

PENGARUH LOKASI *SURGE TANK* TERHADAP BIAYA PIPA PESAT WADUK KEDUNG OMBO

Intan Nurrahma Widyanti ; Gurawan Djati Wibowo, S.T., M.Eng.

**Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah
Surakarta**

Abstrak

Pipa pesat merupakan salah satu komponen struktur PLTA yang berfungsi untuk menyalurkan air bertekanan tinggi menuju turbin air. Guna meredam pengaruh *water hammer* yang membahayakan pipa pesat, struktur ini dilengkapi dengan *surge tank*. Penempatan *surge tank* sangat berpengaruh pada biaya konstruksi pipa pesat. Penelitian ini berusaha menghitung pengaruh letak *surge tank* terhadap biaya pipa pesat. Dari beberapa letak *surge tank* yang ditentukan peneliti, selanjutnya dilakukan analisis *water hammer* sehingga dapat dibandingkan biaya pipa pesatnya. Analisis dalam penelitian ini yaitu dengan melakukan analisis hidraulika pipa pesat yang dipengaruhi oleh desain belokan pipa, kehilangan energi karena gesekan antara air dan pipa pesat, dan nilai *water hammer* yang didapatkan dengan pengereman air di dalam pipa pesat yang diasumsikan dilakukan penutupan katup sekitar 10 detik. Berdasarkan hasil tersebut *water hammer* yang terjadi ditambahkan di dalam analisis tekanan di pipa pesat. Desain pipa pesat, diameter pipa, dan tebal pipa sudah didesain oleh Snowy Mountains Engineering Corporation (SMEC). Selanjutnya menghitung besarnya diameter tulangan di pipa beton dengan persamaan gaya yang memecahkan pipa pesat setara dengan 1/3 dari kekuatan plat baja dan kekuatan dari tulangan beton. Berdasarkan hasil analisis didapatkan kesimpulan bahwa biaya pipa pesat dengan pipa tanpa *surge tank* sebesar Rp 557.275.750.448,00, *surge tank* 90 m dari hulu sebesar Rp 479.241.155.064,00, *surge tank* 140 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00, *surge tank* 190 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00, dan *surge tank* 240 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00.

Kata kunci: biaya, lokasi *surge tank*, pipa pesat, *water hammer*

Abstract

Penstock is one of the components of the hydropower structure that functions to channel high-pressure water to the water turbine. In order to reduce the influence of water hammer that endangers the penstock, this structure is equipped with a surge tank. The placement of the surge tank greatly affects the construction cost of the penstock. This study attempts to calculate the effect of the location of the surge tank on the cost of the penstock. From several surge tank locations determined by the researcher, then a water hammer analysis is carried out so that the cost of the penstock can be compared. The analysis in this study is by conducting a hydraulic

analysis of the penstock which is influenced by the design of the pipe bend, energy loss due to friction between water and the penstock, and the water hammer value obtained by braking the water in the penstock which is assumed to be done by closing the valve for about 10 seconds. Based on these results, the water hammer that occurred was added to the pressure analysis in the penstock. The penstock design, pipe diameter, and pipe thickness have been designed by Snowy Mountains Engineering Corporation (SMEC). Furthermore, calculating the diameter of the reinforcement in the concrete pipe with the equation of the force that breaks the penstock is equivalent to 1/3 of the strength of the steel plate and the strength of the concrete reinforcement. Based on the analysis results, it was concluded that the cost of a penstock with a pipe without a surge tank is Rp 557.275.750.448,00, a surge tank 90 m from upstream is Rp 479.241.155.064,00, a surge tank 140 m from upstream is Rp 455.385.393.949,00, a surge tank 190 m from upstream is Rp 455.385.393.949,00, and a surge tank 240 m from upstream is Rp 455.385.393.949,00.

Keywords: cost, location of surge tank, penstock, water hammer

1. PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Waduk Kedung Ombo terletak di Kabupaten Grobogan, dengan daerah genangannya meliputi 3 wilayah Administratif Kabupaten yaitu Kabupaten Grobogan, Kabupaten Boyolali dan Kabupaten Sragen. Waduk Kedung Ombo direncanakan dengan fungsi sebagai keperluan penyedia air irigasi, PLTA, penyedia air baku untuk keperluan domestik dan air proses untuk keperluan industri.

PLTA merupakan solusi untuk memenuhi kebutuhan masyarakat akan energi listrik yang semakin meningkat. Di dalam pasal 20 ayat 4 Undang-Undang No. 30 tahun 2007 tentang Energi dinyatakan bahwa penyediaan dan pemanfaatan energi baru terbarukan wajib ditingkatkan, maka penggunaan air untuk menggerakkan turbin merupakan sumber daya yang terbarukan (*renewable water resources*) dan menjadikan PLTA sebagai sistem pembangkit listrik yang terjangkau dan ramah lingkungan. Salah satu bagian dari PLTA yang mempunyai peranan penting yaitu pipa pesat (Kisto & Hermanto, 2023). PLTA Waduk Kedung Ombo terdiri atas bangunan *intake*, pipa pesat, turbin dan *power house*. Pipa pesat merupakan salah satu komponen struktur PLTA yang berfungsi untuk menyalurkan air dari tampungan air menuju turbin yang mempunyai perbedaan elevasi yang cukup besar.

Perbedaan ini menimbulkan tekanan dalam pipa cukup tinggi sehingga diperlukan struktur yang cukup kuat. Namun pembangunan PLTA yang menggunakan pipa pesat dengan ketebalan yang besar, akan memerlukan biaya yang mahal apabila tanpa adanya perhitungan yang detail agar tetap ekonomis dan mampu menahan gaya utama saat terjadi tekanan akibat *water hammer*. Tekanan *water hammer* ini terjadi ketika katup turbin ditutup secara tiba-tiba. Pada proyek pembangkit listrik tenaga air (PLTA), katup terdiri dari katup pipa dan katup turbin (Dandekar & Sharma, 1991). Pada hal ini Waduk Kedung Ombo memiliki pipa pesat dengan panjang terowongan 270 m dan tidak memiliki bangunan *surge tank*. Berdasarkan hal tersebut ketebalan pipa yang digunakan cukup tebal agar dapat menahan tekanan ketika terjadi *water hammer*. Hal ini menyebabkan biaya yang dibutuhkan cukup besar untuk pipa pesat ini.

Ada beberapa studi sejenis yang pernah dilakukan. Iswara (2017) melakukan evaluasi keamanan pipa pesat Waduk Kedungombo terhadap *water hammer*. Dalam penelitiannya dilakukan dengan menganalisis *water hammer* yang terjadi dengan beberapa metode yaitu metode *steady flow*, Allievi, Algebraic, dan Grafik Bergeron. Ruswanto (2007) melakukan kajian ulang perencanaan pipa pesat Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Wonogiri. Dalam studi ini dilakukan dengan mengetahui tingkat keamanan/*safe factor* pipa pesat pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan mengoptimalkan desain pipa pesat dengan beton bertulang tanpa baja *corten*.

Penelitian ini dilakukan perhitungan pipa yang lebih ekonomis dengan menambahkan bangunan *surge tank* sebagai salah satu bangunan yang berfungsi dalam mengurangi tekanan *water hammer*. Dengan adanya *surge tank*, maka momentum air saat katup ditutup tiba-tiba di terowongan tidak cepat rusak dan air akan tetap mengalir melewati *surge tank*. Air di dalam *surge tank* akan naik turun dan suatu saat terdapat keadaan seimbang, lalu muka air dalam *surge tank* diam (Featherstone, 1982). Analisis dilakukan dengan peletakan lokasi *surge tank* yang berbeda. Hasil yang diharapkan yaitu dapat memperoleh biaya pipa pesat yang lebih ekonomis, efisien dan aman.

1. 2 Rumusan Masalah

Penempatan *surge tank* berpengaruh terhadap dampak *water hammer* pada pipa pesat yang akan mempengaruhi biaya pipa pesat. Oleh karena itu perlu diketahui pengaruh penempatan *surge tank* terhadap biaya pipa pesat.

1. 3 Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan yang meluas, penulis telah menetapkan batasan dalam penelitian sebagai berikut :

1. Studi ini ditekankan pada analisis biaya yang dibutuhkan untuk pipa pesat pada Waduk Kedung Ombo dengan adanya bangunan *surge tank* serta mempertimbangkan keamanan *water hammer*.
2. Data desain pipa pesat dari perencanaan pipa pesat Waduk Kedung Ombo oleh Snowy Mountains Engineering Corporation (SMEC) bekerja sama dengan PT. Indah Karya.
3. Desain penulangan pipa pesat dengan $SF = 3$.
4. Konstruksi *surge tank* tidak diperhitungkan.

1. 4 Tujuan Penelitian

Mengetahui pengaruh lokasi atau posisi *surge tank* terhadap biaya pipa pesat.

1. 5 Manfaat Penelitian

1. Akademik

Dapat digunakan untuk referensi analisis optimasi biaya pipa pesat pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA)

2. Aplikasi

Dapat digunakan untuk membantu mengoptimalkan kebutuhan biaya pipa pesat pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA)

1. 6 Landasan Teori

1. 6. 1 Kehilangan Energi

Salah satu faktor yang dominan untuk diperhatikan pada aliran di dalam pipa, adalah tinggi hilang energi.

a) Persamaan Darcy-Weisbach

$$hf = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (1)$$

di mana :

hf : tinggi hilang akibat gesekan (*friction*)

f : faktor gesek (*friction factor*)

L : panjang pipa,

D : diameter pipa,

v : kecepatan aliran,

g : percepatan gravitasi.

b) Persamaan Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (2)$$

Dengan,

k : kekasaran efektif dinding dalam pipa,

D : diameter dalam pipa,

Re : bilangan Reynolds $\left(\frac{vD}{\nu} \right)$

ν : kekentalan kinematik

c) Pengecilan pipa

$$hf = 0,5 \frac{V_2^2}{2g} \quad (3)$$

d) Belokan pipa

$$hf = Kb \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

1. 6. 2 Analisa *Water Hammer*

Kasus *Steady Flow*

Bila air dalam pipa mempunyai kecepatan v dan katup turbin ditutup maka timbul gaya (F) sebesar sebagai berikut :

$$\text{Gaya } F = \frac{\ell.A.\rho.v}{\Delta t} \quad (5)$$

Tambahan tekanan oleh gaya tersebut adalah :

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\ell.A.\rho.v}{\Delta t} \quad (6)$$

$$h \text{ tambahan} = \frac{p}{\rho g} = \frac{\ell.v}{g.\Delta t} \quad (7)$$

Dengan,

A : luas penampang pipa

ρ : masa jenis

ℓ : panjang kolom air yang terhenti

Δt : waktu penutupan katup secara penuh

v : kecepatan aliran

1. 6. 3 Analisis Pipa Pesat terhadap *Water Hammer*

Persamaan mekanika keseimbangan gaya yang akan memecahkan pipa dengan gaya yang akan melawan adalah sebagai berikut:

$$P \times D \times L = 2\sigma_c \times L \times \Delta t_c + 2\sigma_s \times L \times \Delta t_s \quad (8)$$

$$SF = \frac{2\sigma_c \times L \times \Delta t_c + 2\sigma_s \times L \times \Delta t_s}{P \times D \times L} \quad (9)$$

Pipa pesat dianggap aman terhadap *water hammer* jika $SF = 3$

Dengan,

P : tekanan (N/m^2)

D : diameter pipa (m)

- SF : *safe faktor*
- L : panjang tinjauan (m)
- σ_c : tegangan tarik beton (Mpa)
- σ_s : tegangan leleh baja (Mpa)
- Δt_c : tebal beton (mm)
- Δt_s : tebal baja (mm)

2. METODE

Dalam kajian ini ada beberapa tahapan analisa yakni:

- Tahapan Persiapan
Mempelajari literatur-literatur penelitian, merumuskan masalah dan tujuan penelitian.
- Pengumpulan Data
Mengumpulkan data sekunder dari desain pipa pesat oleh Snowy Mountain Engineering Corporation (SMEC), serta data harga bahan di pasaran.
- Analisis dan Pembahasan
Tahapan analisis berisi analisis kehilangan energi (Triatmojo, 1993), analisis *water hammer* terhadap pipa pesat dengan metode *steady flow* (Patty, 1995), analisis desain tulangan di pipa pesat dan analisis biaya pipa pesat. Selain itu tahapan ini juga membandingkan hasil dari analisis yang dilakukan.
- Kesimpulan dan Saran
Kesimpulan dari hasil akhir pembahasan serta saran untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Kehilangan Energi

Kehilangan energi pipa pesat menggunakan persamaan Bernoulli:

$$EA = EB + hf$$

$$Za + \frac{Pa}{\gamma} + \frac{Va^2}{2g} = Zb + \frac{Pb}{\gamma} + \frac{Vb^2}{2g} + \left(0,5 + Kb1 + Kb2 + f \frac{L}{D} + 10\right) \frac{V^2}{2g}$$

$$90 + \frac{Pa}{\gamma} + \frac{0^2}{2g} = 32 + \frac{Pb}{\gamma} + \frac{Vb^2}{2g} + \left(0,5 + 0,0411 + 0,0425 + f \frac{270}{3,80} + 10\right) \frac{V^2}{2g}$$

$$58 = \left[f \frac{270}{3,80} + 11,5836 \right] \frac{v^2}{2g}$$

$$f = \frac{\frac{58 \cdot 2g}{v^2} - 11,5836}{71,053} \quad (10)$$

Kehilangan energi pipa pesat menurut persamaan Colebrook - White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (11)$$

Menentukan kecepatan aliran (v) di pipa pesat dengan substitusi persamaan (10) & (11)

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{\frac{58 \cdot 2g}{v^2} - 11,5836}{71,053}}} = -2 \log \left[\frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\frac{\frac{58 \cdot 2g}{v^2} - 11,5836}{71,053}}} \right]$$

Dengan menggunakan metode *trial & error*, mencoba-coba memasukkan nilai kecepatan aliran pipa pesat (v) ketika elevasi muka air maksimum di waduk +90 m dan sampai di outlet dengan elevasi +32 m, maka nilai selisih yang paling minimal didapatkan yaitu:

$$4,898380 = 4,897907$$

Berdasarkan analisis di atas, maka kecepatan aliran di pipa pesat ketika elevasi muka air maksimum, $v = 8,84522$ m/dt.

3. 2 Analisis Tambahan Tekanan akibat *Water Hammer*

Analisis ini dihitung menggunakan pendekatan *Steady Flow*. Dari analisis ini, maka akan didapatkan besarnya tambahan tekanan pada pipa akibat peristiwa pukulan air (*water hammer*) dari penutupan katup yang secara tiba-tiba yang dinyatakan dengan adanya tambahan ketinggian tekanan air.

3. 2. 1 Pipa Pesat Tanpa *Surge Tank*

Menentukan ketinggian tekanan hidrostatik awal secara analitis (tiap 50 m)

$$h_{00} = \left[\text{Elv. Maks} - 0,5 \frac{v^2}{2g} \right] - \text{Elv. Inlet}$$

$$= \left[90 - 0,5 \times \frac{8,845^2}{2 \times 9,81} \right] - 57,50$$

$$= 88,006 - 57,50$$

$$h_{00} = 30,507 \text{ m}$$

$$h_{050} = \left[88,006 - f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right] - \text{Elv. pipa}$$

$$= \left[88,006 - 0,0417 \frac{50}{3,8} \times \frac{8,845^2}{2 \times 9,81} \right] - 57,42$$

$$= 85,819 - 57,42$$

$$h_{050} = 28,399 \text{ m}$$

$$h_{100} = \left[85,819 - f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right] - \text{Elv. pipa}$$

$$= \left[85,819 - 0,0417 \frac{50}{3,8} \times \frac{8,845^2}{2 \times 9,81} \right] - 57,34$$

$$= 83,633 - 57,34$$

$$h_{100} = 26,293 \text{ m}$$

$$h_{150} = \left[83,633 - f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right] - \text{Elv. pipa}$$

$$= \left[83,633 - 0,0417 \frac{50}{3,8} \times \frac{8,845^2}{2 \times 9,81} \right] - 57,27$$

$$= 81,446 - 57,27$$

$$h_{150} = 24,176 \text{ m}$$

$$h_{200} = \left[81,446 - k_{b1} \times f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right] - \text{Elv. Pipa}$$

$$= \left[81,446 - 0,0411 \times 0,0417 \frac{50}{3,8} \times \frac{8,845^2}{2 \times 9,81} \right] - 44,29$$

$$= 79,095 - 44,29$$

$$h_{200} = 34,805 \text{ m}$$

$$h_{250} = \left[79,095 - k_{b2} \times f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right] - \text{Elv. Pipa}$$

$$= \left[79,095 - 0,0425 \times 0,0417 \frac{50}{3,8} \times \frac{8,845^2}{2 \times 9,81} \right] - 31,82$$

$$= 76,739 - 31,82$$

$$h_{0250} = 44,919 \text{ m}$$

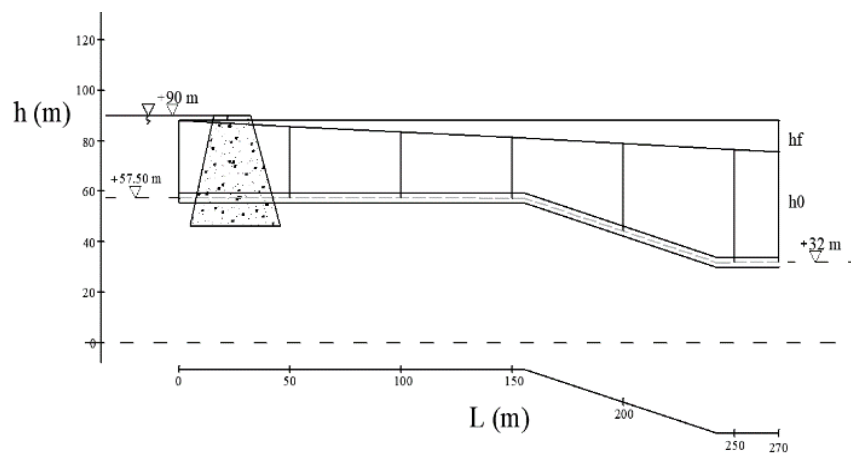
$$h_{0270} = \left[76,739 - k_b 2 \times f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right] - \text{Elv. Outlet}$$

$$= \left[76,739 - 0,0425 \times 0,0417 \frac{20}{3,8} \times \frac{8,845^2}{2 \times 9,81} \right] - 32$$

$$= 75,695 - 32$$

$$h_{0270} = 43,695 \text{ m}$$

Menentukan ketinggian tekanan hidrostatik awal secara grafis



Gambar 1. Ketinggian Tekanan Hidrostatik Awal pada Pipa, L=270 m

$$h_0 \text{ hulu} = 30,507 \text{ m}$$

$$h_0 \text{ hilir} = 43,695 \text{ m}$$

Menghitung tambahan tekanan h menggunakan Metode *Steady Flow*

$$\begin{aligned} h &= \frac{p}{\rho g} = \frac{L \cdot V}{g \cdot \Delta t} \\ &= \frac{270 \times 8,845}{9,81 \times 10} \end{aligned}$$

$$= 24,345 \text{ m}$$

Total tekanan akibat *water hammer*

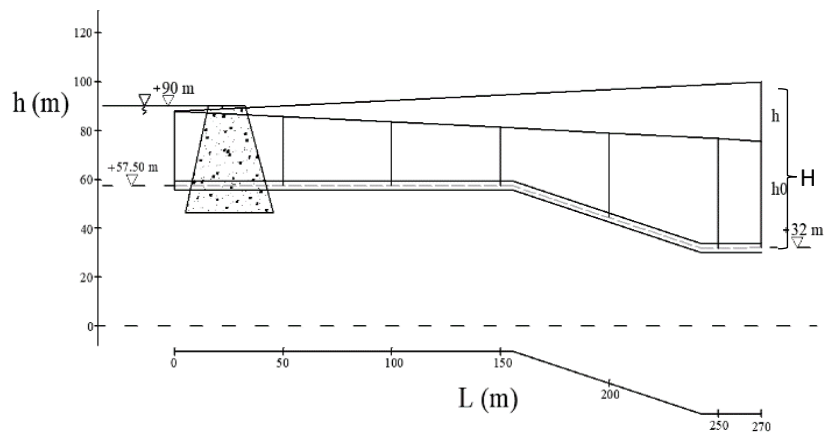
$$H_{270} = h_0 + h$$

$$= 43,695 + 24,345$$

$$= 68,040 \text{ m}$$

$$P = 68,040 \text{ (m)} \times 1000 \text{ (N/m}^3\text{)} \times 9,81 \text{ (m/dt}^2\text{)}$$

$$P = 667.468 \text{ N/m}^2$$



Gambar 2. Ketinggian tekanan air akibat *water hammer*, $L=270\text{m}$

Tabel 1. Ketinggian tekanan air akibat *water hammer*, $L=270\text{m}$

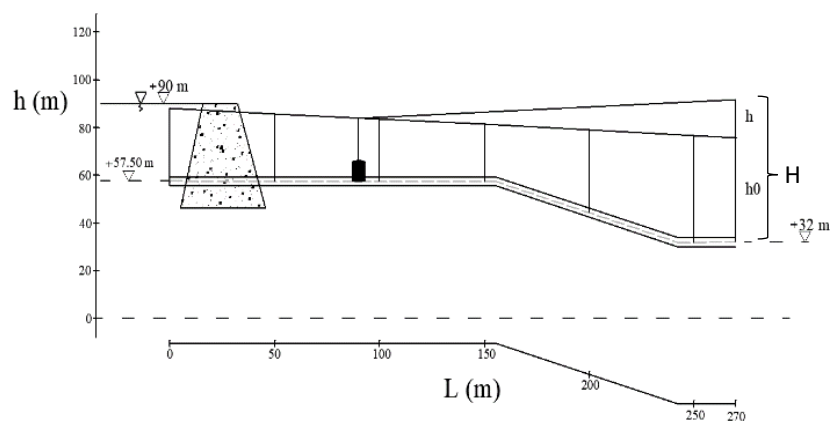
L (m)	h ₀ (m)	H (m)	Tekanan Air (P)
	Interpolasi	Interpolasi	N/m ²
0,0	30,506	30,506	299266
30,0	29,194	31,984	313768
60,0	27,882	33,414	327791
90,0	26,570	34,746	340858
120,0	25,258	36,082	353964
150,0	23,946	37,420	367090
180,0	30,462	46,534	456499
210,0	36,828	55,546	544906
240,0	42,896	64,354	631313
270,0	43,695	68,040	667468

Sumber: Hasil Analisa

Dari analisis *water hammer* menggunakan metode *Steady Flow*, maka didapatkan hasil yang menunjukkan bahwa terjadi kenaikan tekanan sebesar 24,345 m ketika katup ditutup selama 10 detik pada pipa pesat tanpa *surge tank* dengan panjang pipa 270 m. Berdasarkan hasil tersebut ketinggian tekanan menjadi 667.468 N/m².

3. 2. 2 *Surge Tank* 90 m dari Hulu

Pipa yang mengalami tekanan *water hammer* sepanjang 180 m.



Gambar 3. Ketinggian tekanan air akibat *water hammer*, $L=180\text{m}$

Tabel 2. Ketinggian tekanan air dengan *surge tank* 90 m dari hulu

L (m)	H (m) Interpolasi	Tekanan Air (P) N/m²
0,0	30,506	299266
30,0	29,194	286394
60,0	27,882	273523
90,0	26,698	261907
120,0	28,115	275804
150,0	29,419	288600
180,0	38,503	377718
210,0	47,490	465873
240,0	56,280	552102
270,0	59,925	587861

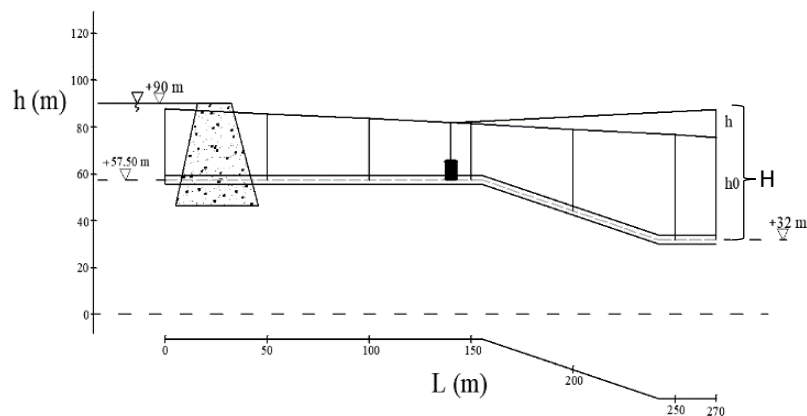
Sumber: Hasil Analisa

Dari analisis *water hammer* menggunakan metode *Steady Flow* didapatkan hasil yang menunjukkan bahwa pada pipa pesat dengan *surge tank* 90 m dari hulu yang

menyebabkan panjang pipa pesat yang mengalami tekanan akibat *water hammer* sepanjang 180 m mengalami kenaikan tekanan sebesar 16,230 m ketika katup ditutup selama 10 detik. Berdasarkan hasil tersebut ketinggian tekanan menjadi 587.861 N/m².

3. 2. 3 Surge Tank 140 m dari Hulu

Pipa yang mengalami tekanan *water hammer* sepanjang 130 m.



Gambar 4. Ketinggian tekanan air akibat *water hammer*, L=130m

Tabel 3. Ketinggian tekanan air dengan *surge tank* 140 m dari hulu

L (m)	H (m) Interpolasi	Tekanan Air (P) N/m ²
0,0	30,506	299266
30,0	29,194	286394
60,0	27,882	273523
90,0	26,570	260652
120,0	25,258	247781
140,0	24,615	241471
180,0	34,080	334329
210,0	43,038	422202
240,0	51,799	508150
270,0	55,416	543634

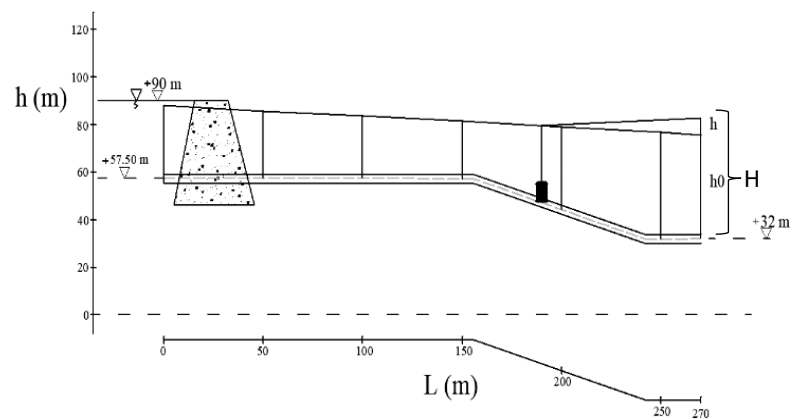
Sumber: Hasil Analisa

Dari analisis *water hammer* menggunakan metode *Steady Flow* didapatkan hasil yang menunjukkan bahwa pada pipa pesat dengan *surge tank* 140 m dari hulu yang

menyebabkan panjang pipa pesat yang mengalami tekanan akibat *water hammer* sepanjang 130 m mengalami kenaikan tekanan sebesar 11,721 m ketika katup ditutup selama 10 detik. Berdasarkan hasil tersebut ketinggian tekanan menjadi 543.634 N/m².

3. 2. 4 Surge Tank 190 m dari Hulu

Pipa yang mengalami tekanan *water hammer* sepanjang 80 m.



Gambar 5. Ketinggian tekanan air akibat *water hammer*, L=80m

Tabel 4. Ketinggian tekanan air dengan *surge tank* 190 m dari hulu

L (m)	H (m) Interpolasi	Tekanan Air (P) N/m ²
0,0	30,506	299266
30,0	29,194	286394
60,0	27,882	273523
90,0	26,570	260652
120,0	25,258	247781
150,0	23,946	234909
190,0	32,327	317132
210,0	38,593	378598
240,0	47,323	464236
270,0	50,908	499408

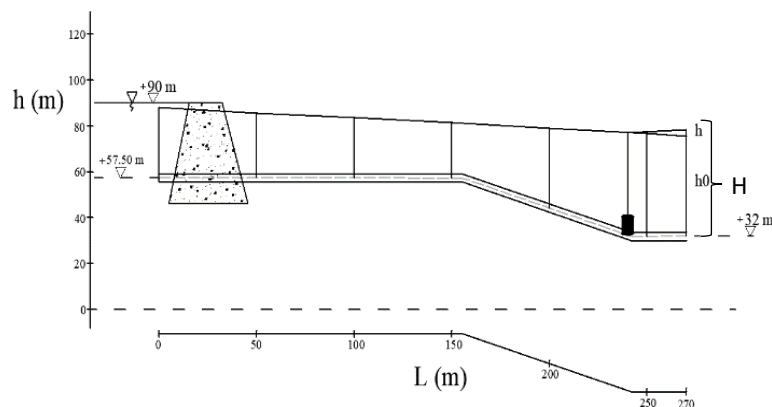
Sumber: Hasil Analisa

Dari analisis *water hammer* menggunakan metode *Steady Flow* didapatkan hasil yang menunjukkan bahwa pada pipa pesat dengan *surge tank* 190 m dari hulu yang menyebabkan panjang pipa pesat yang mengalami tekanan akibat *water hammer*

sepanjang 80 m mengalami kenaikan tekanan sebesar 7,213 m ketika katup ditutup selama 10 detik. Berdasarkan hasil tersebut ketinggian tekanan menjadi 499.408 N/m².

3. 2. 5 Surge Tank 240 m dari Hulu

Pipa yang mengalami tekanan *water hammer* sepanjang 30 m.



Gambar 6. Ketinggian tekanan air akibat *water hammer*, L=30m

Tabel 5. Ketinggian tekanan air dengan *surge tank* 240 m dari hulu

L (m)	H (m) Interpolasi	Tekanan Air (P) N/m ²
0,0	30,506	299266
30,0	29,194	286394
60,0	27,882	273523
90,0	26,570	260652
120,0	25,258	247781
150,0	23,946	234909
180,0	30,462	298828
210,0	36,828	361283
240,0	44,703	438540
270,0	46,400	455182

Sumber: Hasil Analisa

Dari analisis *water hammer* menggunakan metode *Steady Flow* didapatkan hasil yang menunjukkan bahwa pada pipa pesat dengan *surge tank* 240 m dari hulu yang menyebabkan panjang pipa pesat yang mengalami tekanan akibat *water hammer* sepanjang 30 m mengalami kenaikan tekanan sebesar 2,705 m ketika katup

ditutup selama 10 detik. Berdasarkan hasil tersebut ketinggian tekanan menjadi 455.182 N/m².

3. 3 Analisis Perencanaan Pipa Pesat dan Perhitungan Biaya Pipa Pesat menurut Kebutuhan Tulangan

Gaya *water hammer* yang timbul ketika katup ditutup secara tiba-tiba akan ditahan oleh pipa pesat baja dan beton bertulang. Pipa pesat yang mengalami tekanan akibat *water hammer*, dengan pendekatan luas kebutuhan diameter tulangan secara perhitungan dengan ketersediaan diameter tulangan yang ada di pasaran, maka didapatkan jumlah serta diameter tulangan yang akan digunakan. Namun untuk pipa pesat yang tidak mengalami tekanan akibat *water hammer* dan pipa pesat yang menopang tekanan *water hammer* dengan nilai kecil, maka digunakan tulangan minimum.

$$\begin{aligned} A_{S_{\min}} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{1,4}{400} \times 200 \times 500 \\ &= 350 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$d = 22 \text{ mm} \approx 380 \text{ mm}^2$$

3. 3. 1 Pipa pesat tanpa *Surge Tank*

Analisis Tekanan Hidrostatik

Tekanan pada pipa 268,2 m

Menghitung tekanan air (P)

$$\begin{aligned} P &= \rho \cdot g \cdot h \\ &= \rho \cdot g \cdot \frac{(h_i + h_{i-1})}{2} \\ &= 1000 \times 9,81 \times \frac{(67,972 + 67,965)}{2} \end{aligned}$$

$$P = 666769,028 \text{ N/m}^2$$

Menghitung tekanan air dalam pipa baja (setiap 0,2 m panjang)

$$F_{hid} = P \cdot D \cdot L$$

$$= 666769,028 \times 3,8 \times 0,2$$

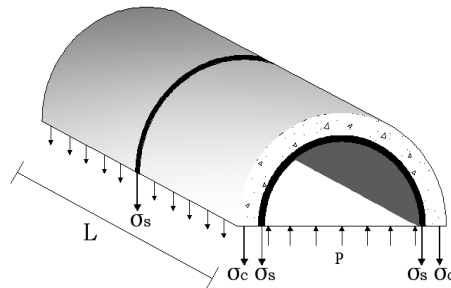
$$= 506744,461 \text{ N}$$

Menghitung kekuatan pipa baja

$$F_{\text{pipa baja}} = 2 \cdot \sigma_c \cdot \Delta t \cdot \Delta L$$

$$= 2 \times 230 \times 10^6 \times 0,12 \times 0,2$$

$$= 1104000 \text{ N}$$



Gambar 7. Gaya yang bekerja di dalam pipa pesat

Menghitung diameter tulangan

Pipa pesat dianggap aman terhadap *water hammer* jika $SF = 3$

$$SF = \frac{2 \cdot \sigma_s \cdot \Delta t \cdot \Delta L + 2 \cdot \sigma_{tul} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2}{P \cdot D \cdot \Delta L}$$

$$d^2 = \frac{SF \times P \times D \times \Delta L - 2 \times \sigma_s \times \Delta t \times \Delta L}{2 \cdot \sigma_{tul} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi}$$

$$d = \sqrt{\frac{3 \times 506744,461 - 1104000}{2 \times 230 \times 10^6 \times \frac{1}{4} \times \pi}}$$

$$d = 0,034 \text{ m}$$

$$d = 33 \text{ mm}$$

Dengan menyesuaikan ketersediaan tulangan di pasaran, maka dilakukan pendekatan diameter di pasaran dengan luas tulangan yang dibutuhkan. Maka didapatkan 2 tulangan dengan diameter 25 mm pada setiap 0,2 m panjang pipa.

Analisis Berat tulangan Kgf

$$\begin{aligned}\text{Berat} &= \left[\frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times 0,001 \times n \right] \pi D \times \rho_s \\ &= \left[\frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \times 0,001 \times 2 \right] \pi \times 3,8 \times 7800 \\ &= 91324,55 \text{ Kgf}\end{aligned}$$

Analisis biaya kebutuhan tulangan

$$\text{Biaya} = \text{Berat} \times \text{Harga 1 Kg tulangan}$$

$$= 91324,55 \times \text{Rp } 9.500,00$$

$$= \text{Rp } 867.583.178,00$$

Berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan total biaya kebutuhan tulangan sebesar Rp 555.729.363.248,00.

Tabel 6. Analisis penahan *water hammer* untuk mengetahui biaya dengan pipa pesat tanpa *surge tank*

L (m)	h (m)	Tekanan Air P (N/m ²)	Tekanan Air Dalam Pipa Fhid (N)	Kekuatan pipa baja Fpb (N)	SF	D Tulangan (m)	D Tulangan Real (mm)	Jumlah Tulangan	Berat Kgf	Biaya Kebutuhan Tulangan
0,0	30,506	299265,521	227441,796	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
30,0	31,984	313719,288	238426,659	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
60,0	33,414	327747,784	249088,316	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
90,0	34,746	340814,704	259019,175	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
120,0	36,082	353920,667	268979,707	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
150,0	37,420	367046,447	278955,300	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
180,0	46,534	456200,512	346712,389	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
210,0	55,546	544618,238	413909,861	1104000	3,0	0,0195	22	1	35360,86	Rp335.928.206
240,0	64,354	631024,718	479578,786	1104000	3,0	0,0304	22	2	70721,73	Rp671.856.413
270	68,040	667430,764	507247,381	1104000	3,0	0,0340	25	2	91324,55	Rp867.583.178
									Σ	Rp555.729.363.248

Sumber: Hasil Analisa

Analisis biaya kebutuhan beton

$$V \text{ beton} = 2\pi r \times L \times \Delta t_c$$

$$= 2\pi \times 1,9 \times 270 \times 0,5$$

$$= 1610,82 \text{ m}^3$$

$$\text{Biaya} = V_{\text{beton}} \times \text{Harga } 1\text{m}^3 \text{ ready mix K300}$$

$$= 1610,82 \times \text{Rp } 960.000,00$$

$$= \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

Total biaya kebutuhan beton bertulang

$$= \text{Biaya tulangan} + \text{Biaya pipa beton}$$

$$= \text{Rp } 555.729.363.248,00 + \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

$$= \text{Rp } 557.275.750.448,00$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka didapatkan total biaya kebutuhan beton bertulang sebesar Rp 557.275.750.448,00.

3. 3. 2 Pipa pesat dengan surge tank 90 m dari hulu

Tabel 7. Analisis penahan *water hammer* untuk mengetahui biaya dengan surge tank 90 m dari hulu

L (m)	h (m)	Tekanan Air P (N/m ²)	Tekanan Air Dalam Pipa Fhid (N)	Kekuatan pipa baja Fpb (N)	SF	D Tulangan (m)	D Tulangan Real (mm)	Jumlah Tulangan	Berat kgf	Biaya Kebutuhan Tulangan
0,0	30,506	299265,521	227441,796	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
30,0	29,194	286437,199	217692,271	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
60,0	27,882	273565,973	207910,140	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
90,0	26,698	261322,516	198605,112	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
120,0	28,115	275761,572	209578,795	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
150,0	29,419	288557,736	219303,879	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
180,0	38,503	377420,903	286839,886	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
210,0	47,490	465585,349	353844,865	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
240,0	56,280	551814,660	419379,142	1104000	3,0	0,0207	22	1	35360,86	Rp335.928.206
270	59,925	587825,471	446747,358	1104000	3,0	0,0256	29	1	61443,15	Rp583.709.962
Sumber: Hasil Analisa									Σ	Rp477.694.767.864

Analisis biaya kebutuhan beton

$$V \text{ beton} = 2\pi r \times L \times \Delta t_c$$

$$= 2\pi \times 1,9 \times 270 \times 0,5$$

$$= 1610,82 \text{ m}^3$$

$$\text{Biaya} = V_{\text{beton}} \times \text{Harga } 1\text{m}^3 \text{ ready mix K300}$$

$$= 1610,82 \times \text{Rp } 960.000,00$$

$$= \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

Total biaya kebutuhan beton bertulang

= Biaya tulangan + Biaya pipa beton

= Rp 477.694.767.864,00 + Rp 1.546.387.200,00

= Rp 479.241.155.064,00

Berdasarkan perhitungan di atas, maka didapatkan total biaya kebutuhan beton bertulang pada pipa pesat dengan *surge tank* 90 m dari hulu sebesar Rp 479.241.155.064,00.

3. 3. 3 Pipa pesat dengan *surge tank* 140 m dari hulu

Tabel 8. Analisis penahan *water hammer* untuk mengetahui biaya dengan *surge tank* 140 m dari hulu

L (m)	h (m)	Tekanan Air P (N/m ²)	Tekanan Air Dalam Pipa Fhid (N)	Kekuatan pipa baja Fpb (N)	SF	D Tulangan (m)	D Tulangan Real (mm)	Jumlah Tulangan	Berat kgf	Biaya Kebutuhan Tulangan
0,0	30,506	241471,188	183518,103	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
30,0	29,194	286437,199	217692,271	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
60,0	27,882	273565,973	207910,140	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
90,0	26,570	260694,747	198128,008	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
120,0	25,258	421915,502	320655,782	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
140,0	24,615	240378,398	182687,583	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
180,0	34,080	334032,407	253864,629	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
210,0	43,038	421915,502	320655,782	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
240,0	51,799	507863,463	385976,232	1104000	3,0	0,0122	22	1	35360,86	Rp335.928.206
270	55,416	543600,272	413136,207	1104000	3,0	0,0194	22	1	35360,86	Rp335.928.206
Sumber: Hasil Analisa									Σ	Rp453.839.006.749

Hasil perhitungan kebutuhan diameter tulangan di atas menunjukkan nilai yang kecil dan kurang dari tulangan minimum. Oleh karena itu digunakan diameter tulangan minimum sebesar 22 mm pada sepanjang pipa pesat.

Analisis biaya kebutuhan beton

$$V_{\text{beton}} = 2\pi r \times L \times \Delta t_c$$

$$= 2\pi \times 1,9 \times 270 \times 0,5$$

$$= 1610,82 \text{ m}^3$$

$$\text{Biaya} = V_{\text{beton}} \times \text{Harga } 1\text{m}^3 \text{ ready mix K300}$$

$$= 1610,82 \times \text{Rp } 960.000,00$$

$$= \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

Total biaya kebutuhan beton bertulang

$$= \text{Biaya tulangan} + \text{Biaya pipa beton}$$

$$= \text{Rp } 453.839.006.749,00 + \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

$$= \text{Rp } 455.385.393.949,00$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka didapatkan total biaya kebutuhan beton bertulang pada pipa pesat dengan *surge tank* 140 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00.

3. 3. 4 Pipa pesat dengan *surge tank* 190 m dari hulu

Tabel 9. Analisis penahan *water hammer* untuk mengetahui biaya dengan *surge tank* 190 m dari hulu

L (m)	h (m)	Tekanan Air P (N/m ²)	Tekanan Dalam Pipa Fhid (N)	Kekuatan pipa baja Fpb (N)	SF	D Tulangan (m)	D Tulangan Real (mm)	Jumlah Tulangan	Berat kgf	Biaya Kebutuhan Tulangan
0,0	30,506	299265,521	227441,796	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
30,0	29,194	286437,199	217692,271	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
60,0	27,882	273565,973	207910,140	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
90,0	26,570	260694,747	198128,008	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
120,0	25,258	247823,522	188345,876	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
150,0	23,946	234952,296	178563,745	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
190,0	32,327	318419,639	241998,926	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
210,0	38,593	378312,656	287517,618	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
240,0	47,323	463950,424	352602,322	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
270	50,908	499375,215	379525,163	1104000	3,0	0,00979	22	1	35360,86	Rp335.928.206
<i>Sumber: Hasil Analisa</i>									Σ	Rp453.839.006.749

Hasil perhitungan kebutuhan diameter tulangan di atas menunjukkan nilai yang kecil dan kurang dari tulangan minimum. Oleh karena itu digunakan diameter tulangan minimum sebesar 22 mm pada sepanjang pipa pesat.

Analisis biaya kebutuhan beton

$$V_{\text{beton}} = 2\pi r \times L \times \Delta t_c$$

$$= 2\pi \times 1,9 \times 270 \times 0,5$$

$$= 1610,82 \text{ m}^3$$

$$\text{Biaya} = V_{\text{beton}} \times \text{Harga } 1\text{m}^3 \text{ ready mix K300}$$

$$= 1610,82 \times \text{Rp } 960.000,00$$

$$= \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

Total biaya kebutuhan beton bertulang

$$= \text{Biaya tulangan} + \text{Biaya pipa beton}$$

$$= \text{Rp } 453.839.006.749,00 + \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

$$= \text{Rp } 455.385.393.949,00$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka didapatkan total biaya kebutuhan beton bertulang pada pipa pesat dengan *surge tank* 190 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00.

3. 3. 5 Pipa pesat dengan *surge tank* 240 m dari hulu

Tabel 10. Analisis penahan *water hammer* untuk mengetahui biaya dengan *surge tank* 240 m dari hulu

L (m)	h (m)	Tekanan Air P (N/m ²)	Tekanan Air Dalam Pipa Fhid (N)	Kekuatan pipa baja Fpb (N)	SF	D Tulangan (m)	D Tulangan Real (mm)	Jumlah Tulangan	Berat Kgf	Biaya Kebutuhan Tulangan
0,0	30,506	299265,521	227441,796	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
30,0	29,194	286437,199	217692,271	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
60,0	27,882	273565,973	207910,140	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
90,0	26,570	260694,747	198128,008	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
120,0	25,258	247823,522	188345,876	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
150,0	23,946	234952,296	178563,745	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
180,0	30,462	298614,492	226947,014	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
210,0	36,828	361084,447	274424,180	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
240,0	44,703	429478,015	326403,291	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
270	46,400	455151,791	345915,361	1104000	3,0		22	1	35360,86	Rp335.928.206
<i>Sumber: Hasil Analisa</i>									Σ	Rp453.839.006.749

Hasil perhitungan kebutuhan diameter tulangan di atas menunjukkan nilai yang sangat kecil dan kurang dari tulangan minimum. Oleh karena itu digunakan diameter tulangan minimum sebesar 22 mm pada sepanjang pipa pesat.

Analisis biaya kebutuhan beton

$$V \text{ beton} = 2\pi r \times L \times \Delta t_c$$

$$= 2\pi \times 1,9 \times 270 \times 0,5$$

$$= 1610,82 \text{ m}^3$$

$$\text{Biaya} = V_{\text{beton}} \times \text{Harga } 1\text{m}^3 \text{ ready mix K300}$$

$$= 1610,82 \times \text{Rp } 960.000,00$$

$$= \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

Total biaya kebutuhan beton bertulang

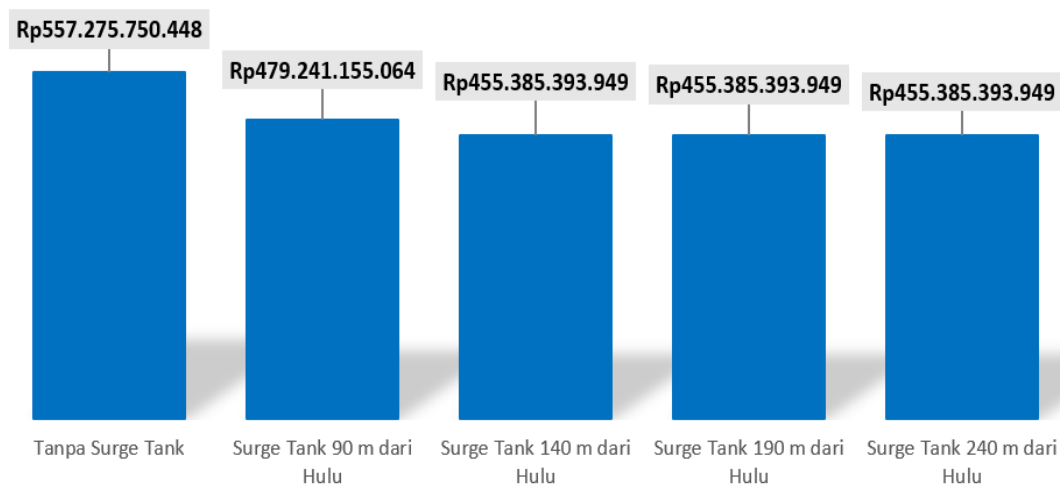
$$= \text{Biaya tulangan} + \text{Biaya pipa beton}$$

$$= \text{Rp } 453.839.006.749,00 + \text{Rp } 1.546.387.200,00$$

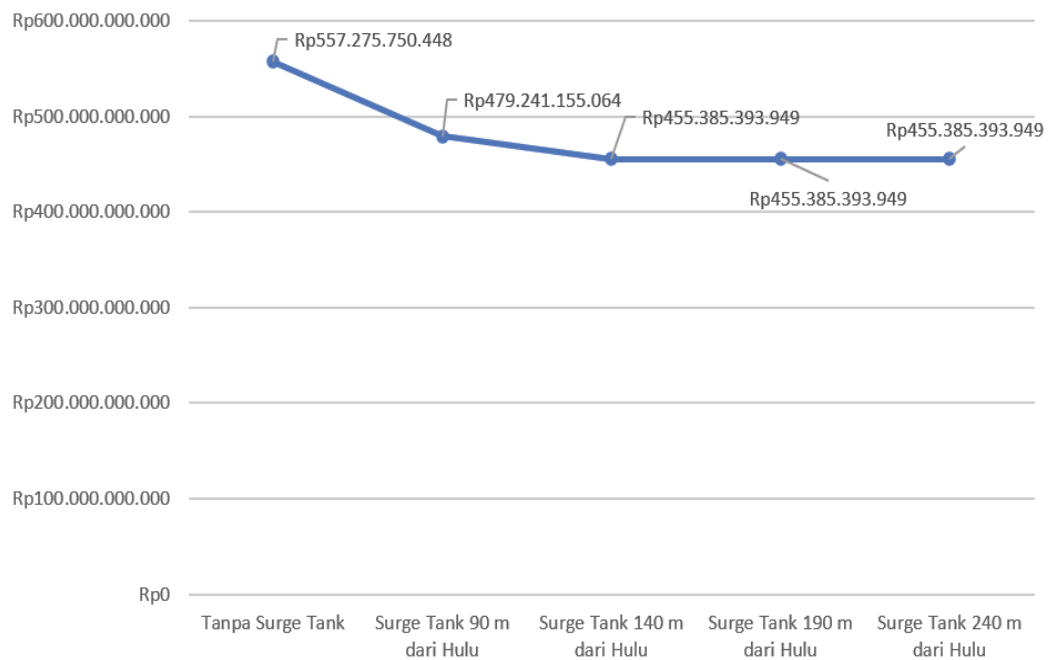
$$= \text{Rp } 455.385.393.949,00$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka didapatkan total biaya kebutuhan beton bertulang pada pipa pesat dengan *surge tank* 240 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00.

3. 4 Perbandingan Total Biaya Kebutuhan Beton Bertulang Pipa Pesat



Gambar 8. Perbandingan biaya pipa pesat menurut lokasi *surge tank*



Gambar 9. Grafik biaya pipa pesat menurut lokasi *surge tank*

4. PENUTUP

4. 1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari analisa pengaruh lokasi *surge tank* terhadap biaya pipa pesat Waduk Kedung Ombo ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Total biaya pipa pesat dengan pipa tanpa *surge tank* sebesar Rp 557.275.750.448,00, *surge tank* 90 m dari hulu sebesar Rp 479.241.155.064,00, *surge tank* 140 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00, *surge tank* 190 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00, dan *surge tank* 240 m dari hulu sebesar Rp 455.385.393.949,00. Berdasarkan hasil di atas, maka dapat disimpulkan bahwa semakin ke hilir lokasi *surge tank* besarnya total biaya pipa pesat semakin kecil. Namun dengan adanya tulangan minimum yang harus digunakan, maka terjadi persamaan total biaya pipa pesat di tiga lokasi *surge tank* akibat dari kecilnya tekanan *water hammer* yang timbul.

4. 2 Saran

Berdasarkan dari hasil penelitian, maka penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa semakin ke hilir lokasi *surge tank* semakin murah biaya pipa pesatnya, namun kemungkinan biaya *surge tank* akan lebih mahal. Sehingga perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai perbandingan antara penurunan biaya pipa pesat dengan kenaikan biaya konstruksi *surge tank*.
2. Penelitian ini dapat diaplikasikan untuk penelitian di waduk lain, terutama yang memiliki pipa pesat lebih panjang daripada Waduk Kedung Ombo.

DAFTAR PUSTAKA

- Dandekar, M.M dan Sharman, K.N. 1991. *Pembangkit Listrik Tenaga Air*. (diterjemahkan oleh: D. Bambang Setyadi). Jakarta: UI-Press.
- Featherstone, R.E. dan Nalluri, C. 1995. *Civil Engineering Hydraulics*. Oxford: Blackwell Science.
- Iswara, Pondra. 2017. Evaluasi Keamanan Pipa Pesat Waduk Kedungombo terhadap *Water Hammer*. *Skripsi*. Program Studi Teknik Sipil, Univ. Muhammadiyah Surakarta. Surakarta.
- Kisto dan Hermanto. 2023. Optimasi Desain Penstok *Intricate Countur* dengan Kapasitas *Hydro Power Plant* 4 x 2 MW. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*. No. 2. Vol. 7. 704-714. <https://doi.org/10.33379/gtech.v7i2.2465>
- Patty, O.F. 1995. *Tenaga Air*. Jakarta: Erlangga.
- Ruswanto. 2007. Kajian Ulang Perencanaan Pipa Pesat Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Wonogiri. *Skripsi*. Program Studi Teknik Sipil. Univ. Muhammadiyah Surakarta. Surakarta.
- Triatmodjo, Bambang. 1993. *Hidraulika II*. Yogyakarta: Beta Offset.