

## Analisis Pengaruh Kecepatan Penutupan Katup terhadap Ketahanan Infrastruktur Sistem Distribusi Air Perkotaan (Studi Kasus SPAM Sepaku)

Gavin A Sani<sup>1\*</sup>, Moh. Faiqun Ni'am<sup>1</sup>, Hermin Poedjiastoeti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung

\*Corresponding Author : [sanigavin@gmail.com](mailto:sanigavin@gmail.com)

### ABSTRAK

Sistem penyediaan air minum perkotaan menghadapi tantangan dalam menjaga keandalan layanan dan ketahanan infrastruktur, terutama pada jaringan distribusi dengan perbedaan elevasi signifikan dan konfigurasi sistem yang kompleks. Salah satu risiko operasional utama adalah fenomena water hammer yang berpotensi merusak pipa dan mengganggu kontinuitas layanan air bersih. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap tekanan puncak water hammer serta implikasinya terhadap keandalan sistem distribusi air perkotaan. Studi kasus dilakukan pada Jaringan Distribusi Utama dan Pembagi Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku menggunakan pipa baja dan HDPE. Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak Bentley OpenFlows HAMMER dengan Metode Karakteristik (MOC) untuk memodelkan perilaku hidraulik transien. Variasi waktu penutupan katup 30, 60, dan 120 detik dianalisis untuk mengevaluasi fluktuasi tekanan dan respons sistem. Hasil menunjukkan bahwa penutupan katup yang lebih cepat meningkatkan tekanan puncak dan ketidakstabilan sistem. Pada skenario 30 detik, tekanan maksimum mencapai 17,0 bar dengan tekanan minimum -0,6 bar yang mengindikasikan risiko kavitasi tinggi. Skenario 120 detik menurunkan tekanan maksimum menjadi 13,8 bar dan menghasilkan profil tekanan yang lebih stabil. Waktu penutupan 60-120 detik direkomendasikan sebagai rentang operasional optimal untuk memitigasi risiko transien. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian operasional penutupan katup tidak hanya merupakan persoalan teknis hidraulik, tetapi juga bagian strategis dalam meningkatkan ketahanan infrastruktur dan menjaga keberlanjutan layanan air perkotaan. Penelitian ini memberikan implikasi praktis bagi perencanaan utilitas jangka panjang, manajemen infrastruktur, serta perumusan kebijakan operasional SPAM pada sistem distribusi berbasis gravitasi dengan perbedaan elevasi tinggi.

*Kata kunci: water hammer, penutupan katup, ketahanan infrastruktur, layanan air perkotaan, manajemen SPAM.*

### ABSTRACT

Urban water supply systems face increasing challenges in maintaining service reliability and infrastructure resilience, particularly in areas with significant elevation differences and complex distribution networks. One critical operational risk is water hammer, which can threaten pipe integrity and disrupt urban water services. This study evaluates the effect of valve closure speed on peak water hammer pressure and its implications for the reliability of urban water distribution infrastructure. The case study focuses on the Main and Sub-Distribution Networks (Sub-WP 1B and 1C) of the Sepaku Water Supply System (SPAM Sepaku), utilizing steel and HDPE pipelines. Numerical simulations were conducted using Bentley OpenFlows HAMMER with the Method of Characteristics (MOC) to model transient hydraulic behavior. Valve closure durations of 30, 60, and 120 seconds were analyzed to assess pressure fluctuations and system response. The results show that faster valve closures significantly increase peak pressure and system instability. In the 30-second scenario, peak pressure reached 17.0 bar with a minimum pressure of -0.6 bar, indicating high cavitation risk. In contrast, the 120-second scenario reduced peak pressure to 13.8 bar and improved pressure stability. A closure duration of 60–120 seconds is identified as the optimal operational range to mitigate transient risks. These findings demonstrate that operational control of valve closure is not only a hydraulic issue but also a strategic component in enhancing infrastructure resilience and ensuring sustainable urban water service delivery. The study provides practical implications for long-term utility planning, infrastructure management, and policy formulation in SPAM operation, particularly in systems with high elevation gradients and gravity-based distribution.

*Keywords: water hammer, valve closure, infrastructure resilience, urban water service, SPAM management.*

## 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan urbanisasi global meningkatkan tekanan terhadap sistem infrastruktur utilitas kota, khususnya sistem penyediaan air minum yang harus mampu menjamin kontinuitas layanan dalam kondisi operasional normal maupun saat terjadi gangguan. Infrastruktur air perkotaan saat ini tidak hanya dinilai dari kapasitas teknisnya, tetapi juga dari tingkat ketahanan (*resilience*), keandalan (*reliability*), dan keberlanjutan (*sustainability*) dalam jangka panjang (Butler et al., 2016; Asghari et al., 2023). Konsep ketahanan infrastruktur air menekankan kemampuan sistem untuk menyerap gangguan, mempertahankan fungsi pelayanan, serta pulih secara cepat setelah terjadi tekanan eksternal maupun gangguan internal pada jaringan distribusi (Li et al., 2022).

Dalam konteks skala kota, sistem distribusi air merupakan bagian dari infrastruktur kritis yang menopang aktivitas permukiman, ekonomi, dan kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, pengelolaan jaringan distribusi air harus terintegrasi dengan pendekatan manajemen aset dan perencanaan utilitas jangka panjang (Farmani et al., 2006; Mugume et al., 2015). Studi tentang *urban water infrastructure resilience* menunjukkan bahwa evaluasi teknis berbasis simulasi hidraulik perlu dihubungkan dengan kebijakan operasional dan strategi investasi infrastruktur agar mampu mendukung ketahanan layanan skala kawasan (Marques et al., 2018; Asghari et al., 2023).

Di Indonesia, Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) merupakan pelayanan dasar permukiman yang menjadi bagian penting dalam pembangunan wilayah. Tantangan nasional dalam pengelolaan SPAM meliputi peningkatan cakupan layanan, pengurangan kehilangan air, serta penguatan keandalan distribusi pada kawasan berkembang. Dalam sistem berbasis gravitasi dengan perbedaan elevasi signifikan, risiko gangguan tekanan transien menjadi lebih tinggi dan berpotensi memengaruhi stabilitas pelayanan regional (Chaudhry, 2014; Wylie & Streeter, 1993).

Perencanaan sistem jaringan perpipaan distribusi air penting dalam pengelolaan air bersih, dengan tantangan teknis, ekonomi, dan sosial. Salah satu masalah yang sering diabaikan adalah *water hammer*, yang terjadi akibat perubahan kecepatan aliran, seperti penutupan katup cepat, yang dapat merusak pipa dan meningkatkan biaya perbaikan. Penutupan katup yang cepat berhubungan dengan peningkatan tekanan puncak, dan meskipun beberapa penelitian telah mengkaji mitigasinya, sebagian besar masih terbatas pada kondisi laboratorium (Kodura, 2016; Yao dkk, 2015). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap tekanan puncak *water hammer*

pada JDU dan JDP Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku, menggunakan simulasi numerik Bentley Hammer. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi praktis untuk mitigasi risiko *water hammer* dalam sistem distribusi air.

*Water hammer* adalah lonjakan tekanan mendadak akibat perubahan kecepatan aliran fluida, biasanya karena penutupan katup cepat. Fenomena ini dapat merusak pipa dan komponen sistem distribusi air. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa perubahan mendadak dalam aliran dapat menghasilkan gelombang tekanan yang sangat tinggi, yang merambat melalui pipa dengan kecepatan tinggi (Kodura, 2016; Zao, 2022).

Secara mekanis, *water hammer* terjadi karena energi kinetik fluida yang mengalir tiba-tiba dikonversi menjadi energi tekanan saat aliran dihentikan secara mendadak. Gelombang tekanan yang terbentuk akan merambat ke arah hulu dan dipantulkan pada titik-titik diskontinuitas seperti reservoir, sambungan pipa, atau perubahan diameter pipa, sehingga menghasilkan pola osilasi tekanan yang kompleks. Pemahaman terhadap *water hammer* penting untuk mendesain sistem distribusi air yang aman dan efisien. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan metode prediksi dan mitigasi yang efektif.

SPAM Sepaku sebagai studi kasus dalam penelitian ini berada pada kawasan berkembang dengan dinamika pertumbuhan wilayah yang tinggi. Sistem distribusinya memiliki karakteristik topografi dengan perbedaan elevasi besar, sehingga berpotensi mengalami tekanan transien akibat perubahan operasional seperti penutupan katup. Fenomena *water hammer* merupakan salah satu bentuk tekanan transien yang dapat menyebabkan lonjakan tekanan berlebih maupun tekanan negatif yang memicu kavitasasi dan kerusakan infrastruktur (Kodura, 2016; Yao et al., 2015). Gangguan tersebut tidak hanya berdampak pada integritas pipa, tetapi juga dapat menurunkan tingkat keandalan layanan air pada skala kawasan.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji fenomena *water hammer* melalui pendekatan numerik menggunakan *Method of Characteristics (MOC)* serta simulasi perangkat lunak hidraulik untuk memprediksi tekanan puncak dan fluktuasi sistem (Chaudhry, 2014; Wan & Li, 2016). Namun, sebagian besar studi masih berfokus pada analisis teknis fenomena transien tanpa secara eksplisit mengaitkan hasilnya dengan ketahanan infrastruktur perkotaan, manajemen aset utilitas, serta implikasi kebijakan operasional sistem pelayanan air.

Dalam perspektif sistem wilayah, gangguan pada jaringan distribusi utama dapat memengaruhi stabilitas pelayanan regional, terutama pada kawasan dengan pertumbuhan

kebutuhan air yang meningkat. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mengintegrasikan analisis hidraulik teknis dengan konteks perencanaan infrastruktur kota dan keberlanjutan layanan air jangka panjang (Butler et al., 2016; Li et al., 2022). Minimnya studi yang menghubungkan analisis tekanan transien dengan kebijakan pengelolaan layanan dan strategi ketahanan sistem distribusi air menunjukkan adanya celah penelitian yang signifikan.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan perangkat proteksi sangat penting dalam mengurangi risiko kerusakan pada pipa dan sambungan (Li dkk, 2015). Berbagai pendekatan telah digunakan untuk mengurangi dampak *water hammer*, termasuk penggunaan *surge tanks* dan *pressure relief valves*. *Surge tanks* dapat menyerap energi dari lonjakan tekanan, sedangkan *pressure relief valves* berfungsi untuk mengatur tekanan dalam sistem dan membuka secara otomatis ketika tekanan melebihi batas aman (Bazargan-Lari dkk, 2016; Wan & Li, 2016). Implementasi perangkat proteksi yang tepat tidak hanya meningkatkan keandalan dan keamanan sistem distribusi air, tetapi juga mengoptimalkan biaya pemeliharaan dan memperpanjang umur operasional komponen. Pemahaman mendalam tentang karakteristik dan aplikasi setiap perangkat proteksi menjadi fondasi penting dalam desain sistem distribusi air yang tangguh dan berkelanjutan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik menggunakan perangkat Bentley Hammer guna mengkaji pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap tekanan puncak *water hammer* pada sistem perpipaan distribusi air. Pendekatan ini dipilih karena fenomena *water hammer* dapat dimodelkan secara matematis melalui parameter tekanan, kecepatan aliran, dan waktu penutupan katup, sehingga memungkinkan pengendalian variabel secara presisi tanpa risiko kerusakan pada sistem nyata.

Kecepatan penutupan katup adalah faktor kunci dalam terjadinya *water hammer* pada sistem perpipaan distribusi air. *Water hammer* terjadi ketika penutupan katup yang cepat menyebabkan perubahan kecepatan aliran fluida, mengubah energi kinetik menjadi energi tekanan. Hal ini menghasilkan gelombang tekanan tinggi yang dapat merusak pipa, sambungan, dan komponen lainnya.

Penelitian menunjukkan bahwa semakin cepat katup ditutup, semakin besar lonjakan tekanan yang dihasilkan, dengan penutupan mendadak menghasilkan tekanan lebih tinggi

dibandingkan penutupan bertahap (Kodura, 2016; Yao dkk, 2015; Cao dkk, 2022). Oleh karena itu, penutupan katup yang optimal sangat penting untuk mengurangi dampak *water hammer* dalam desain sistem distribusi air.

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V$$

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).

Dengan memahami pengaruh kecepatan penutupan katup terhadap *water hammer*, operator sistem perpipaan dapat merancang prosedur penutupan katup yang lebih aman dan efektif. Hal ini sangat penting untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi air serta meminimalkan risiko kerusakan infrastruktur.

### Lokasi Penelitian

Jaringan Distribusi Utama dan Jaringan Distribusi Pembagi Sub-WP 1B dan 1C SPAM Sepaku.

### Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini terdiri dari:

- Variabel Bebas: Waktu penutupan katup 30 detik, 60 detik, dan 120 detik.
- Variabel Terikat: Tekanan puncak *water hammer* yang terjadi pada sistem perpipaan.
- Variabel Kendali: Material pipa (baja dan HDPE) dan kondisi operasional sistem.

### Metode Pengumpulan Data

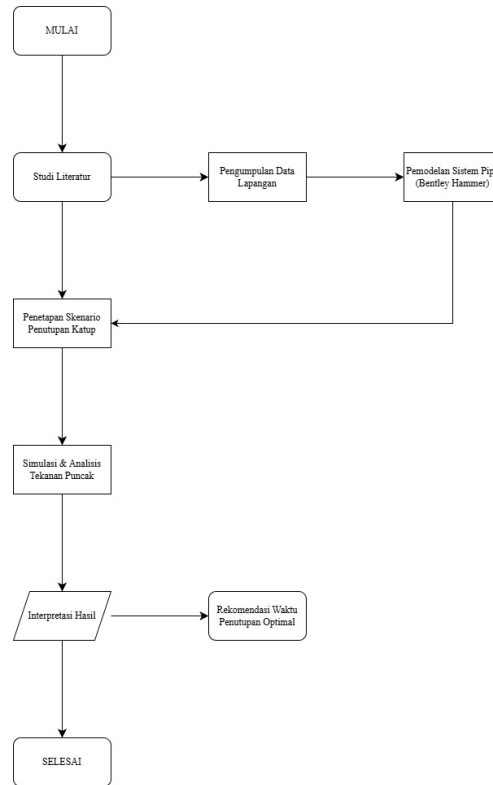
Data primer diperoleh melalui simulasi numerik menggunakan Bentley Hammer, yang melakukan perhitungan lonjakan tekanan akibat variasi waktu penutupan katup. Data sekunder yang digunakan mencakup spesifikasi teknis sistem distribusi.

### Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan:

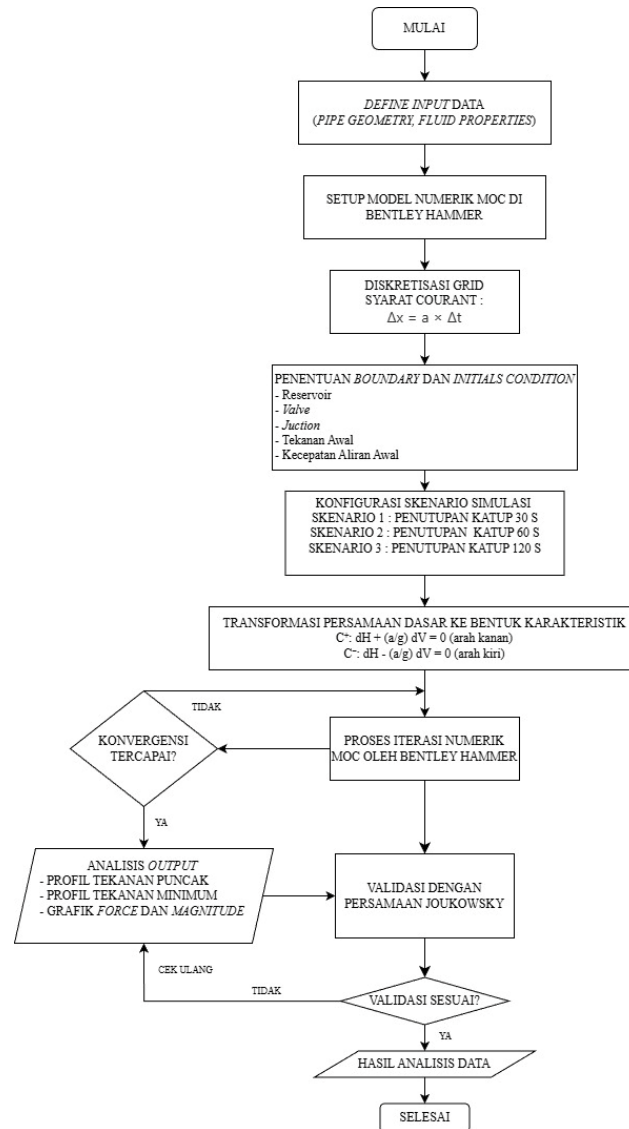
1. Studi Literatur: Mengkaji teori dan penelitian terkait fenomena *water hammer* dan pengaruh penutupan katup.
2. Pemodelan Sistem Pipa: Menyusun model sistem distribusi air menggunakan Bentley Hammer.

3. Pengaturan Skenario: Menentukan variasi waktu penutupan katup untuk simulasi.
4. Analisis Data: Menggunakan simulasi untuk menganalisis tekanan puncak dan dampaknya terhadap sistem perpipaan.
5. Interpretasi Hasil: Menyimpulkan hasil simulasi dan memberikan rekomendasi mitigasi.



**Gambar 1** Alur Penelitian  
Sumber: Hasil Olahan Penulis, 2025

Seluruh skenario simulasi dilakukan dengan parameter awal yang seragam, seperti debit aliran, tekanan awal, dan kondisi *boundary* pada sistem perpipaan. Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi pada setiap skenario waktu penutupan katup untuk mengidentifikasi tren perubahan tekanan puncak. Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan *output* simulasi dengan teknik analisis yang digunakan meliputi analisis grafik profil tekanan, perbandingan nilai tekanan puncak, serta evaluasi efektivitas waktu penutupan katup dalam menurunkan risiko *water hammer*.



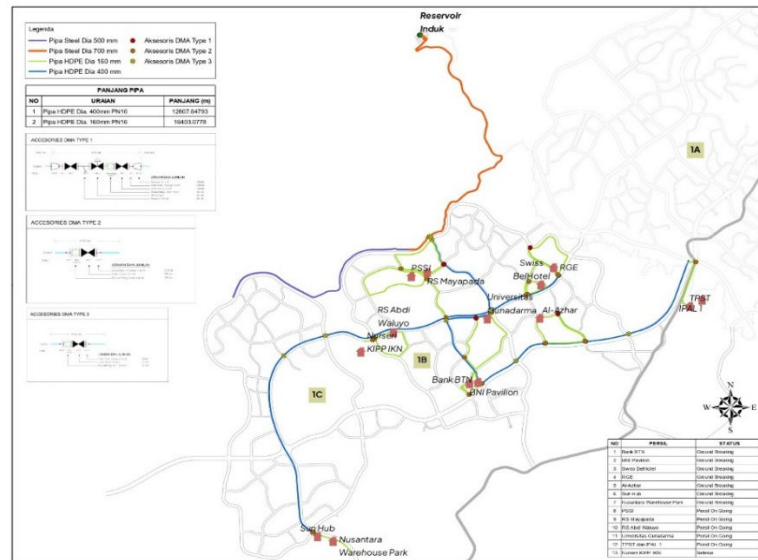
**Gambar 2** Alur Metode Numerik Transien  
Sumber: Hasil Olahan Penulis, 2025

### 3. HASIL PEMBAHASAN

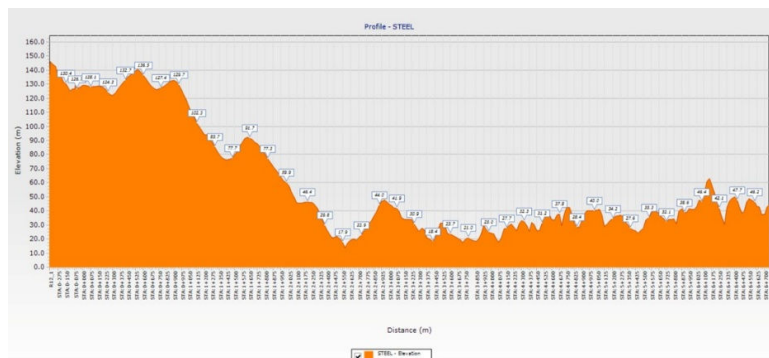
#### 3.1 Gambaran Umum Sistem Jaringan SPAM Sepaku

Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Sepaku mencakup geografis yang luas dan topografi bervariasi. SPAM ini dirancang untuk mengatasi tantangan distribusi air akibat perbedaan elevasi dan memastikan kontinuitas suplai ke seluruh wilayah layanan. Sistem ini memiliki dua reservoir utama berkapasitas masing-masing 6.000 m<sup>3</sup> yang terletak pada elevasi +148 m dan +145 m. Air dialirkan secara gravitasi melalui pipa baja berdiameter ND 700 mm dan ND 500 mm menuju Jaringan Distribusi Utama (JDU) 1B dan 1C. Perbedaan

elevasi sekitar 120 m antara reservoir dan area layanan memberikan tekanan hidraulik yang memadai.



**Gambar 3.** Peta Jaringan Pipa dan Aksesoris  
Sumber: Layout JDU JDP 1B 1C



**Gambar 4.** Profil Elevasi JDU JDP 1B 1C  
Sumber: Evaluasi Data Elevasi Hidrolis JDU 1B dan 1C

## Spesifikasi Teknis Jaringan

Jaringan distribusi SPAM Sepaku terdiri dari:

**Tabel 1** Spesifikasi Teknis Pipa

| Pipa Baja 700 mm               |             |
|--------------------------------|-------------|
| Uraian                         | Ukuran (mm) |
| Diameter Luar                  | 711         |
| Ketebalan Pipa                 | 12,5        |
| Ketebalan <i>Cement Lining</i> | 13,00       |
| Diameter Dalam                 | 698,5       |
| Pipa Baja 500 mm               |             |
| Uraian                         | Ukuran (mm) |
| Diameter Luar                  | 508         |

|                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| Ketebalan Pipa                 | 11,2               |
| Ketebalan <i>Cement Lining</i> | 13,00              |
| Diameter Dalam                 | 496,8              |
| <b>Pipa HDPE 400 mm</b>        |                    |
| <b>Uraian</b>                  | <b>Ukuran (mm)</b> |
| Diameter Luar                  | 400                |
| Ketebalan Pipa                 | 25                 |
| Diameter Dalam                 | 375                |

Sumber: Data Teknis JDU JDP 1B 1C

Sistem ini dirancang dengan parameter hidraulik optimal, seperti koefisien Hazen-Williams, kecepatan aliran, dan batas kehilangan tekanan maksimum. Analisis hidraulik dan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Bentley Hammer memastikan sistem mampu menjaga tekanan operasi yang stabil dan aman, bahkan pada skenario penutupan katup mendadak.

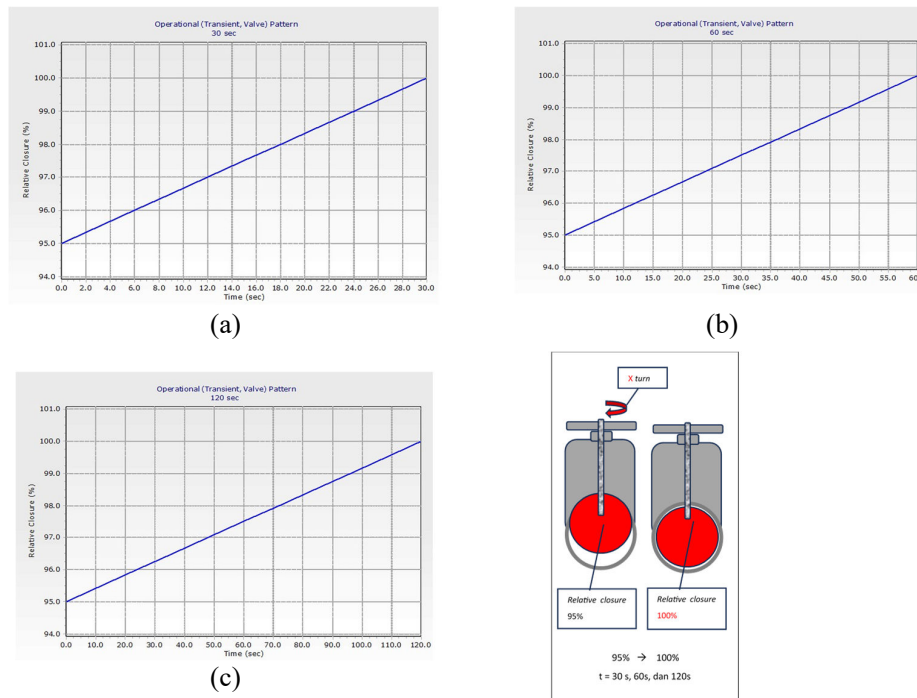
**Tabel 2** Kriteria Desain dan Batasan Operasional

| 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 Teknis JDU JDP 1B 1C

### Skenario Penutupan

Simulasi transien difokuskan pada penutupan gate valve DN 150 mm pada pipa HDPE 160 mm, dengan kondisi awal valve terbuka 5%. Katup ditutup secara bertahap hingga posisi penuh (100%) dalam tiga durasi: 30 detik, 60 detik, dan 120 detik, dengan kenaikan 0,5% setiap interval. Skenario ini bertujuan untuk mengevaluasi fluktuasi tekanan dan risiko water hammer pada berbagai kecepatan penutupan.

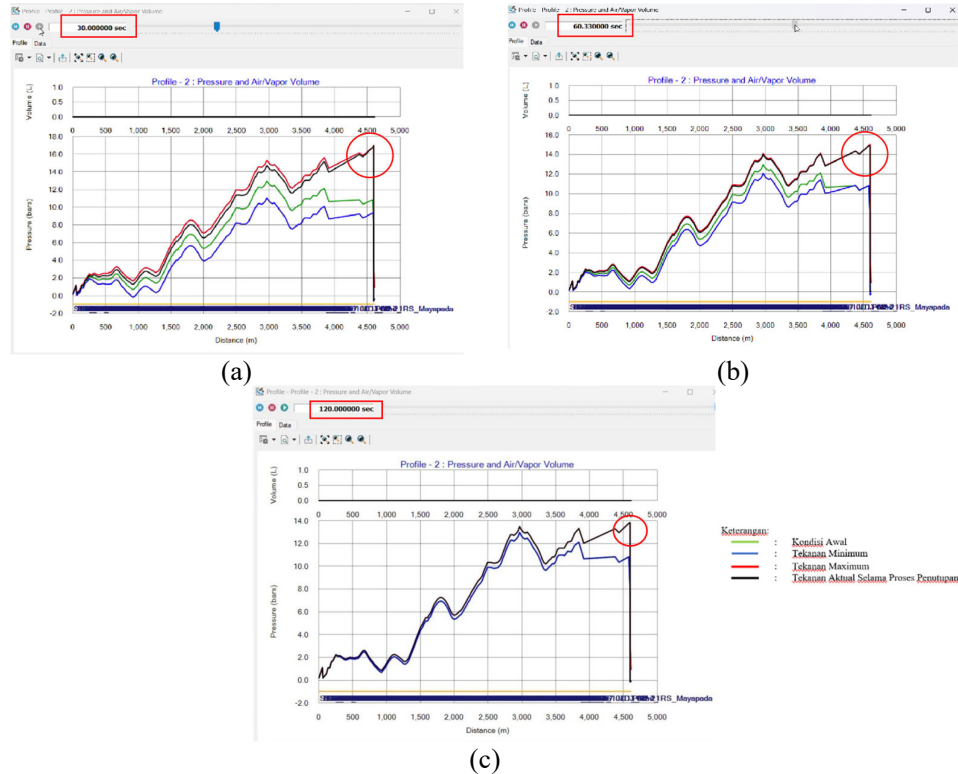


**Gambar 5.** Kurva Simulasi Waktu Penutupan Valve a: 30 s; b: 60s; c: 120s  
Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer, 2025

### 3.2 Hasil Simulasi *Water Hammer* dengan Bentley Hammer

Simulasi fenomena *water hammer* pada sistem distribusi air bersih Persil Mayapada dilakukan menggunakan perangkat lunak Bentley OpenFlows HAMMER dengan metode numerik *Method of Characteristics* untuk memodelkan propagasi gelombang tekanan di sepanjang pipa. Model sistem mencakup Reservoir Induk, pipa transmisi baja (500 mm dan 700 mm), dan pipa distribusi HDPE (400 mm dan 160 mm). Titik kritis terletak pada *gate valve* DN 150 mm di cabang pipa HDPE 160 mm. Simulasi ini menganalisis lonjakan tekanan dengan variasi waktu penutupan katup (30 detik, 60 detik, 120 detik).

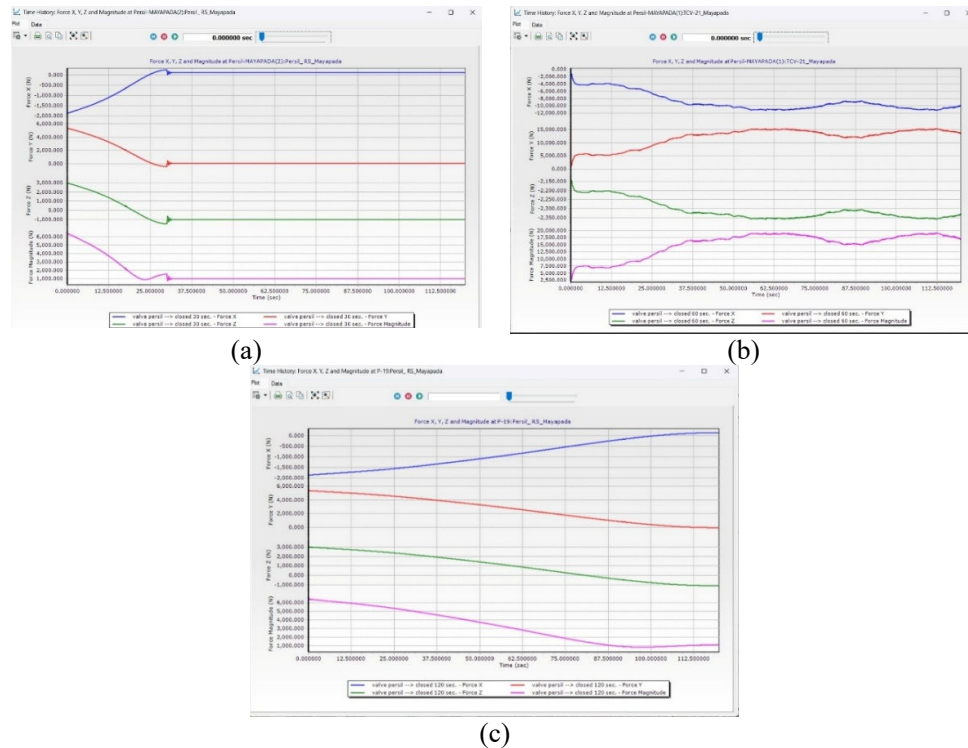
### Hasil Analisis Simulasi (Skenario Penutupan 30s, 60s, 120s)



**Gambar 6.** Grafik Pressure Hasil Analisis Simulasi (a: 30s; b:60s; c:120s)  
Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer, 2025

Simulasi menunjukkan bahwa penutupan katup secara bertahap mengurangi risiko *water hammer*. Pada skenario 30 detik (Gambar 4.4a), tekanan maksimum mencapai 17,0 bar dengan fluktuasi 17,6 bar, berisiko tinggi terhadap kavitasi. Pada skenario 60 detik (Gambar 4.4b), tekanan maksimum turun menjadi 15,0 bar, dengan fluktuasi 15,3 bar, mengurangi risiko kavitasi. Skenario 120 detik (Gambar 4.4c) menunjukkan tekanan maksimum 13,8 bar dan fluktuasi 13,9 bar, menandakan pengurangan dampak transien dan kavitasi. Penutupan valve yang lebih lambat efektif dalam menjaga stabilitas tekanan dan keamanan sistem.

## Pola Perubahan Gaya



**Gambar 7** Grafik Pola Perubahan Gaya (a: 30s; b:60s; c:120s)  
Sumber: Hasil Analisis Bentley Hammer, 2025

Gambar 6 hingga 7 menunjukkan hasil simulasi gaya pada titik pengukuran untuk setiap skenario waktu penutupan katup. Gaya resultan mencerminkan total gaya yang diterima pipa akibat gelombang tekanan, dengan profil gelombang yang menunjukkan dampak waktu penutupan katup terhadap perilaku dinamis sistem. Penutupan katup yang cepat menghasilkan gelombang tekanan dengan amplitudo tinggi dan perubahan mendadak, sedangkan penutupan lebih lambat mengurangi amplitudo dan memperhalus gelombang. Analisis profil gelombang tekanan pada titik kritis, seperti sambungan *tee reducer* dan *valve* DN 150 mm, sangat penting untuk memastikan keamanan dan keandalan sistem distribusi air, terutama dalam kondisi transien.

### 3.3 Pengaruh Waktu Penutupan Katup terhadap Tekanan

Analisis menunjukkan bahwa waktu penutupan katup menentukan besarnya lonjakan tekanan pada sistem. Penutupan cepat memicu fluktuasi gaya tajam yang meningkatkan risiko kerusakan pipa dan sambungan, sedangkan penutupan lebih lambat menghasilkan perubahan yang lebih stabil. Karena itu, pengaturan waktu penutupan yang tepat efektif menurunkan risiko kerusakan sistem.

**Tabel 3** Rekapitulasi *Pressure* Hasil Simulasi

| Parameter                  | 30 detik      | 60 detik | 120 detik |
|----------------------------|---------------|----------|-----------|
| 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: Hasil Olahan Penulis, 2025.

Pada Tabel 3 menunjukkan bahwa semakin cepat penutupan katup, semakin besar tekanan puncak yang dihasilkan. Pada penutupan katup 30 detik, tekanan puncak mencapai 17,0 bar, sementara pada 120 detik, tekanan puncak turun menjadi 13,8 bar. Hasil ini menunjukkan bahwa penutupan katup yang lebih lambat, seperti 120 detik, lebih efektif dalam mengurangi risiko water hammer dan menjaga integritas sistem distribusi air bersih.

### 3.4 Evaluasi Model Simulasi dan Keakuratan Hasil

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap prediksi teori Joukowsky. Persamaan Joukowsky digunakan sebagai acuan teoretis untuk memprediksi lonjakan tekanan akibat penutupan katup mendadak:

**Tabel 4** 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.

Hasil simulasi selaras dengan teori dasar water hammer dan persamaan Joukowsky, serta menunjukkan akurasi yang baik dalam memprediksi dampaknya pada sistem distribusi air. Perbedaan kecil tetap muncul akibat redaman dan fleksibilitas material, sehingga tekanan aktual cenderung lebih rendah dibanding prediksi analitik, sebagaimana juga dilaporkan pada studi eksperimental (Koduro, 2016; Cherian, dkk, 2022).

### 3.5 Rekomendasi Operasional dan Proteksi Teknis

Berdasarkan hasil simulasi, waktu penutupan katup ideal untuk meminimalkan lonjakan tekanan adalah antara 60 hingga 120 detik. Selain itu, disarankan untuk memasang *pressure relief valves* dan *surge tanks* di titik-titik rawan water hammer, serta menerapkan sistem pemantauan tekanan real-time untuk deteksi dini. Hal ini dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi air dan mengurangi risiko kerusakan jangka panjang.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penutupan katup dalam durasi 30 detik menghasilkan tekanan maksimum sebesar 17,0 bar dan tekanan minimum hingga -0,6 bar. Kondisi ini mengindikasikan adanya fluktuasi tekanan yang signifikan dan berpotensi memicu kavitasi serta tegangan berlebih pada dinding pipa. Dalam konteks sistem layanan air perkotaan, tekanan yang melebihi batas desain operasional dapat mempercepat degradasi material, meningkatkan risiko kebocoran, serta memicu gangguan distribusi pada jaringan hilir. Dengan demikian, tekanan transien yang tinggi bukan hanya persoalan teknis hidraulik, tetapi berimplikasi langsung pada stabilitas dan kontinuitas layanan air bersih.

Sebaliknya, skenario penutupan 120 detik menunjukkan penurunan tekanan maksimum menjadi 13,8 bar dengan fluktuasi yang lebih stabil. Hal ini memperlihatkan bahwa pengaturan operasional sederhana seperti durasi penutupan katup dapat berperan sebagai instrumen pengendalian risiko untuk menjaga integritas jaringan distribusi. Stabilitas tekanan berkontribusi terhadap peningkatan keandalan sistem, yang pada akhirnya mendukung keberlanjutan pelayanan kepada masyarakat.

Pada sistem distribusi skala kawasan dengan perbedaan elevasi signifikan seperti SPAM Sepaku, dinamika tekanan menjadi faktor penting dalam perencanaan jaringan jangka panjang. Pertumbuhan kawasan dan peningkatan kebutuhan air di masa depan berpotensi meningkatkan beban operasional sistem, yang pada akhirnya dapat memperbesar risiko tekanan transien jika tidak diantisipasi melalui desain dan prosedur operasional yang adaptif.

Oleh karena itu, hasil simulasi ini dapat menjadi dasar dalam perencanaan utilitas kawasan, khususnya dalam evaluasi titik kritis jaringan, pemilihan material pipa, serta penentuan lokasi perangkat proteksi seperti pressure relief valve atau surge tank. Integrasi hasil analisis transien dalam perencanaan jaringan distribusi mendukung pendekatan ketahanan infrastruktur yang mempertimbangkan kondisi operasional dinamis.

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik dengan parameter operasional yang diasumsikan konstan, seperti debit awal dan kondisi batas sistem. Perubahan penggunaan lahan, peningkatan kebutuhan air akibat pertumbuhan kawasan, serta variasi pola konsumsi harian belum dimodelkan secara dinamis dalam penelitian ini. Selain itu, skenario masa depan seperti peningkatan debit puncak atau perubahan konfigurasi jaringan belum dianalisis secara komprehensif.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini tetap memberikan gambaran awal mengenai sensitivitas sistem terhadap variasi waktu penutupan katup. Untuk pengembangan

selanjutnya, diperlukan integrasi antara model hidraulik transien dengan proyeksi pertumbuhan kebutuhan air dan perencanaan tata guna lahan, sehingga evaluasi ketahanan sistem distribusi dapat dilakukan secara lebih menyeluruh dan adaptif terhadap dinamika perkotaan.

#### 4. PENUTUP

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi waktu penutupan katup berpengaruh signifikan terhadap karakteristik tekanan transien dalam sistem distribusi air SPAM Sepaku. Skenario penutupan cepat selama 30 detik menghasilkan lonjakan tekanan maksimum sebesar 17,0 bar dan tekanan minimum hingga -0,6 bar, yang mengindikasikan potensi risiko kavitasi serta tegangan berlebih pada jaringan pipa. Sebaliknya, penutupan bertahap selama 120 detik mampu menurunkan tekanan maksimum menjadi 13,8 bar dan menghasilkan fluktuasi yang lebih stabil, sehingga mengurangi potensi risiko kerusakan infrastruktur.

Temuan ini menegaskan bahwa stabilitas tekanan bukan hanya persoalan teknis hidraulik, tetapi merupakan faktor penting dalam menjaga keandalan dan kontinuitas layanan air bersih pada kawasan permukiman. Tekanan transien yang tidak terkendali berpotensi meningkatkan risiko kebocoran, gangguan distribusi, serta degradasi aset jaringan, yang pada akhirnya berdampak pada kualitas layanan kepada masyarakat. Dengan demikian, pengaturan operasional seperti durasi penutupan katup dapat diposisikan sebagai strategi mitigasi risiko yang relatif sederhana namun efektif dalam mendukung ketahanan sistem distribusi air.

Dalam konteks perencanaan infrastruktur permukiman, hasil penelitian ini memberikan kontribusi pada pentingnya integrasi analisis hidraulik transien ke dalam perencanaan dan pengelolaan utilitas kawasan. Sistem distribusi air pada kawasan berkembang dengan variasi elevasi dan pertumbuhan kebutuhan air memerlukan pendekatan perencanaan yang mempertimbangkan dinamika tekanan operasional. Oleh karena itu, evaluasi tekanan transien perlu menjadi bagian dari perencanaan jaringan jangka panjang, termasuk dalam penentuan spesifikasi material pipa, perencanaan perangkat proteksi, serta penyusunan standar operasional prosedur.

Secara strategis, penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan ketahanan layanan air tidak selalu bergantung pada intervensi struktural yang kompleks, tetapi dapat dimulai dari optimalisasi pengelolaan operasional berbasis simulasi teknis. Integrasi antara hasil analisis

teknis dan kebijakan operasional SPAM berpotensi memperkuat sistem pelayanan air yang adaptif, andal, dan berkelanjutan dalam mendukung perkembangan kawasan permukiman.

#### 4. Referensi

- Asghari, F., Piadeh, F., Egyir, D., Yousefi, H., Rizzuto, J. P., Campos, L. C., & Behzadian, K. (2023). Resilience assessment in urban water infrastructure: A critical review of approaches, strategies and applications. *Sustainability*, 15(14), 11151. <https://doi.org/10.3390/su151411151>
- Butler, D., Ward, S., Sweetapple, C., Astaraie-Imani, M., Diao, K., Farmani, R., & Fu, G. (2016). Reliable, resilient and sustainable water management: The Safe & SuRe approach. *Global Challenges*, 1(1), 63–77. <https://doi.org/10.1002/gch2.1010>
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied hydraulic transients* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8538-4>
- Cao Z, Xia Q, Guo X, Lu L, Deng J. A Novel Surge Damping Method for Hydraulic Transients with Operating Pump Using an Optimized Valve Control Strategy. *Water*. 2022; 14(10):1576. <https://doi.org/10.3390/w14101576>
- Cherian R, M., Sajikumar, N., & KS, S. (2022). Effect of valve closure time on transient cavitating flow through piping systems. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(sup1), 180-187.
- Farmani, R., Walters, G. A., & Savic, D. A. (2006). Trade-off between total cost and reliability for anytown water distribution network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 161–171.
- Kodura, A. (2016). An analysis of the impact of valve closure time on the course of water hammer. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 63(1), 35–45. <https://doi.org/10.1515/heem-2016-0003>
- Li, Z., Zhao, H., Liu, J., Zhang, J., & Shao, Z. (2022). Evaluation and promotion strategy of resilience of urban water supply system under flood and drought disasters. *Scientific Reports*, 12, 7404. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11436-w>
- Marques, R. C., Berg, S., & Yane, S. (2018). Public–private partnerships and water infrastructure resilience. *Utilities Policy*, 50, 1–10.
- Mugume, S. N., Butler, D., & Fu, G. (2015). The development of a novel resilience assessment framework for water systems. *Water Research*, 81, 114–124.
- M. R. Bazargan-Lari, R. Kerachian, H. Afshar, and S. N. Bashi-Azghadi, “Developing an optimal valve closing rule curve for real-time pressure control in pipes,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 215–225, Jan. 2013, doi: 10.1007/s12206-012-1208-7.
- Wan, W., & Li, F. (2016). Sensitivity analysis of operational time differences for a pump-valve system on water hammer response. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 138(1). <https://doi.org/10.1115/1.4031202>
- Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1993). *Fluid transients in systems*. Prentice Hall.
- 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)