

Pengaruh Closing Time Valve Terhadap Aliran Fluida di Dalam Penstock Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Proyek Pembangunan Bendungan Bener

Firnanda Surya Herdiansyah^{1*}, Burniadi Moballa², Priyo Agus Setiawan³

Program Studi D-IV Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia^{1*}

Program Studi D-IV Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia²

Program Studi D-IV Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia³

Email: firnandasurya@student.ppns.ac.id^{1*}; bmoballa@ppns.ac.id²; privo.as@ppns.ac.id³

Abstract –The Bener Dam Project in Purworejo, Indonesia, aims to meet irrigation and raw water needs while constructing a 10 MW hydropower plant. With a height of 154 to 159 meters, the dam also mitigates flood risks. This study analyses the hydropower plant's operations, particularly the water hammer phenomenon, which can cause excessive pressure and damage the piping system. Using transient analysis and Computational Fluid Dynamics (CFD), the research reveals a water flow rate of 18.09 m³/s with velocities of 11.75 m/s in a 1.4-meter pipe and 16.00 m/s in a 1.2-meter pipe. Finite Element Analysis (FEA) shows that closing the valve within 50 seconds generates a pressure of 19.350 bar, safely below the 19.418 bar limit, with the highest Von Mises stress at 83.36 MPa in the pipe bending area and 79.52 MPa near the valve, both within the safe limit of 176.5 MPa. The findings confirm the hydropower plant's safe operation under the 50-second valve closure scenario, offering crucial guidance for managing water hammer risks and ensuring the project's long-term sustainability and efficiency.

Keywords: Closing Time Valve, Computational Fluid Dynamic, Finite Element Analysis, Water Hammer.

1. PENDAHULUAN

Proyek Pembangunan bendungan Bener di Purworejo, Indonesia, merupakan proyek berperan penting untuk memenuhi kebutuhan irigasi dan air baku. Selain itu, digunakan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) sebagai komponen utama yang mampu menghasilkan daya sebesar 10 MW. Pengembangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan sebuah inovasi penting dalam pemanfaatan sumber energi terbarukan. Pembangunan PLTA perlu adanya pertimbangan kapasitas aliran air, hal ini berdampak agar sistem beroperasi optimal, menjamin efisiensi, dan produktivitas suatu operasi PLTA. Sehingga, dalam pembangunan bendungan ini dirancang untuk dapat mencapai tinggi 159 meter. Namun, proyek ini juga dihadapkan pada tantangan teknis, terutama dalam mengelola dampak *water hammer* yang terjadi dalam aliran fluida. Fenomena *Water hammer* dapat menyebabkan fluktuasi tegangan pada pipa yang dapat merusak peralatan dan menghambat kelangsungan pengoperasian. Maka dari itu perlu dilakukan analisis mengenai pemilihan waktu penutupan katup yang tepat agar dapat meminimalkan resiko kerusakan pada

sistem PLTA dan menjamin keberhasilan operasi PLTA. Analisis fenomena *water hammer* yang terjadi pada sistem PLTA menggunakan variabel waktu untuk mengetahui pengaruh waktu penutupan *valve* terhadap *water hammer*.

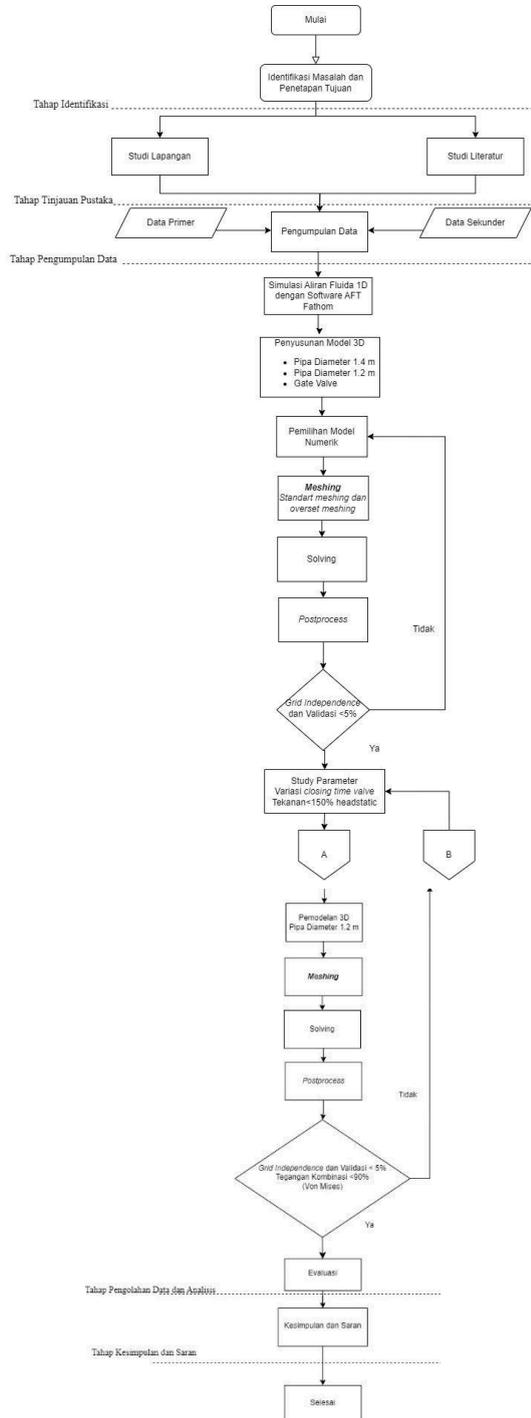
2. METODOLOGI

2.1 Diagram Alir Penelitian

Fenomena *water hammer* yang terjadi pada sistem PLTA memberikan langkah awal dalam mengidentifikasi masalah terhadap fenomena yang terjadi, dengan adanya perumusan masalah maka terbentuklah tujuan penelitian untuk menjawab fenomena yang terjadi. Untuk menjawab rumusan masalah perlu memahami dasar teori yang tepat agar tercapainya tujuan dan perlu memahami kondisi dari lokasi agar dapat mengetahui kondisi secara aktual. Penggunaan dasar teori dan kondisi aktual di lokasi diperlukan pengumpulan data yang mendukung dalam penelitian. Data yang diperoleh dilakukan analisis untuk membantu dalam menjawab rumusan masalah. Berikut merupakan tahapan dalam pengolahan data yang telah diperoleh:

1. Simulasi Aliran Fluida 1D dengan *Software AFT Fathom*
2. Penyusunan Model 3D

3. Pemilihan Model Numerik
4. Meshing
5. Solving and postprocess
6. Study Parameter
7. Grid independence dan Validasi
8. Evaluasi



Gambar 1 Diagram alir

2.2 Losses factor turbine

Aliran pada sebuah sistem perpipaan memiliki nilai head agar aliran tersebut dapat diketahui kebutuhannya. Head dapat diketahui dengan menjumlah head lainnya, salah satunya ada headloss minor. Headloss minor merupakan nilai head yang diakibatkan gesekan pada

komponen pipa yang mempunyai disebut sebagai losses factor. Nilai losses factor untuk turbin menggunakan dasar headloss minor sebagai berikut:

$$K = \frac{2 \cdot g \cdot H}{v^2} \tag{1}$$

2.3 Persamaan Water Hammer

Water hammer adalah fenomena yang terjadi dalam sistem pipa saat terjadi perubahan tiba-tiba dalam aliran fluida, seperti penutupan katup dengan cepat. Ini dapat menghasilkan gelombang tekanan yang menjalar melalui sistem, menciptakan lonjakan tekanan yang dapat merusak pipa dan komponen sistem lainnya. Analisis water hammer berdasarkan persamaan momentum dan kontinuitas [2]. Persamaan kontinuitas yang digunakan sebagai berikut:

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

Nilai a pada Persamaan (2) dapat dihitung menggunakan persamaan [2] sebagai berikut:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{k}{p}}{1 + \frac{k \cdot d}{E \cdot t \cdot s}}} \tag{3}$$

2.4 Persamaan Navier-Stokes

Substitusi dari persamaan tegangan geser dan lengkungan dapat disebut dengan persamaan Navier-Stokes [1]. Persamaan Navier-Stoker yang digunakan sebagai berikut:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + g \tag{4}$$

2.5 Persamaan kekekalan energi

Kekekalan energi pada partikel fluida diyakinkan dengan perhitungan laju perubahan energi dari partikel fluida ke jumlah laju partikel fluida, laju penambahan panas dari fluida dan laju peningkatan energi disebabkan oleh sumber [1]. Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$\rho \frac{De}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{5}$$

2.6 Head akibat water hammer

Kenaikan tekanan akibat water hammer yang dihasilkan oleh penutupan mendadak dapat di formulasikan sebagai berikut [3]:

$$h_{ss} = \frac{a \cdot \Delta v}{g} \tag{6}$$

$$h_{nss} = h_{ss} \left(\frac{\tau_c}{\Delta \tau} \right) \tag{7}$$

$$Pop = h_{ss} + h_{nss} \tag{8}$$

2.7 Critical time

Kenaikan head akibat water hammer terjadi pada waktu tertentu, maka perlu diketahui critical time akibat water hammer sebagai berikut [3]:

$$\tau_c = \frac{2L}{a} \tag{9}$$

2.8 Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) mengacu pada kode komputer komersial dan eksklusif yang menyelesaikan apa yang disebut persamaan Navier-Stokes untuk massa, momentum, dan perpindahan panas pada banyak titik kisi dari bidang aliran tiga dimensi. Kecepatan komputasi dan waktu running diatur oleh jumlah node mesh, dengan meningkatkan meshing yang lebih halus, akan memberikan hasil yang lebih akurat. Namun, hal ini dibatasi oleh daya/kecepatan komputasi dari kode CFD. Hasil simulasi bergantung pada keterampilan pemodel serta kode CFD pada komputer yang digunakan.

2.9 SALOME

SALOME adalah salah satu *Software* yang menyediakan platform umum untuk 3D *modelling* dan *preprocessing*. SALOME dapat menangani simulasi numerik besar, seperti yang ditemukan dalam studi multi-fisika dan/atau parametrik [4].

2.10 OpenFOAM

OpenFOAM memiliki berbagai fitur untuk menyelesaikan apa pun mulai dari aliran fluida kompleks yang melibatkan reaksi kimia, turbulensi dan perpindahan panas, hingga akustik, mekanika padat, dan elektromagnetik. Pada dasarnya *OpenFOAM* digunakan sebagai media penyelesaian (*solving*) dalam CFD [5].

2.11 ParaView

ParaView dapat dengan cepat membuat visualisasi untuk menganalisis data mereka menggunakan teknik kualitatif dan kuantitatif. Eksplorasi data dapat dilakukan secara interaktif dalam 3D atau secara terprogram menggunakan kemampuan pemrosesan *batch* ParaView.

2.12 Longitudinal Stress

Tegangan longitudinal adalah tegangan yang searah dengan panjang pipa dan merupakan penjumlahan dari tegangan aksial (*axial stress*), *bending stress*, dan tegangan tekanan (*pressure stress*) [6].

2.13 Hoop Stress

Tegangan tangensial (σ_{SH}) ditimbulkan oleh tekanan internal yang bekerja secara tangensial dan besarnya bervariasi tergantung pada tebal dinding pipa [6]. Tegangan ini disebabkan oleh tekanan dalam pipa dimana tekanan ini bersumber dari fluida dan nilainya selalu positif jika tegangan cenderung membelah pipa menjadi dua.

2.14 Principal Stress

Tegangan geser adalah tegangan yang arahnya paralel dengan penampang permukaan pipa. Tegangan geser pada pipa bisa disebabkan oleh gaya geser yang bekerja pada permukaan pipa atau yang arahnya sejajar permukaan.

2.15 Combination Stress

Tegangan kombinasi merupakan tegangan yang dihasilkan dari kombinasi tegangan yang terjadi pada sistem. Menurut Hencky dan Huber persamaan tegangan kombinasi sebagai berikut:

$$\sigma_g^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau^2 \tag{10}$$

3. PEMBAHASAN

3.1 Waktu Kritis Water Hammer

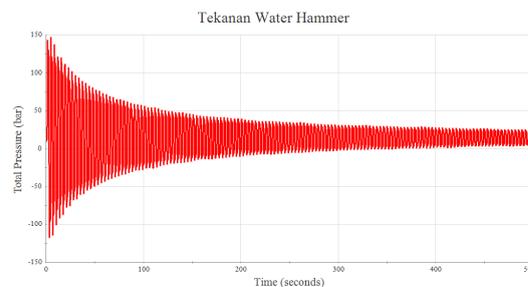
Perhitungan *critical time* menggunakan Persamaan (9). Perhitungan *critical time* dari fenomena *water hammer* digunakan sebagai parameter penting pada saat pemodelan simulasi. Nilai *critical time* didapatkan sebagai berikut:

$$\tau_c = \frac{2 \times 940 \text{ m}}{1043 \text{ m/s}} = 1,8 \text{ s}$$

Berdasarkan perhitungan *critical time*, didapatkan nilai sebesar 1,8 detik. Nilai *critical time* digunakan dalam menganalisis fenomena *water hammer*. Hasil yang didapatkan dari simulasi *water hammer* dapat dilihat pada Gambar 2 dan nilai tekanan akibat *water hammer* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2 Hasil Simulasi Water Hammer



Gambar 3 Grafik tekanan akibat water hammer

Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan maksimum sebesar 148 bar pada pipa diameter 1,2 meter dan tekanan maksimum pada pipa 1,4 meter sebesar 136,01 bar. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin kecil diameter pipa, semakin besar kecepatan gelombang tekanan yang dihasilkan, yang menyebabkan lonjakan tekanan yang lebih tinggi.

3.2 Variasi Closing Time Valve

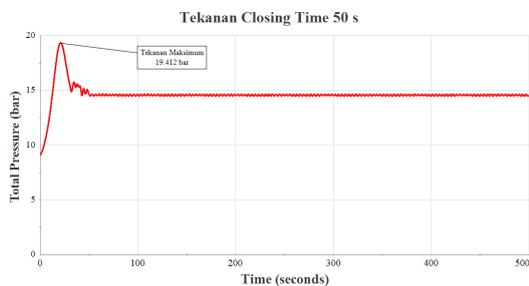
Variasi waktu penutupan *valve* ditujukan untuk mengatasi fenomena *water hammer*, pembahasan ini dilakukan untuk mengetahui waktu yang optimal agar tidak terjadi *water*

hammer pada pipa. Variasi waktu yang digunakan dimulai pada penutupan $t = 30$ detik hingga $t = 150$ detik. Hasil yang didapatkan adalah tekanan tertinggi sebesar 24,003 bar pada $t = 30$ detik dan tekanan terendah sebesar 15,514 bar pada $t = 150$ detik. Nilai tekanan yang diijinkan adalah 140% dari *head* statik, maka waktu terkecil yang diijinkan pada $t = 50$ detik. Berdasarkan simulasi, nilai tekanan dan waktu yang diijinkan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik tekanan terhadap tekanan yang diijinkan

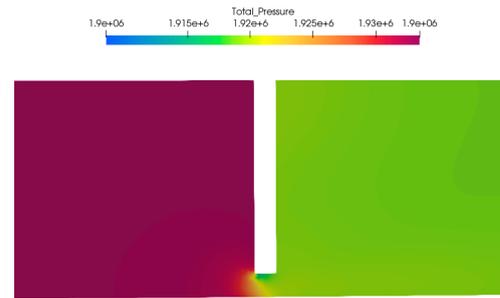
Berdasarkan simulasi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa $t = 50$ detik merupakan nilai yang optimal untuk penutupan *valve* saat keadaan darurat dengan nilai tekanan sebesar 19,412 bar dengan nilai yang diizinkan sebesar 19,418 bar. Grafik lonjakan tekanan saat *closing-time* 50 s dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Grafik tekanan *closing-time valve* 50 s

3.3 Analisa Computational Fluid Dynamics

Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dilakukan untuk menganalisis distribusi tekanan dalam sistem perpipaan selama penutupan *valve* selama 50 detik. Salah satu fokus utama dari analisis ini adalah untuk menentukan tekanan total ketika *valve* tertutup 90%.. Hasil simulasi tekanan total di tampilkan pada Gambar 7.



Gambar 6 Total Pressure Pada Area Valve

Dari hasil simulasi, didapatkan tekanan total maksimum sebesar 1,935 MPa atau sekitar 19,35 bar. Tekanan tertinggi ini berada pada area penutupan *valve*, yang merupakan titik kritis dalam sistem perpipaan.

3.4 Evaluasi Tekanan Maksimum Pada Ambang Batas

Dari hasil yang di peroleh menganalisa tekanan dalam sistem perpipaan menggunakan tiga metode berbeda: Metode Michaud, AFT Impulse, dan Computational Fluid Dynamics (CFD). Di dapat hasil sebagai berikut analisa lonjakan tekanan saat penutupan *valve* selama 50 detik yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil tekanan berdasarkan metode analisis

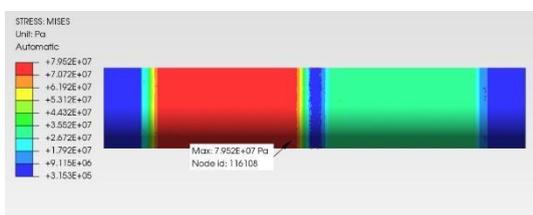
Metode	Tekanan (bar)
Michaud	19,181
AFT Impulse	19,412
Computational Fluid Dynamic	19,350

Dalam analisis ini, Metode Michaud, AFT Impulse, dan CFD menunjukkan perbedaan dalam lonjakan tekanan namun tidak jauh berbeda hasil yang di dapatkan dari AFT Impulse dan *Computational Fluid Dynamic* yang tercatat (masing-masing 19,181 Bar, 19,412 Bar, dan 19,350 Bar). Hasil dari metode Michaud menunjukkan kesesuaian dengan simulasi penutupan gate *valve* secara transient. Hasil dari ketiga metode dengan persamaan Michaud, CFD dan AFT Impulse masuk dalam kriteria aman karena di bawah nilai batas yang diizinkan oleh Justifikasi Teknis Hidromekanikal Bendungan Bener, yaitu 19,418 Bar dan membuktikan bahwa penutupan katup selama 50 detik merupakan waktu ambang batas untuk penutupan secara darurat bagi katup pengaman. Namun, sebelum memastikan skenario tersebut memenuhi syarat teknis, perlu dilakukan analisis tegangan yang terjadi pada tekanan penutupan katup selama 50 detik. Analisis tegangan ini akan memastikan bahwa material dan struktur sistem perpipaan mampu menahan tekanan yang dihasilkan, sehingga skenario penutupan katup tersebut

dapat dianggap aman dan sesuai dengan spesifikasi teknis yang ditetapkan.

3.5 Analisis Tegangan dengan Metode Elemen Hingga

Dari pembebanan *Uniform Pressure* dan *Import Pressure* pada model analisa *Finite Element Method (FEM)* menggunakan *software Prepomax* di dapatkan hasil dari analisis tegangan yang dilakukan pada pipa selama skenario waktu penutupan katup 50 detik. Hasil ini menggambarkan distribusi tegangan dalam pipa dan mengidentifikasi area dengan tegangan maksimum. Analisis ini penting untuk memastikan bahwa pipa beroperasi dalam batas aman dan sesuai dengan standar teknis yang telah ditetapkan. Hasil nilai tegangan di tampilkan pada Gambar 7 dan Gambar 8



Gambar 7 Nilai tegangan pada area valve



Gambar 8 Nilai tegangan pada area bending

Dari hasil analisis, tegangan kriteria Von Mises yang terjadi pada penutupan katup 50 detik tertinggi sebesar 83,36 MPa pada area *bending* pipa dan 79,52 MPa pada area pipa dengan *valve*. Semua nilai tegangan ini berada di bawah batas yang diizinkan sebesar 176,5 MPa sesuai justifikasi teknis Bendungan Bener. Hal ini menunjukkan bahwa pipa beroperasi dalam batas aman untuk semua skenario penutupan yang dianalisis, memberikan jaminan terhadap keandalan dan keamanan operasional sistem hidromekanikal.

4. KESIMPULAN

Pengaruh waktu penutupan *valve* terhadap tekanan dalam pipa memberikan hubungan yang kuat dengan fenomena *water hammer*. Semakin cepat waktu penutupan waktu akan memberikan kenaikan tekanan yang lebih dibandingkan dengan waktu penutupan *valve* yang lebih lambat. Berdasarkan analisis yang dilakukan waktu yang efektif adalah $t = 50$ detik dengan nilai

kenaikan tekanan yang masih dalam batas tekanan sebesar 19,35 bar menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamic*. Kenaikan nilai tekanan akibat penutupan *valve* akan memberikan nilai tegangan pada pipa. Nilai tegangan yang besar terjadi ketika nilai kenaikan tekanan memiliki nilai besar juga dan sebaliknya jika nilai kenaikan kecil maka nilai tegangan kecil. Analisis tegangan yang telah dilakukan, nilai Von Mises tertinggi pada $t = 50$ detik sebesar 83,36 MPa pada *bending area* dan 79,52 MPa pada area *valve*. Maka nilai tegangan yang terjadi pada pipa akibat *water hammer* diijinkan.

5. DAFTAR ISI

- [1] H. K. V. a. W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, England: Bell & Bain Limited, 2007.
- [2] W. S. H. X. J. W. L. Z. Yong Han, "Effects of Closing Times and Laws on Water Hammer in a Ball Valve Pipeline," *Water 2022*, p. 14, 2022.
- [3] A. A. Arris S Tijsseling, "The Joukowski Equation for Fluids and Solids," *Technische Universiteit Eindhoven.*, vol. 0608, 2006.
- [4] A. B. Alejandro Ribés, "Visualizing Results in The SALOME Platform For Large Numerical Simulations: An integration of ParaView," in *2014 IEEE 4th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV)*, paris, 2014.
- [5] OpenCFD Ltd, *User Guide OpenFOAM*, OpenCFD Ltd, 2018.
- [6] A. Chamsudi, *Piping Stress Analysis : Teori dan Aplikasi*, 2005.