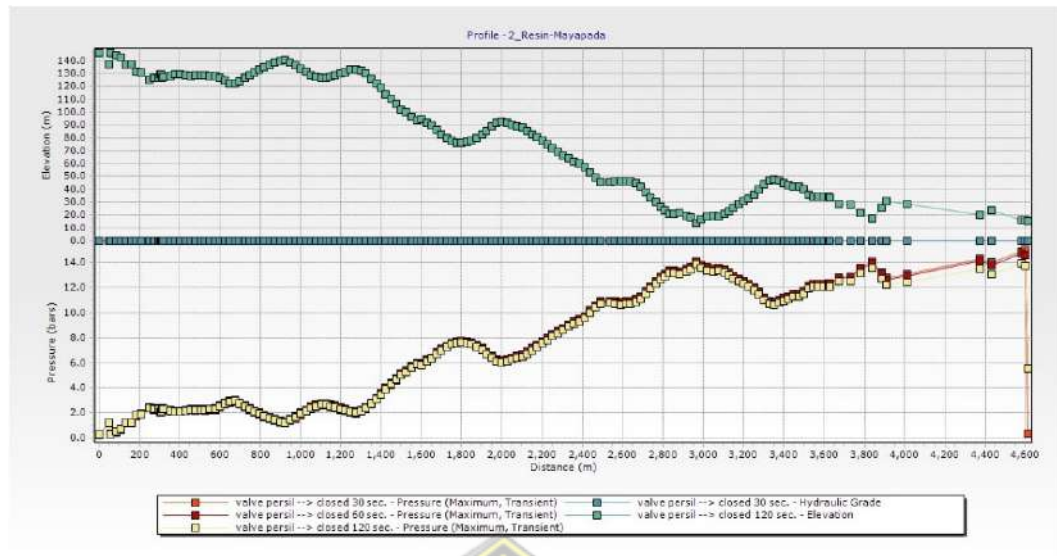
Sejalan dengan penelitian (Kodura, 2016) yang menunjukkan bahwa penutupan katup yang lebih lambat dapat mengurangi dampak *water hammer*, terutama pada sistem pipa yang membawa aliran dengan kecepatan tinggi. Hasil ini juga mendukung temuan (Han et al., 2022; Miji Cherian et al., 2022) yang mengidentifikasi bahwa waktu penutupan katup yang lebih cepat dapat menyebabkan lonjakan tekanan yang lebih tinggi, sementara penutupan yang lebih lambat membantu meredam efek tersebut.

**Tabel 4. 8** Ringkasan *Pressure* pada Tiap Variasi Waktu Penutupan Katup

Waktu Penutupan (detik)	Tekanan Puncak (bar)	Tekanan Minimum (bar)
30 detik	17,0	-0,6
60 detik	15,0	-0,3
120 detik	13,8	-0,1

Sumber: Analisis Penulis, 2025.

Dari Hasil simulasi, memperlihatkan bahwa semakin cepat waktu penutupan katup, semakin besar lonjakan tekanan yang terjadi di dalam sistem. Lonjakan tekanan yang tinggi pada skenario 30 detik merupakan indikasi kuat terjadinya fenomena *water hammer* yang berpotensi menimbulkan kerusakan pada pipa, sambungan, dan komponen pendukung lainnya. Sebaliknya, penutupan katup secara perlahan selama 120 detik mampu meredam efek transien secara signifikan, sehingga tekanan puncak yang terjadi jauh lebih rendah dan sistem menjadi lebih aman.



**Gambar 4. 15** Profil Elevasi dan Distribusi Tekanan pada Sistem Perpipaan dengan Variasi Waktu Penutupan Katup

Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer

Visualisasi *profile* berikut juga memperkuat temuan ini. Pada skenario 30 detik, grafik tekanan menunjukkan puncak yang sangat tajam dan fluktuasi yang ekstrem, sedangkan pada skenario 60 detik dan 120 detik, puncak tekanan cenderung lebih landai dan stabil. Hal ini sejalan dengan prinsip dasar fenomena *water hammer*, di mana kecepatan penutupan katup sangat mempengaruhi besarnya tekanan gelombang yang dihasilkan.

Dari hasil perbandingan ini, dapat disimpulkan bahwa pengaturan waktu penutupan katup yang lebih lambat sangat direkomendasikan untuk meminimalkan risiko *water hammer* dan menjaga integritas sistem distribusi air bersih. Penutupan katup selama 120 detik terbukti memberikan tekanan puncak terendah dan fluktuasi tekanan yang paling moderat, sehingga menjadi pilihan terbaik dalam operasi sistem perpipaan yang aman dan andal.

#### 4.3.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Waktu Penutupan Katup terhadap Lonjakan Tekanan Puncak

Waktu penutupan katup merupakan salah satu parameter paling kritis yang memengaruhi karakteristik transien tekanan di dalam sistem perpipaan. Berdasarkan hasil simulasi transien menggunakan perangkat lunak Bentley Hammer, pengaruh variasi waktu penutupan katup terhadap tekanan puncak dan

fluktuasi tekanan pada jaringan distribusi air bersih di kawasan Persil Mayapada dapat dianalisis secara komprehensif.

Fenomena *water hammer* yang dihasilkan dari penutupan katup cepat menyebabkan propagasi gelombang tekanan dengan amplitudo tinggi. Pada pipa HDPE yang digunakan di sistem ini, kecepatan rambat gelombang cenderung lebih rendah dibandingkan pipa baja, sehingga lonjakan tekanan secara alami sedikit teredam. Namun, jika waktu penutupan katup terlalu cepat, energi transien yang tidak teredam tetap dapat menyebabkan tekanan puncak yang membahayakan integritas pipa, sambungan, dan komponen lainnya.

Terlihat dengan jelas hubungan antara waktu penutupan katup dan karakteristik tekanan transien. Hasil ini mengonfirmasi bahwa semakin lambat proses penutupan katup, semakin kecil tekanan puncak dan fluktuasi tekanan yang terjadi. Dengan demikian, pengaturan waktu penutupan katup menjadi strategi mitigasi utama untuk meminimalkan risiko *water hammer* dan menjaga keandalan sistem perpipaan.

Dengan memperlambat waktu penutupan katup, sistem distribusi air bersih tidak hanya mengalami tekanan transien yang lebih rendah, tetapi juga menurunkan risiko terjadinya tekanan negatif dan potensi kavitasi. Oleh karena itu, dalam perancangan dan pengoperasian sistem perpipaan, disarankan untuk selalu mempertimbangkan aspek waktu penutupan katup sebagai upaya perlindungan terhadap fenomena *water hammer*, khususnya pada area-area rawan seperti sambungan *tee reducer*, *valve*, dan *flange*.

### **4.3.3 Perubahan Tekanan Sepanjang Pipa**

Pada fenomena *water hammer*, perubahan tekanan yang terjadi tidak hanya terbatas pada titik pengukuran yang dekat dengan katup, tetapi juga mempengaruhi seluruh sistem pipa. Gelombang tekanan yang dihasilkan oleh penutupan katup mendadak akan merambat sepanjang pipa dan mengakibatkan perubahan tekanan di berbagai titik sepanjang pipa. Oleh karena itu, sangat penting untuk mempelajari bagaimana tekanan berubah sepanjang pipa setelah terjadi *water hammer*.

Dalam simulasi skenario penutupan katup 30 detik, tekanan maksimum yang tercatat mencapai 17,0 bar, sementara tekanan minimum turun hingga -0,6 bar.

Grafik gaya pada sumbu X, Y, dan Z menunjukkan fluktuasi yang tajam, dengan gaya resultan (*Force Magnitude*) mencapai puncak sekitar **6.000.000 N**, seperti yang terlihat pada **Gambar 4.12**. Lonjakan tekanan yang signifikan ini terjadi akibat perubahan kecepatan aliran yang mendadak, sehingga menghasilkan gelombang tekanan (*water hammer*) yang menyebar di sepanjang pipa. Area dekat *valve* dan sambungan *tee reducer* menjadi titik kritis yang mengalami tekanan ekstrem.

Berbeda dengan skenario 30 detik, pada penutupan 60 detik, tekanan maksimum tercatat sebesar 15,0 bar dan tekanan minimum turun hanya hingga -0,3 bar. **Gambar 4.13** menunjukkan bahwa fluktuasi gaya yang terjadi lebih moderat dibandingkan skenario tercepat. Hal ini menunjukkan bahwa memperpanjang waktu penutupan katup mampu menurunkan amplitudo perubahan tekanan sepanjang pipa, sehingga mengurangi risiko kerusakan akibat tekanan dinamis.

Pada penutupan katup yang paling lambat, yaitu 120 detik, tekanan maksimum tercatat sebesar 13,8 bar, sementara tekanan minimum hanya turun hingga -0,1 bar. Grafik gaya pada **Gambar 4.14** menunjukkan pola perubahan yang sangat gradual dengan distribusi tekanan yang lebih stabil di sepanjang pipa. Sistem mampu meredam efek transien secara optimal, sehingga risiko terjadinya tekanan negatif atau kavitasi dapat diminimalkan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa waktu penutupan katup memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi tekanan sepanjang pipa. Penutupan katup yang lebih cepat menghasilkan gelombang tekanan yang lebih tajam, yang terdeteksi pada titik pengukuran yang lebih dekat dengan katup. Di sisi lain, penutupan katup yang lebih lambat memungkinkan gelombang tekanan meredam lebih halus, dengan tekanan yang lebih terdistribusi secara merata sepanjang pipa.

Secara keseluruhan, gelombang tekanan yang dihasilkan dari *water hammer* merambat melalui pipa, dan tekanan puncak yang terjadi lebih besar pada titik-titik yang lebih dekat dengan katup, serta berkurang seiring bertambahnya jarak dari katup. Oleh karena itu, pemilihan waktu penutupan katup yang tepat sangat penting untuk mengendalikan dampak dari fenomena *water hammer* dan mengurangi risiko kerusakan pada sistem pipa.

Analisis pressure envelope menunjukkan bahwa perubahan waktu tidak hanya menurunkan tekanan puncak, tetapi juga meratakan profil tekanan sehingga lebih aman terhadap sambungan pipa, *fitting*, dan *air valve*. Titik dengan fluktuasi terbesar tetap berada di dekat katup dan *high point*.

#### 4.3.4 Identifikasi Titik Rawan

Dalam analisis *water hammer*, penting untuk mengidentifikasi titik-titik rawan yang paling rentan terhadap dampak lonjakan tekanan. Fenomena *water hammer* dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan pada sistem pipa, seperti pecahnya pipa, kerusakan sambungan, dan kerusakan katup. Oleh karena itu, untuk merancang sistem distribusi air yang lebih aman dan efisien, sangat penting untuk mengetahui titik-titik mana saja yang paling rentan terhadap lonjakan tekanan yang dihasilkan selama proses transien, khususnya ketika katup ditutup dengan cepat.

Proses identifikasi titik rawan dalam sistem pipa ini dilakukan menggunakan hasil simulasi Bentley Hammer, yang memungkinkan untuk menganalisis distribusi tekanan sepanjang jaringan pipa pada berbagai waktu penutupan katup. Pipa yang difokuskan dalam simulasi ini adalah HDPE 160mm, namun juga mempertimbangkan seluruh jaringan yang terhubung secara hidraulik, termasuk pipa HDPE 400 mm, *steel* 500 mm, dan *steel* 700 mm. Hal ini dikarenakan gelombang tekanan akibat *water hammer* akan merambat ke seluruh sistem pipa yang terhubung, sehingga potensi kerusakan tidak terbatas hanya pada satu jenis material atau diameter pipa saja.

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa lonjakan tekanan dan gaya paling besar terjadi di area yang berdekatan dengan *Gate Valve* DN 150 mm. Titik ini menjadi pusat pembangkitan gelombang tekanan akibat perubahan aliran mendadak saat katup ditutup. Grafik gaya pada skenario penutupan 30 detik menunjukkan lonjakan gaya yang sangat tajam pada sumbu Y dan magnitude, menandakan adanya beban dinamis besar yang harus ditahan oleh sambungan dan penyangga di sekitar *valve*. Selain itu, tekanan maksimum yang tercatat pada titik ini mencapai 17,0 bar, dengan tekanan minimum -0,6 bar, yang berisiko menimbulkan kavitasi dan kerusakan mekanis.

Selain di sekitar *valve*, titik rawan juga teridentifikasi pada sambungan *Tee Reducer* 400-160 mm dan *Stub & Flange* DN 150 mm. Area ini merupakan titik transisi antara pipa berdiameter besar (HDPE 400 mm) ke pipa berdiameter lebih kecil (HDPE 160 mm), sehingga perubahan kecepatan dan distribusi tekanan menjadi lebih ekstrem. Sambungan mekanis di titik ini sangat rentan terhadap kelelahan material akibat fluktuasi tekanan dan gaya berulang selama siklus transien.

Pipa-pipa yang berada pada jalur dengan kecepatan aliran tinggi, terutama yang memiliki perubahan elevasi, juga menjadi titik rawan. Perbedaan ketinggian mempengaruhi distribusi tekanan dan memperbesar efek refleksi gelombang tekanan, sehingga area dengan perubahan elevasi perlu mendapatkan perhatian khusus dalam desain proteksi. Penting untuk dicatat bahwa meskipun lonjakan terbesar terjadi di dekat *valve*, efek transien tetap merambat ke seluruh jaringan, termasuk pipa *steel* 700 mm dan 500 mm yang terhubung dalam sistem. Pipa baja, meskipun lebih kaku, memiliki kecepatan gelombang yang lebih tinggi sehingga dapat mengalami lonjakan tekanan yang lebih cepat dan besar jika tidak diantisipasi. Seluruh system baik pipa HDPE maupun *steel* harus dievaluasi terhadap risiko *water hammer*, terutama pada titik-titik sambungan, perubahan diameter, dan area dengan penyangga mekanis seperti penyangga besi siku. Oleh karena itu, titik-titik yang terletak lebih jauh dari katup dan berada pada jalur dengan kecepatan aliran tinggi juga berisiko tinggi, meskipun lonjakan tekanan di titik tersebut cenderung lebih kecil dibandingkan dengan yang terjadi di dekat katup.

#### **4.3.5 Evaluasi Model Simulasi dan Keakuratan Hasil**

Evaluasi model simulasi dan keakuratan hasil menjadi langkah penting dalam memastikan bahwa analisis transien yang dilaksanakan pada sistem perpipaan distribusi air bersih di Persil Mayapada menghasilkan interpretasi yang tepat dan dapat diandalkan. Simulasi menggunakan perangkat lunak Bentley Hammer dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai skenario waktu penutupan katup, yaitu 30 detik, 60 detik, dan 120 detik, serta kajian terhadap tekanan maksimum, tekanan minimum, dan gaya yang bekerja pada sistem.

Model simulasi dirancang berdasarkan konfigurasi aktual jaringan perpipaan di Persil Mayapada, yang melibatkan elemen-elemen kunci seperti:

- *Tee reducer* 400-160 mm: Titik perubahan diameter pipa yang menjadi area rawan lonjakan tekanan.
- *Gate valve* DN 150 mm: Komponen utama yang bertanggung jawab atas proses transien akibat penutupan.
- *Stub & Flange* DN 150 mm dan penyangga besi siku : Elemen pendukung struktural yang berfungsi menjaga stabilitas mekanis pipa.

Data geometris dan topologi sistem perpipaan yang digunakan dalam simulasi telah disesuaikan dengan kondisi lapangan, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.16, yang memperlihatkan skema instalasi jaringan.

Keakuratan hasil simulasi dinilai berdasarkan parameter berikut:

- **Tekanan Maksimum dan Minimum**

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tekanan maksimum pada waktu penutupan 30 detik mencapai **17,0 bar**, sedangkan tekanan minimum turun hingga **-0,6 bar**. Pada waktu penutupan 60 detik dan 120 detik, tekanan maksimum berturut-turut adalah **15,0 bar** dan **13,8 bar**, sedangkan tekanan minimum masing-masing adalah **-0,3 bar** dan **-0,1 bar**. Pola ini menunjukkan konsistensi model dalam merepresentasikan fenomena *water hammer* berdasarkan waktu penutupan katup.

- **Distribusi Gaya (*Force X, Y, Z*, dan *Magnitude*)**

Grafik gaya pada sumbu X, Y, Z, dan resultan gaya (*magnitude*) menunjukkan perubahan yang signifikan sesuai waktu penutupan. Pada Gambar 4.12, gaya pada sumbu X (biru) dan resultan gaya (ungu) untuk penutupan 30 detik menunjukkan fluktuasi tajam, indikasi kuat adanya gelombang tekanan besar. Pada penutupan 120 detik (Gambar 4.14), fluktuasi jauh lebih gradual, menandakan simulasi telah berhasil memprediksi efek redaman transien dengan waktu penutupan yang lebih lama.

#### 4.4. Interpretasi Fisik Terkait Fenomena Transien

##### 4.4.1 Hubungan Dengan Kecepatan Gelombang (*Wavespeed*)

Kecepatan gelombang atau *wavespeed* dalam sistem pipa merupakan salah satu faktor kunci yang mempengaruhi dampak dari *water hammer*. Kecepatan gelombang ini menggambarkan seberapa cepat gelombang tekanan merambat melalui pipa setelah terjadi perubahan mendadak dalam aliran fluida, seperti saat katup ditutup. Dalam fenomena *water hammer*, gelombang tekanan yang terbentuk akibat penutupan katup mendadak akan merambat sepanjang pipa, dan kecepatan gelombang ini sangat berpengaruh terhadap intensitas lonjakan tekanan yang tercatat pada titik pengukuran.

Kecepatan gelombang tekanan dalam pipa bergantung pada beberapa faktor, termasuk modulus elastisitas material pipa, kepadatan fluida, dan diameter pipa. Pada pipa HDPE, yang digunakan dalam simulasi ini, kecepatan gelombang tekanan lebih rendah dibandingkan dengan pipa yang terbuat dari material yang lebih kaku seperti baja. Selain itu, kecepatan aliran fluida juga mempengaruhi seberapa cepat gelombang tekanan merambat melalui pipa.

Kecepatan gelombang yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa gelombang tekanan akan merambat lebih cepat, memperburuk lonjakan tekanan yang terjadi, dan meningkatkan potensi kerusakan pada pipa dan sambungannya. Sebaliknya, pada pipa yang lebih elastis atau sistem dengan kecepatan gelombang yang lebih rendah, gelombang tekanan akan merambat lebih lambat, sehingga lonjakan tekanan akan lebih teredam.

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho(1 + \frac{KD}{Ee})}} \quad (2.12)$$

dengan:

K = modulus bulk fluida (Pa),

$\rho$  = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>),

D = diameter dalam pipa (m),

E = modulus elastisitas material pipa (Pa),

e = tebal dinding pipa (m).

**Tabel 4. 9** Hasil Perhitungan *Wave Speed* Tiap Jenis Pipa

<i>Pipe Type</i>	<i>Outer Diameter (mm)</i>	<i>Total Thickness (mm)</i>	<i>Inner Diameter (mm)</i>	<i>Elastic Modulus (GPa)</i>	<i>Wave Speed (m/s)</i>
HDPE 400mm	400	25.0	350.0	1.0	263.6
HDPE 160mm	182	22.0	138.0	1.0	386.4
Steel 700mm	711	25.5	660.0	200.0	1311.4
Steel 500mm	508	24.2	459.6	200.0	1351.9

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Dalam penelitian ini, analisis hubungan antara kecepatan gelombang tekanan dan tekanan puncak yang tercatat pada titik pengukuran sepanjang pipa HDPE 160mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa gelombang tekanan yang lebih cepat (akibat kecepatan gelombang yang lebih tinggi) menyebabkan lonjakan tekanan yang lebih besar dan lebih tajam di titik pengukuran yang lebih dekat dengan katup. Sementara itu, kecepatan gelombang yang lebih rendah mengurangi intensitas lonjakan tekanan, sehingga distribusi tekanan sepanjang pipa menjadi lebih merata.

Kecepatan gelombang tekanan memainkan peran yang sangat penting dalam fenomena *water hammer*. Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa gelombang tekanan yang lebih cepat menyebabkan lonjakan tekanan yang lebih besar, terutama pada waktu penutupan katup yang lebih cepat. Semakin cepat gelombang tekanan merambat, semakin besar intensitas lonjakan tekanan yang tercatat di titik pengukuran yang lebih dekat dengan katup. Oleh karena itu, kecepatan gelombang yang lebih rendah akan membantu mengurangi intensitas lonjakan tekanan, memberikan pengaruh yang lebih baik pada desain sistem pipa dan pengoperasian katup.

*Wave speed* sangat memengaruhi besarnya kenaikan tekanan akibat *water hammer*, kecepatan propagasi gelombang, dan periode osilasi tekanan. Faktor penentu *wave speed* meliputi material pipa, ketebalan dinding, tekanan internal, dan kondisi instalasi. Sistem JDU Sub-WP 1B–1C memiliki *wave speed* moderat, sehingga tekanan transien masih dapat dikendalikan dengan prosedur operasional yang tepat.

#### 4.4.2 Validitas Simulasi dengan Persamaan Joukowsky

Fenomena transien yang terjadi pada sistem perpipaan distribusi air bersih di Persil Mayapada dapat dijelaskan secara fisik dengan menggunakan Persamaan Joukowsky. Persamaan ini merupakan dasar teori untuk menghitung lonjakan tekanan akibat *water hammer*, di mana perubahan mendadak pada kecepatan aliran fluida menghasilkan gelombang tekanan yang merambat sepanjang pipa.

**Persamaan Joukowsky:**

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V \quad (2.13)$$

dengan:

$\Delta P$  = lonjakan tekanan (Pa)

$\rho$  = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)

$c$  = kecepatan rambat gelombang (m/s)

$\Delta V$  = perubahan kecepatan fluida (m/s).

Pada sistem ini, fluida yang digunakan adalah air, dengan densitas  $\rho=995,7$  kg/m<sup>3</sup>. Kecepatan gelombang tekanan ( $c$ ) bergantung pada material pipa, yang dalam kasus ini adalah terdapat pipa *Steel* DN 700 mm dan DN 500 mm, pipa HDPE DN 400 dan DN 160.

**Tabel 4. 10** Kriteria pada Pipa *Steel* dan Pipa HDPE

No	Uraian	Notasi	Kriteria
3.	Modulus Elastisitas		
	Pipa <i>Steel</i>	E	200 GPa (200.000 Mpa)
	Pipa HDPE	E	1.0 GPa (900 Mpa)
4.	Densitas	$\rho$	995.7 kg/m <sup>3</sup>
5.	<i>Wave Speed</i>		
	Pipa HDPE 400 mm	$c$	263.6 m/s
	Pipa HDPE 160 mm	$c$	386.4 m/s
	Pipa <i>Steel</i> 700 mm	$c$	1311.4 m/s
	Pipa <i>Steel</i> 500 mm	$c$	1351.9 m/s

Sumber: Analisis Penulis, 2025.

**Tabel 4. 11** Perbandingan Tekanan Puncak pada Simulasi dan Persamaan Joukowsky

Waktu Penutupan Katup (detik)	Tekanan Puncak Simulasi (bar)	Tekanan Puncak Joukowsky (bar)
30	17.0	18.7
60	15.0	16.7
120	13.8	15.4

Sumber: Analisis Penulis, 2025.

Dari tabel ini, dapat dilihat bahwa hasil simulasi memiliki kesesuaian yang baik dengan prediksi berdasarkan persamaan Joukowsky, meskipun ada sedikit perbedaan yang mungkin disebabkan oleh faktor-faktor seperti variabel fisik yang tidak tercakup dalam persamaan, seperti fluktuasi aliran atau karakteristik material pipa yang lebih kompleks, karakteristik *valve* (koefisien *valve*  $C_v = 6600$ ), serta efek minor *losses* yang tidak sepenuhnya terakomodasi dalam persamaan dasar.

Persamaan Joukowsky memberikan dasar teoritis yang kuat untuk menganalisis fenomena *water hammer* dalam sistem pipa. Hasil simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa lonjakan tekanan yang dihitung menggunakan persamaan Joukowsky mendekati hasil yang tercatat dalam simulasi Bentley Hammer, yang mengonfirmasi keakuratan model simulasi yang digunakan. Oleh karena itu, persamaan Joukowsky dapat dianggap sebagai alat yang efektif untuk memperkirakan lonjakan tekanan dalam sistem pipa yang mengalami fenomena *water hammer*.

Perhitungan analitis menggunakan persamaan Joukowsky dibandingkan dengan hasil simulasi menunjukkan bahwa tekanan simulasi sedikit lebih rendah karena memperhitungkan efek redaman, rugi-rugi energi, dan fleksibilitas dinding pipa. Hal ini juga diamati pada eksperimen (Kodura, 2016; Miji Cherian et al., 2022), di mana tekanan aktual lebih rendah dari prediksi analitik akibat efek-efek tersebut.

#### 4.4.3 Peran Gelombang Tekanan dalam Dinamika Aliran

Gelombang tekanan dalam sistem pipa memiliki peran yang sangat penting dalam dinamika aliran, terutama ketika fenomena *water hammer* terjadi. Fenomena *water hammer* dapat mempengaruhi kecepatan aliran, distribusi tekanan, serta integritas fisik dari pipa dan komponen sistem perpipaan lainnya. Gelombang tekanan ini terbentuk akibat perubahan mendadak dalam aliran, seperti yang terjadi ketika katup ditutup dengan cepat, katup dibuka atau aliran dihentikan secara mendadak.

Pada dasarnya, gelombang tekanan adalah gelombang yang bergerak dalam pipa sebagai respons terhadap perubahan kecepatan aliran fluida yang mendadak. Ketika katup ditutup dengan cepat, energi kinetik yang ada dalam aliran akan berubah menjadi energi tekanan yang menciptakan lonjakan tekanan yang bergerak melalui pipa. Gelombang tekanan ini akan mempengaruhi dinamika aliran dalam sistem pipa, terutama dalam hal perubahan tekanan dan kecepatan aliran sepanjang pipa.

Saat gelombang tekanan merambat melalui pipa, ia dapat berinteraksi dengan aliran yang sudah ada. Pada waktu penutupan katup yang cepat, perubahan kecepatan aliran sangat tajam dan menyebabkan gelombang tekanan yang lebih besar, yang pada gilirannya memperburuk dampak *water hammer*. Sebaliknya, waktu penutupan katup yang lebih lambat mengurangi intensitas perubahan aliran, menghasilkan gelombang tekanan yang lebih kecil dan lebih mudah meredam.

Gelombang tekanan yang teramati selama fenomena *water hammer* akan menyebabkan fluktuasi tekanan yang sangat cepat, yang berpotensi menyebabkan penurunan tekanan (tekanan minimum) setelah lonjakan tekanan utama, diikuti oleh pemulihan tekanan. Proses ini dikenal sebagai refleksi gelombang yang terjadi di ujung pipa atau pada titik penghalang seperti katup atau sambungan pipa.

Pada sistem pipa yang mengalami *water hammer*, gelombang tekanan yang bergerak melawan arah aliran fluida dapat menyebabkan peningkatan tekanan yang drastis pada titik pengukuran yang lebih dekat dengan katup, sementara gelombang tekanan yang bergerak ke arah aliran menyebabkan penurunan tekanan sementara sebelum akhirnya kembali ke kondisi stabil.

Penting untuk dicatat bahwa gelombang tekanan tidak hanya mempengaruhi tekanan puncak tetapi juga berperan dalam dinamika aliran secara keseluruhan.

Fluktuasi tekanan yang terjadi akibat gelombang tekanan dapat menyebabkan kerusakan mekanik pada pipa, katup, dan sambungannya jika amplitudo lonjakan tekanan terlalu besar. Fluktuasi tekanan ini dapat mempercepat keausan pipa, terutama di titik sambungan atau bagian pipa yang mengalami perubahan geometri (misalnya, belokan atau sambungan).

Selain itu, gelombang tekanan yang merambat juga mempengaruhi kelancaran aliran fluida. Pada pipa dengan gelombang tekanan yang tinggi, terjadi penurunan kelancaran aliran di sepanjang pipa, yang dapat meningkatkan gesekan fluida dan mengurangi efisiensi sistem secara keseluruhan. Dalam kondisi ekstrem, gelombang tekanan yang terlalu besar juga dapat menyebabkan kavitasi pada pipa, yang berpotensi merusak struktur pipa dan katup.

Gelombang tekanan berperan sangat penting dalam mempengaruhi dinamika aliran pada sistem pipa yang mengalami fenomena *water hammer*. Kecepatan gelombang, waktu penutupan katup, dan karakteristik material pipa semuanya mempengaruhi bagaimana gelombang tekanan merambat sepanjang pipa dan mengubah tekanan serta kecepatan aliran. Pemahaman yang baik tentang bagaimana gelombang tekanan bekerja memungkinkan kita untuk merancang sistem pipa yang lebih tahan terhadap dampak *water hammer* dan meminimalkan risiko kerusakan pada pipa dan komponen lainnya.

#### **4.5. Evaluasi Keamanan Sistem Pipa Berdasarkan Batas Kecepatan Penutupan Katup yang Aman**

##### **4.5.1 Dampak Jangka Panjang terhadap Sistem Pipa**

Fenomena *water hammer* atau lonjakan tekanan mendadak yang terjadi dalam sistem pipa dapat memberikan dampak signifikan, tidak hanya pada kinerja jangka pendek, tetapi juga pada keamanan dan ketahanan jangka panjang sistem pipa. Lonjakan tekanan yang besar akibat perubahan aliran mendadak dapat menyebabkan kerusakan pada komponen sistem perpipaan, terutama bila terjadi secara berulang. Oleh karena itu, sangat penting untuk memahami dampak jangka panjang yang dapat ditimbulkan oleh *water hammer* pada sistem pipa.

Evaluasi ini bertujuan untuk memahami potensi kerusakan yang dapat terjadi akibat tekanan transien tinggi, gaya dinamis, dan efek lainnya pada sistem distribusi air bersih di Persil Mayapada. Hasil analisis didasarkan pada simulasi numerik untuk tiga skenario penutupan katup (30 detik, 60 detik, dan 120 detik).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa waktu penutupan katup memiliki pengaruh langsung terhadap lonjakan tekanan dan gaya dinamis pada sistem perpipaan. Berikut adalah hasil utama dari ketiga skenario:

- **Simulasi Penutupan 30 Detik**

Lonjakan tekanan maksimum mencapai **17,0 bar**, dengan gaya resultan (*magnitude*) puncak sekitar **6.000.000 N** (Gambar 4.12). Lonjakan gaya tajam terjadi pada fase awal penutupan, menghasilkan fluktuasi signifikan pada gaya di sumbu X, Y, dan Z. Efek ini sangat berpotensi menyebabkan kegagalan mekanis pada sambungan, seperti *Tee Reducer* 400-160 mm, dan *flange* pipa DN 150 mm.

- **Simulasi Penutupan 60 Detik**

Tekanan maksimum menurun menjadi **15,0 bar**, dengan gaya resultan mencapai **18.000.000 N** (Gambar 4.13). Fluktuasi gaya terlihat lebih terkontrol dibandingkan penutupan 30 detik, namun masih menunjukkan risiko kerusakan jika gaya dinamis tidak diakomodasi oleh desain penyangga atau sambungan mekanis.

- **Simulasi Penutupan 120 Detik**

Tekanan maksimum hanya mencapai **13,8 bar**, dengan gaya resultan puncak sebesar **3.000.000 N** (Gambar 4.14). Pola fluktuasi gaya sangat gradual, menunjukkan stabilitas yang lebih baik. Sistem berada dalam kondisi aman tanpa risiko signifikan terhadap komponen mekanis.

Dampak jangka panjang dari *water hammer* pada sistem perpipaan dapat dikategorikan sebagai berikut:

- **Kerusakan Mekanis**

Lonjakan gaya dinamis dan tekanan tinggi berpotensi menyebabkan retak atau kegagalan pada sambungan seperti *Gate Valve* DN 150 mm dan *Tee Reducer* 400-160 mm. Dalam skenario penutupan cepat (30 detik), tekanan negatif  $< 0$  yang

tercatat sebesar -0,6 bar juga dapat memicu kavitasi, yang dapat mempercepat degradasi material pipa.

- **Deformasi Material Pipa**

Pipa HDPE memiliki sifat viskoelastis yang memungkinkan penyerap sebagian energi tekanan. Namun, paparan berulang terhadap tekanan tinggi > 15,0 bar dapat menyebabkan deformasi permanen pada dinding pipa, terutama di area dengan tekanan maksimum.

- **Kerusakan Penyangga**

Gaya dinamis yang bekerja pada sumbu X, Y, dan Z dapat menyebabkan kegagalan pada penyangga besi siku, terutama jika gaya maksimum melebihi kapasitas desain penyangga.

#### **4.6. Rekomendasi Operasional Dan Proteksi Teknis**

##### **4.6.1 Rekomendasi Waktu Penutupan *Valve***

Pada sistem pipa yang mengalami fenomena *water hammer*, waktu penutupan *valve* merupakan salah satu faktor yang paling mempengaruhi intensitas lonjakan tekanan yang terjadi. Penutupan katup yang terlalu cepat dapat menyebabkan perubahan kecepatan aliran yang mendalam dalam waktu singkat, menghasilkan gelombang tekanan yang tajam dan sangat besar. Sebaliknya, penutupan *valve* yang lebih lambat memberikan kesempatan bagi aliran untuk menyesuaikan secara bertahap, sehingga lonjakan tekanan yang terjadi menjadi lebih terkendali dan tidak merusak sistem pipa. Oleh karena itu, pengaturan waktu penutupan katup yang tepat sangat penting untuk mencegah kerusakan jangka panjang pada sistem pipa akibat *water hammer*.

Berdasarkan hasil simulasi transien dan analisis tekanan maksimum, minimum, serta gaya-gaya yang terjadi, waktu penutupan katup (*valve closure time*) terbukti sangat memengaruhi tingkat lonjakan tekanan (*water hammer*) dan keamanan sistem jaringan pipa.

Pada skenario penutupan tercepat (30 detik), tercatat tekanan maksimum sebesar **17,0 bar** dan tekanan minimum **-0,6 bar**, dengan fluktuasi gaya mendadak yang berpotensi menyebabkan kerusakan mekanis pada sambungan dan penyangga.

Grafik gaya menunjukkan lonjakan tajam pada awal penutupan (Gambar 4.12). Sebaliknya, penutupan selama 60 detik menghasilkan tekanan maksimum **15,0 bar** dan minimum **-0,3 bar** dengan pola gaya yang lebih stabil namun masih cukup tinggi (Gambar 4.13) .

Skenario penutupan 120 detik memberikan hasil terbaik, yaitu tekanan maksimum hanya **13,8 bar** dan tekanan minimum **-0,1 bar**, serta perubahan gaya yang gradual dan sangat stabil (Gambar 4.14) . Dengan demikian, penutupan katup secara bertahap dalam waktu minimal 120 detik sangat direkomendasikan untuk menekan risiko water hammer, mencegah tekanan negatif, dan menjaga integritas sistem pipa HDPE DN 400 dan DN 160.

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa untuk mengurangi dampak *water hammer*, waktu penutupan katup yang lebih lambat adalah langkah mitigasi yang paling efektif dalam menurunkan tekanan puncak akibat *water hammer* pada sistem perpipaan yang diteliti, karena memungkinkan perubahan aliran yang lebih halus, yang menghasilkan lonjakan tekanan yang lebih rendah. Penutupan katup dengan waktu yang lebih cepat cenderung meningkatkan fluktuasi tekanan, yang berpotensi merusak sistem pipa dan komponen lainnya. Oleh karena itu, disarankan untuk mengatur waktu penutupan katup minimal 60 detik hingga 120 detik untuk meminimalkan kerusakan jangka panjang pada sistem pipa dan meningkatkan keamanan operasional.

Namun, perlu dicatat bahwa penerapan waktu penutupan yang terlalu lama juga dapat mengganggu operasi sistem, seperti memperlambat pemulihan tekanan atau mengurangi kapasitas distribusi air dalam beberapa situasi. Oleh karena itu, waktu penutupan katup harus disesuaikan dengan karakteristik sistem pipa, kecepatan aliran, dan kebutuhan operasional.

#### **4.6.2 Rekomendasi Mitigasi Tambahan**

Selain pengaturan waktu penutupan katup, langkah-langkah mitigasi tambahan sangat penting untuk mengurangi dampak *water hammer* dalam sistem pipa dan memastikan keamanan operasional jangka panjang. Fenomena *water hammer* dapat menyebabkan lonjakan tekanan yang dapat merusak pipa dan komponen lainnya jika tidak ditangani dengan benar. Oleh karena itu, langkah mitigasi tambahan perlu

dipertimbangkan untuk mengurangi intensitas gelombang tekanan dan melindungi sistem dari kerusakan lebih lanjut. Rekomendasi mitigasi ini didasarkan pada teori dasar *water hammer* dan penelitian terdahulu.

### **1. Pemasangan Katup Pengendali Tekanan (*Pressure Relief Valves*)**

Salah satu metode yang efektif untuk mengurangi dampak *water hammer* adalah dengan memasang katup pengendali tekanan (*pressure relief valves*). Berdasarkan teori dasar tentang *water hammer* dan hasil penelitian terdahulu (Bergant et al., 2006; Chaudhry, 2014), pemasangan *pressure relief valves* efektif untuk mengurangi dampak lonjakan tekanan. Katup ini berfungsi untuk mengatur tekanan dalam sistem dan membuka secara otomatis ketika tekanan melebihi batas aman yang telah ditetapkan. Ketika gelombang tekanan yang dihasilkan oleh *water hammer* melebihi kapasitas sistem pipa, katup ini akan terbuka dan melepas sebagian fluida dari sistem, sehingga mencegah lonjakan tekanan berlebihan yang dapat menyebabkan kerusakan pada pipa dan sambungannya.

Pemasangan katup pengendali tekanan sangat berguna di titik-titik yang rentan terhadap *water hammer*, seperti di dekat katup besar atau pompa yang beroperasi dengan kecepatan tinggi. Dengan menggunakan katup ini, sistem akan lebih aman dan terhindar dari kerusakan akibat lonjakan tekanan mendadak.

### **2. Penggunaan *Surge Tanks* dan *Air Chambers***

*Surge tanks* atau *air chambers* adalah perangkat yang digunakan untuk meredam gelombang tekanan dengan menyerap sebagian energi yang dihasilkan oleh perubahan aliran yang mendadak. Pemasangan *surge tanks* di titik-titik yang rawan *water hammer* sangat efektif dalam mengurangi dampak lonjakan tekanan, terutama pada sistem distribusi yang besar dan kompleks. Hal ini didasarkan pada prinsip dasar pengendalian transien dan penelitian terdahulu yang mengonfirmasi efektivitas *surge tanks* dalam sistem perpipaan besar (Bergant et al., 2006).

*Surge tanks* bekerja dengan cara menyimpan sebagian energi yang dihasilkan oleh lonjakan tekanan dan kemudian menyalurkan kembali energi tersebut secara bertahap, meredam efek dari gelombang tekanan yang merusak. Penggunaan *air*

*chambers* di sepanjang pipa juga berfungsi sebagai penyerap gelombang tekanan, mengurangi risiko kerusakan pada pipa dan komponen lainnya.

Pemasangan *surge tanks* dan *air chambers* idealnya dilakukan pada titik penghubung antara pompa dan katup, atau pada belokan dan sambungan pipa yang berpotensi menjadi titik rawan tekanan tinggi.

### **3. Penambahan Pipa dengan Material Elastis dan Tahan Tekanan**

Material pipa yang digunakan dalam sistem distribusi sangat mempengaruhi kemampuan sistem untuk meredam efek *water hammer*. Pipa yang terbuat dari material elastis seperti HDPE memiliki kemampuan yang lebih baik untuk meredam gelombang tekanan dibandingkan pipa yang terbuat dari material yang lebih kaku seperti pipa baja. Pipa elastis lebih mampu menyerap energi yang dihasilkan oleh lonjakan tekanan, mengurangi dampak yang diterima oleh sistem. Rekomendasi ini didasarkan pada prinsip fisika dan teori elastisitas material, serta penelitian oleh (Cao et al., 2022) yang menunjukkan bahwa material elastis mengurangi potensi kerusakan akibat tekanan tinggi.

Oleh karena itu, disarankan untuk menggunakan pipa HDPE atau material elastis lainnya, terutama pada sistem pipa yang mengalirkan fluida dengan kecepatan tinggi. Selain itu, pipa dengan kualitas lebih tinggi dan kemampuan tahan tekanan yang lebih baik akan membantu meningkatkan ketahanan sistem terhadap lonjakan tekanan berulang, yang sangat penting dalam jangka panjang.

### **4. Pengaturan Aliran dengan *Flow Regulators***

*Flow regulators* atau pengatur aliran adalah perangkat yang digunakan untuk mengatur laju aliran dalam pipa agar tidak terjadi perubahan aliran yang mendalam dalam waktu singkat. Penggunaan *flow regulators* sangat efektif untuk menghindari perubahan kecepatan aliran yang mendadak, yang merupakan penyebab utama *water hammer*. Dengan mengontrol aliran secara lebih bertahap dan stabil, gelombang tekanan yang dihasilkan dapat diminimalkan, sehingga dampak dari fenomena ini dapat dikurangi.

*Flow regulators* dapat dipasang pada titik penghubung atau titik kritis dalam sistem distribusi untuk mengatur laju aliran dan mengurangi risiko terjadinya

lonjakan tekanan akibat fluktuasi aliran yang tidak terkendali. Pengaturan aliran yang stabil sangat membantu dalam mencegah kerusakan pada katup dan pompa, serta mengurangi biaya operasional sistem.

## **5. Pemantauan dan Deteksi Dini dengan Sensor Tekanan**

Pemantauan sistem secara *real-time* adalah langkah mitigasi yang sangat penting dalam mengelola *water hammer*. Pemasangan sensor tekanan di sepanjang sistem pipa memungkinkan untuk memantau lonjakan tekanan yang terjadi karena fenomena *water hammer*. Data yang dikumpulkan dari sensor tekanan ini dapat digunakan untuk mendeteksi lonjakan tekanan yang tidak diinginkan dan mengambil tindakan segera untuk mencegah kerusakan lebih lanjut. Prinsip dasar deteksi tekanan dan teknologi sensor tekanan telah terbukti efektif dalam berbagai sistem distribusi air (Chaudhry, 2014).

Dengan pemantauan yang tepat, sistem kontrol otomatis dapat diaktifkan untuk menyesuaikan atau mengatur pengoperasian katup dan pompa guna mencegah terjadinya lonjakan tekanan lebih lanjut. Data pemantauan juga dapat digunakan untuk merencanakan pemeliharaan dan perbaikan pada titik-titik rawan, serta meningkatkan keamanan operasional.

Dari hasil penelitian dan simulasi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa langkah mitigasi tambahan sangat penting untuk mengurangi dampak *water hammer* dalam sistem pipa. Katup pengendali tekanan, *surge tanks*, pipa dengan material elastis, *flow regulators*, dan sensor tekanan adalah solusi yang dapat membantu mengurangi lonjakan tekanan yang berbahaya bagi sistem pipa. Dengan menerapkan langkah-langkah mitigasi tambahan ini, kita dapat meningkatkan keamanan sistem pipa, mengurangi kerusakan jangka panjang, serta memperpanjang umur operasional dari sistem distribusi fluida.

### **4.6.3 Pemantauan dan Sistem Kontrol**

Dalam mengelola fenomena *water hammer* dan mencegah dampak negatifnya terhadap sistem pipa, salah satu pendekatan yang sangat penting adalah pemantauan *real-time* dan kontrol otomatis terhadap kondisi sistem pipa. Penggunaan sensor tekanan, sistem pemantauan otomatis, dan sistem kontrol adaptif memungkinkan

pengelolaan dan penanggulangan *water hammer* secara efisien. Dengan sistem pemantauan yang tepat, potensi kerusakan pada pipa dapat diminimalkan dan pemeliharaan preventif dapat dilakukan untuk memastikan kelancaran operasional sistem distribusi.

Pemantauan yang tepat dan sistem kontrol yang otomatis memainkan peran penting dalam mengurangi dampak *water hammer* pada sistem pipa. Sensor tekanan dan sensor aliran memungkinkan untuk mendeteksi lonjakan tekanan dan fluktuasi aliran secara *real-time*, sementara sistem kontrol otomatis mengatur penutupan katup dan pengaturan aliran untuk mencegah kerusakan lebih lanjut. Penggunaan simulasi dinamis dan evaluasi kinerja sistem secara berkala akan meningkatkan keamanan dan keandalan sistem pipa. Dengan pendekatan ini, kerusakan jangka panjang pada pipa dan komponen sistem dapat diminimalkan, dan keandalan sistem distribusi dapat dipertahankan.

Untuk memastikan keamanan sistem secara berkelanjutan, pengawasan dan sistem kontrol harus menjadi bagian integral dari operasi jaringan pipa:

- **Monitoring tekanan dan gaya secara *real-time*:** Memasang sensor tekanan dan sensor gaya pada titik-titik strategis seperti sambungan, *valve*, dan penyangga untuk mendeteksi anomali sejak dini.
- **Implementasi SCADA:** Sistem SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) memungkinkan pemantauan dan pengendalian katup serta operasional jaringan secara otomatis dan akurat, termasuk alarm jika terjadi tekanan abnormal
- **Inspeksi berkala:** Lakukan pemeriksaan fisik rutin pada sambungan, penyangga, dan elemen kritis lain untuk memastikan tidak ada kerusakan akibat siklus tekanan transien yang berulang.
- **Evaluasi performa sistem:** Secara periodik, lakukan simulasi ulang dan evaluasi pola tekanan dan gaya menggunakan data operasional untuk mengidentifikasi potensi risiko baru dan memperbarui SOP penutupan *valve* serta strategi mitigasi.
- **Prosedur Operasional:** SOP penutupan dan pembukaan katup harus disusun dengan jelas dan ketat, sehingga mudah dipahami oleh operator lapangan, guna mencegah kecelakaan akibat penutupan yang tidak sesuai rekomendasi.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik yang dilakukan menggunakan Bentley Hammer, serta pemodelan yang berlandaskan data teknis aktual, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penutupan katup yang lebih cepat (30 detik) menghasilkan tekanan puncak yang sangat tinggi, yaitu 17,0 bar, dengan fluktuasi gaya yang tajam. Sebaliknya, penutupan katup yang lebih lambat (120 detik) mengurangi tekanan puncak menjadi 13,8 bar, dengan pola perubahan gaya yang lebih stabil. Ini menunjukkan bahwa waktu penutupan katup secara langsung mempengaruhi besarnya lonjakan tekanan yang terjadi akibat *water hammer*.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi waktu penutupan katup memiliki dampak langsung terhadap lonjakan tekanan maksimum ( $\Delta P$ ), yang dihitung sebagai selisih antara tekanan puncak dan tekanan normal pada sistem. Berdasarkan simulasi:
  - $\Delta P$  pada waktu penutupan 30 detik: 17,0 bar (terjadi lonjakan tekanan paling besar).
  - $\Delta P$  pada waktu penutupan 60 detik: 14,2 bar.
  - $\Delta P$  pada waktu penutupan 120 detik: 13,8 bar.

Hal ini menunjukkan bahwa semakin cepat waktu penutupan katup, semakin besar lonjakan tekanan yang terjadi, yang meningkatkan risiko kerusakan pada pipa dan komponen sistem lainnya.

3. Berdasarkan simulasi, rentang waktu penutupan katup antara 60 hingga 120 detik terbukti lebih efektif dalam mengurangi tekanan puncak dan memperpanjang umur sistem perpipaan. Waktu penutupan katup di atas 120 detik menghasilkan lonjakan tekanan yang lebih kecil dan lebih stabil, namun dalam beberapa kondisi, waktu penutupan yang terlalu lama bisa memengaruhi efisiensi operasional, terutama pada aliran air yang lebih tinggi. Oleh karena itu,

waktu penutupan katup yang optimal harus diterapkan untuk memastikan kestabilan tekanan dan efisiensi operasional.

4. Berdasarkan hasil temuan penelitian ini, langkah mitigasi yang disarankan untuk mengurangi risiko *water hammer* meliputi pengaturan waktu penutupan katup yang lebih lambat (60-120 detik), pemasangan perangkat proteksi seperti *pressure relief valve*, *surge tank*, serta penggunaan *flow regulator* untuk mengatur aliran secara lebih stabil. Pemantauan tekanan secara *real-time* harus diterapkan untuk mendeteksi lonjakan tekanan secara dini dan mencegah kerusakan pada sistem perpipaan.

## 5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, beberapa saran berikut dapat diberikan untuk pengembangan sistem distribusi air serta penelitian lanjutan:

1. Operasional Operator sistem perpipaan di kawasan SPAM Sepaku dan jaringan distribusi air serupa perlu mengadopsi prosedur penutupan katup yang gradual. Waktu penutupan katup yang disarankan adalah antara 60 hingga 120 detik, khususnya pada titik-titik kritis seperti cabang pipa HDPE 160 mm dan sambungan reducer. Hal ini penting untuk meminimalkan risiko *water hammer* dan kavitasi yang dapat merusak infrastruktur perpipaan.
2. Pengujian dan pelatihan rutin terkait prosedur darurat penutupan katup sangat penting untuk memastikan kesiapan personel dan sistem dalam menghadapi kondisi operasional ekstrem. Langkah ini akan meningkatkan responsivitas terhadap kondisi yang dapat memicu kerusakan pada sistem distribusi air.
3. Perangkat pelindung seperti *pressure relief valve*, *surge tank*, dan *air chamber* perlu dipasang pada lokasi-lokasi strategis, seperti dekat katup utama, sambungan diameter besar, dan area yang rawan terhadap tekanan tinggi. Proteksi ini akan memberikan perlindungan tambahan terhadap dampak *water hammer* yang dapat merusak sistem perpipaan.
4. Pemilihan material pipa harus mempertimbangkan faktor elastisitas dan ketahanan terhadap tekanan transien. Disarankan menggunakan pipa HDPE untuk segmen distribusi pembagi karena elastisitasnya yang baik dalam

meredam lonjakan tekanan. Untuk transmisi utama, pipa baja berdinding tebal lebih disarankan untuk meningkatkan ketahanan terhadap tekanan ekstrem yang mungkin terjadi.

5. Pemasangan sensor tekanan dan integrasi dengan sistem SCADA sangat dianjurkan untuk melakukan pemantauan tekanan secara *real-time*. Dengan sistem ini, anomali tekanan dapat terdeteksi secara dini dan ditangani sebelum menyebabkan kerusakan pada sistem perpipaan
6. Evaluasi performa sistem, inspeksi fisik berkala, dan simulasi ulang menggunakan data operasional aktual perlu dilakukan secara rutin. Langkah ini penting untuk memastikan sistem tetap aman dan sesuai dengan perkembangan kebutuhan operasional lapangan.
7. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengeksplorasi variasi pola penutupan katup, seperti pola penutupan non-linear, eksponensial, atau dua tahap (*two-stage closure*), dan pengaruh parameter lingkungan seperti suhu fluida terhadap fenomena *water hammer*. Penelitian ini akan memperkaya pemahaman terkait dinamika lonjakan tekanan dalam sistem perpipaan
8. Penelitian eksperimental di lapangan perlu dilakukan untuk menguji material sambungan dan penyangga di bawah siklus tekanan transien. Hal ini akan melengkapi hasil simulasi numerik dan memberikan validasi empiris terhadap model yang digunakan, memastikan keandalan sistem dalam jangka panjang.
9. Pengembangan model hidraulik yang terintegrasi, menggabungkan data sensor, prediksi kondisi operasi, dan sistem kontrol adaptif, akan sangat bermanfaat dalam mendukung pengelolaan sistem distribusi air yang aman dan efisien. Model ini dapat membantu meningkatkan kemampuan sistem untuk beradaptasi dengan perubahan kondisi operasional dan memberikan solusi yang lebih baik dalam pengelolaan distribusi air.

Dengan demikian, diharapkan hasil dan rekomendasi dari penelitian ini dapat menjadi referensi penting bagi pengelola dan perencana sistem distribusi air bersih dalam upaya meningkatkan keandalan, keamanan, dan efisiensi jaringan perpipaan, sekaligus mendorong penelitian dan inovasi lebih lanjut di bidang teknik hidrolika dan sistem distribusi air.

## DAFTAR PUSTAKA

- A. Bergant, J.M.C. van 't Westende, T. Koppel, J. Gale, Q. Hou, Z. Pandula, & A.S. Tijsseling. (2010). Water hammer and column separation due to accidental simultaneous closure of control valves in a large scale two-phase flow experimental test rig. *EINDHOVEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*, 1–14.
- American Water Works Association. (n.d.). *Rehabilitation of Water Mains AWWA 2001*.
- A.R David, T. (2004). *Fluid in Transients Pipeline Systems*.
- Bazargan-Lari, M. R., Kerachian, R., Afshar, H., & Bashi-Azghadi, S. N. (2013). Developing an optimal valve closing rule curve for real-time pressure control in pipes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(1), 215–225. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-1208-7>
- Bergant, A., Simpson, A. R., & Tijsseling, A. S. (2006). Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures*, 22(2), 135–171. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.08.008>
- BSN. (2012). *SNI 7831:2012 Perencanaan Sistem Penyediaan Air Minum*.
- BSN. (2024). *RSNI 39:2024 Pipa Baja dengan atau Tanpa Lapisan Seng untuk Saluran Air dan Instalasi Gas*.
- Cao, Z., Xia, Q., Guo, X., Lu, L., & Deng, J. (2022). A Novel Surge Damping Method for Hydraulic Transients with Operating Pump Using an Optimized Valve Control Strategy. *Water (Switzerland)*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/w14101576>
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients Third Edition*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8538-4>
- Colombo, A. F., Karney, B. W., & Asce, M. (2002). *Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94962002128:6441>
- Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., & Axworthy, D. H. (2005). A review of water hammer theory and practice. In *Applied Mechanics Reviews* (Vol.

- 58, Issues 1–6, pp. 49–75). American Society of Mechanical Engineers (ASME). <https://doi.org/10.1115/1.1828050>
- Han, Y., Shi, W., Xu, H., Wang, J., & Zhou, L. (2022). Effects of Closing Times and Laws on Water Hammer in a Ball Valve Pipeline. *Water (Switzerland)*, *14*(9). <https://doi.org/10.3390/w14091497>
- Karadžić, U., Tiselj, I., & Bergant, A. (2014). Comparison of numerical methods for water hammer simulations. *Journal of Hydraulic Research*.
- Kestin, J., Sokolov, M., & Wakeham, W. A. (1978). Viscosity of Liquid Water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, *7*(3), 941–948. <https://doi.org/10.1063/1.555581>
- Kodura, A. (2016). An Analysis of the Impact of Valve Closure Time on the Course of Water Hammer. *Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics*, *63*(1), 35–45. <https://doi.org/10.1515/heem-2016-0003>
- Kubrak, M., Malesińska, A., Kodura, A., Urbanowicz, K., Bury, P., & Stosiak, M. (2021). Water hammer control using additional branched hdpe pipe. *Energies*, *14*(23). <https://doi.org/10.3390/en14238008>
- Li, Z., Jin, J., Pan, Z., Sun, J., Geng, K., & Qiao, Y. (2025). Impact of Branch Pipe Valve Closure Procedures on Pipeline Water Hammer Pressure: A Case Study of Xinlongkou Hydropower Station. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(2). <https://doi.org/10.3390/app15020897>
- Lupa, S. I., Gagnon, M., Muntean, S., & Abdul-Nour, G. (2022). The Impact of Water Hammer on Hydraulic Power Units. In *Energies* (Vol. 15, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15041526>
- Mao, S., & Duan, Z. (2009). *Bulk Modulus of Water Under High Temperature and Pressure*.
- Meniconi, S., Brunone, B., & Ferrante, M. (2012). Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes. *Journal of Fluids and Structures*, *33*, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.007>
- Miji Cherian, R., Sajikumar, N., & K.S, S. (2022). Effect of valve closure time on transient cavitating flow through piping systems. *ISH Journal of*

- Hydraulic Engineering*, 28(S1), 180–187.  
<https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1729875>
- Sisiwanto Adi, T., Prastowo, H., & Cahyono, B. (2014). *Analisa Pengaruh Water Hammer Terhadap Nilai Stress Pipa pada Sistem Loading-Offloading*.
- Tijsseling, A. S. (2007). Water hammer with fluid-structure interaction in thick-walled pipes. *Computers and Structures*, 85(11–14), 844–851.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.01.008>
- Triatmodjo B. (1993). *Hidraulika I*.
- Triatmodjo B. (1996). *Hidraulika II*.
- Walski, T., Chase, D. V, Savic, D., & Grayman, W. M. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*.  
<https://www.researchgate.net/publication/221936180>
- Wan, W., & Li, F. (2016). Sensitivity analysis of operational time differences for a pump-valve system on a water hammer response. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 138(1).  
<https://doi.org/10.1115/1.4031202>
- Wan, W., Zhang, B., & Chen, X. (2019). Investigation on water hammer control of centrifugal pumps in water supply pipeline systems. *Energies*, 12(1).  
<https://doi.org/10.3390/en12010108>
- White, F. M. (2011). *FLUID MECHANICS*.
- Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1993). *Fluid transients*.  
<https://doi.org/10.1115/1.3448743>
- Yao, C., Zhao, H., Zhang, C., & Xu, Y. (2014). Numerical simulation of water hammer with varying valve closure times. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Yao, E., Kember, G., & Hansen, D. (2015). Analysis of Water Hammer Attenuation in Applications with Varying Valve Closure Times. *Journal of Engineering Mechanics*, 141(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0000825](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0000825)
- Zhou, J., Xu, Y., Zheng, Y., & Zhang, Y. (2017). Optimization of guide vane closing schemes of pumped storage hydro unit using an enhanced multi-

objective gravitational search algorithm. *Energies*, 10(7).  
<https://doi.org/10.3390/en10070911>

Zhou, L., Zhang, J., & Wang, L. (2018). Numerical investigation of valve closure laws on water hammer control in pressurized pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*.

