

# Analisa Kekuatan *Penstock* Dengan Material GRP PLTM Kapasitas 2x4,2 MW

**Pajar**

Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung

Email : [pajar4471@gmail.com](mailto:pajar4471@gmail.com)

Received DD MM YYYY | Revised DD MM YYYY | Accepted DD MM YYYY

## **ABSTRAK**

*Penstock merupakan salah bagian yang penting untuk Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM). Salah satu material baru untuk penstock adalah Glass Reinforced Plastic (GRP), sehingga perlunya dikaji lebih lanjut kesesuaian material terhadap fungsinya. Pada kajian metodologi yang digunakan dibagi tiga bagian besar yaitu menghitung head loss pada pipa, menghitung tekanan yang terjadi dengan perangkat lunak Bentley Hammer, dan mensimulasikan tegangan yang terjadi dengan menggunakan perangkat lunak Solidworks. Hasil dari kajian ini head netto sebesar 85,9 m nilai tersebut dipengaruhi head losses major yang sebesar 3,58 m, nilai head losses major dapat diperkecil dengan memperbesar diameter pipa. Penutupan katup selama 30 detik menyebabkan tekanan puncak 1.414 kPa pada waktu 25 detik dan peningkatan tekanan sebesar 73% dari tekanan awal sebesar 817 kPa. Nilai tegangan maksimum pada area Penstock Horizontal Sebesar 8.492.140 Pa yang mana dari aspek kekuatan masih aman untuk Penstock Horizontal. Pada Penstock Diagonal tegangan aksial maksimum sebesar 68.536.200 Pa yang mana nilai ini masih lebih besar dibandingkan nilai Yield Strength Aksial yang sebesar 21.700.000 Pa. karena material GRP ini masih kurang baik digunakan pada kondisi terkespos maka dapat menggunakan material pengganti seperti ASTM A36.*

**Kata Kunci** : *Penstock, GRP, Tegangan*

## **ABSTRACT**

*Penstock is an important part of a Mini-hydro Power Plant (MHPP). One of the new materials for penstock is Glass Reinforced Plastic (GRP) So it is necessary to study further the suitability of the material to its function. In the study, the methodology used is divided into three major parts, namely calculating the head loss in the pipe, calculating the pressure that occurs with the Bentley Hammer software, and simulating the stress that occurs using the Solidworks software. The results of this study are the net head of 85.9 m, the value is influenced by the major head losses of 3.58 m, and the value of the major head losses can be reduced by increasing the diameter of the pipe. For 30 seconds closing value, peak pressure of 1,414 kPa at 25 seconds and a pressure increase of 73% from the initial pressure of 817 kPa. The maximum stress value in the Horizontal Penstock area is 8,492.140 Pa, which from the aspect of strength is still safe for Horizontal Penstock. At Penstock Diagonal the maximum axial stress is 68,536,200 Pa, which is still higher than the Axial Yield Strength value of 21.700.000 Pa. because this GRP material is still not good for use in exposed conditions, it can use substitute materials such as ASTM A36.*

**Keywords** : *GRP, Penstock, Stress*

## 1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan yang utama bagi kehidupan manusia saat ini. Tetapi Sebagian besar energi listrik yang digunakan pada saat ini menggunakan sumber energi yang tidak ramah lingkungan dan juga ketersediaannya terbatas. Oleh karena itu manusia mulai mencari sumber energi yang lebih ramah lingkungan dan ketersediaannya tidak terbatas, contoh sumber energi yang lebih ramah lingkungan yaitu air. Air dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit listrik tenaga air ataupun pembangkit listrik tenaga minihidro.

*Penstock* merupakan salah satu bagian penting pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM), karena *penstock* ini memiliki peran penting yaitu sebagai pipa penyalur aliran fluida antara bak penampung dengan turbin. Pada PLTM *Penstock* menerima tekanan yang tinggi akibat *Water Hammer*. Sementara itu *Water hammer* adalah fenomena terjadinya fluktuasi tekanan yang diakibatkan oleh penutupan *valve* yang cepat. **(Harun, Indah, Sugeng, 2015).**

Karena mendapat tekanan yang tinggi akibat *Water Hammer*, *Penstock* pun terbuat dari macam-macam material yang tahan terhadap tekanan tinggi Akibat *Water Hammer* salah satu material *penstock* yaitu material *Glass Reinforced Plastic* (GRP). Material *Glass Reinforced Plastic* ini sendiri merupakan material komposit, yang mana komposit adalah suatu jenis bahan baru hasil rekayasa yang terdiri dari dua atau lebih bahan di mana sifat masing-masing bahan berbeda satu sama lainnya baik itu sifat kimia maupun fisiknya dan tetap terpisah dalam hasil akhir bahan tersebut (bahan komposit). Dengan adanya perbedaan dari material penyusunnya maka komposit antar material harus berikatan dengan kuat, sehingga perlu adanya penambahan *wetting agent*. **(Nurun Nayiroh, 2013).**

Material GRP masih cukup jarang digunakan di Indonesia, karena material ini memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu dipertimbangkan, dari aspek kekuatan material GRP ini memiliki kekuatan *Hoop Stress* sebesar 99,7 MPa yang lebih baik dibandingkan *Logitudinal Stress* sebesar 21,7 MPa. *Longitudinal Stress* adalah tegangan yang terjadi pada arah sumbu aksial yang disebabkan oleh tekanan dari dalam sementara itu *Hoop Stress* merupakan tegangan yang disebabkan oleh tekanan dalam pipa dimana tekanan ini bersumber dari fluida dan nilainya selalu positif jika tegangan cenderung membelah pipa menjadi dua. Tekanan dalam ini bekerja kearah tangensial dan besarnya bervariasi terhadap tebal dinding dari pipa, nilai tekanan yang diberikan kepada dinding pipa atau nilai tekanan yang dialami dinding pipa sama dengan tekanan yang diberikan oleh fluida. **(Arief Maulana, 2016).** Karena material memiliki kelebihan dan kekurangan maka perlunya menganalisa kekuatan material GRP, menganalisa tegangan, dan perlu mengetahui tebal material GRP yang ideal data kondisi kerja.

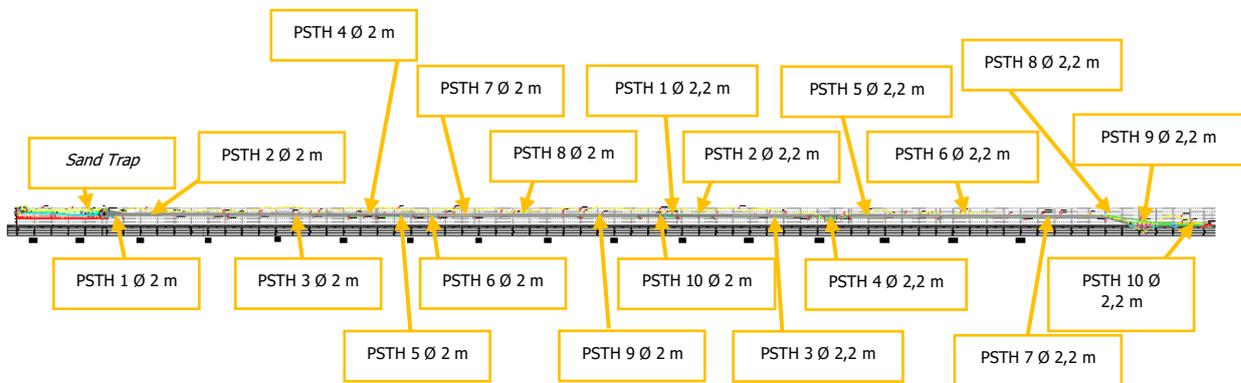
## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Kajian ini bertujuan Menganalisis *Water Hammer* di dalam *penstock* pada PLTM 2X4,2 MW serta Menganalisis kekuatan *penstock* dengan mensimulasikan pada perangkat lunak solidworks. Adapun metodologi penelitian dimulai dari didapatnya data pendukung. Data pendukung ini diperlukan untuk proses perhitungan *Head Losses*, perhitungan tekanan pada pipa, dan untuk keperluan simulasi tegangan pipa GRP menggunakan perangkat lunak *Solidworks*. Data pendukung dapat dilihat pada **Tabel 1.**

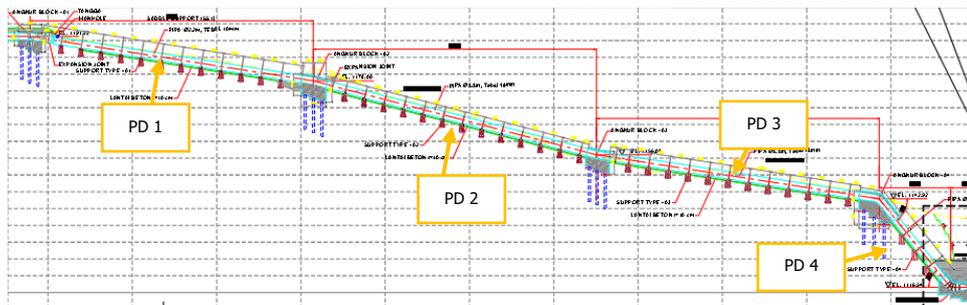
**Tabel 1. Data Pendukung (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

Debit (Q)	11,4 m <sup>3</sup> /s
Massa Jenis Air (ρ)	1000 kg/m <sup>3</sup>
Viskositas Dinamik (μ)	0,0008325 kg/m · s
Roughness Height GRP (e)	0,003
Roughness Height Welded Steel (e)	0,6
Diameter Penstock Segmen 1	2 m
Diameter Penstock Segmen 2 dan 3	2,2 m
Tinggi Jatuh Kotor	93,71 m

Selain data pendukung seperti yang ditunjukkan **Tabel 1**, data pendukung lainnya berupa layout yang akan ditunjukkan pada gambar-gambar berikut ini.



**Gambar 1 Sand Trap dan Penstock Horizontal (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**



**Gambar 2. Penstock Diagonal 1, 2, 3, dan 4 Ø 2,2 m (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

Keterangan **Gambar 1** dan **Gambar 2** :

PSTH = Penstock Horizontal

PD = Penstock Diagonal

Dari data pendukung tersebut digunakan untuk perhitungan *Head Losses*. Untuk mendapatkan nilai *Head Losses Minor* ditunjukkan pada persamaan a sementara itu untuk *Head Losses Major* menggunakan persamaan b.

$$(a) H = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$(b) H = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

**Persamaan 1 (a) Head Losses Minor, (b) Head Losses Major (Sumber : Zainudin, Adi Sayoga, Nuarsa, 2012)**

Dimana :

- $H$  = *Head Losses Minor* (m)
- $k$  = Koefisien Minor
- $v$  = Kecepatan Aliran Fluida ( $m/s$ )
- $g$  = Percepatan Gravitasi ( $9,81 m/s^2$ )
- $f$  = Koefisien Gesek
- $D$  = Diameter Pipa (mm)

Nilai  $f$  merupakan nilai koefisien gesek yang dapat ditemukan menggunakan persamaan berikut ini.

$$f = \left( \frac{1}{2 \log \left( 3,7 \cdot \frac{D}{e} \right)} \right)^2$$

**Persamaan 2 Koefisien Gesek *Major* (Sumber : Zainudin, Adi Sayoga, Nuarsa, 2012)**

Dimana :

- $e$  = *Roughness Height* (mm)

Sementara itu untuk mendapatkan nilai  $k$  yang merupakan nilai koefisien *minor* dapat menggunakan persamaan berikut untuk dipakai pada perhitungan *Head Losses Minor* belokan pipa.

$$k = 0,946 \times \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) + 2,047 \times \sin^4 \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

**Persamaan 3 Koefisien *Minor* (Sumber : Zainudin, Adi Sayoga, Nuarsa, 2012)**

Dimana :

- $\theta$  = Sudut Belokan Pipa ( $^{\circ}$ )

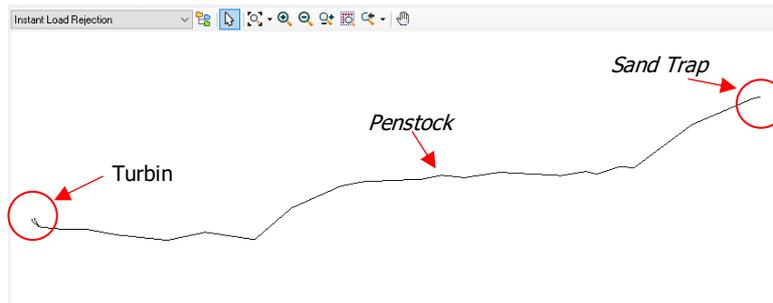
Dari persamaan-persamaan diatas dapat digunakan untuk menghitung head losses yang ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. *Head Losses* Keseluruhan (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

<i>Head Losses</i> Keseluruhan	
Keterangan	Hasil
<i>Head Losses Sand Trap</i> Menuju Pipa	0,007713 m
<i>Head Losses Major</i>	3,58839 m
<i>Head Losses Minor Horizontal</i>	0,40868 m
<i>Head Losses Minor Vertikal</i>	0,20433 m
<i>Head Losses Minor Expansion</i>	0,011202 m
<i>Head Losses Minor Percabangan</i>	0,123853 m
<i>Head Losses Contraction</i>	0,28954 m
<i>Head Losses Minor Setelah Percabangan</i>	0,27668 m
<i>Head Losses Minor Valve</i>	1,45057 m
<i>Head Losses Tail Race</i>	1,40953 m
Total <i>Head Losses</i> Keseluruhan	7,78723 m

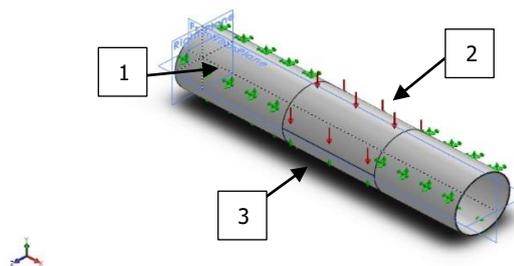
Jumlah *head losses* keseluruhan sebesar 7,787191 m selanjutnya tinggi jatuh kotor atau *head static* sebesar 93,71 m dikurangi dengan *head losses* keseluruhan, maka akan menghasilkan nilai *head netto* sebesar 85,93912 m.

Selanjutnya menghitung tekanan yang terjadi. Pada kajian ini untuk menghitung tekanan digunakan perangkat lunak *Bentley Hammer*. *Bentley Hammer* itu sendiri merupakan perangkat lunak yang dapat mensimulasikan fenomena transien hidrolik (*water hammer*) dalam sistem air, air limbah, industri, dan pertambangan. Untuk mensimulasikan tekanan yang terjadi menggunakan perangkat lunak *Bentley Hammer* perlunya membuat skema seperti yang ditunjukkan **Gambar 3** dibawah ini.



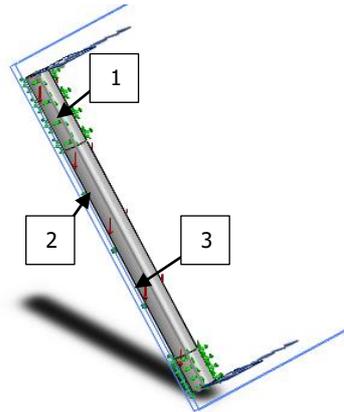
**Gambar 3. Skema Menggunakan Perangkat Lunak Bentley Hammer (Sumber : Dokumentasi Pribadi)**

Setelah dibuatnya skema pada perangkat lunak *Bentley Hammer* dan memasukan data yang diperlukan untuk simulasi selanjutnya dapat disimulasikan. Langkah selanjutnya mensimulasikan tegangan menggunakan perangkat lunak *Solidworks*. Pada simulasi menggunakan perangkat lunak *Solidworks* pipa *penstock* memiliki dua kondisi, yang pertama pipa *penstock* dengan kondisi tertimbun tanah sedalam 1,1 meter serta kondisi pipa kosong, sementara itu kondisi kedua dengan pipa *penstock* terekspos dengan jarak antar tumpuan 6 meter. Untuk pipa yang mendapat kondisi pertama ditunjukkan oleh **Gambar 1** sementara kondisi kedua terjadi pada pipa yang ditunjukkan **Gambar 2**. Berikut merupakan ilustrasi dari pemberian tumpuan dan beban pada pipa *penstock*.



**Gambar 4. Tumpuan dan Tekanan Pada *Penstock* yang Tertimbun Tanah (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

**Gambar 4** diatas merupakan bagian pipa *penstock* dengan kondisi tertimbun tanah, dimana nomor 1 menunjukan tumpuan jepit akrobat jepitan angkur block terhadap pipa *penstock*, nomor 2 merupakan tumpuan roll dari tanah menuju pipa *penstock*, dan nomor 3 menunjukan tekanan akrobat beban dari tanah. Hasil simulasi diatas berupa tegangan *Hoop*.



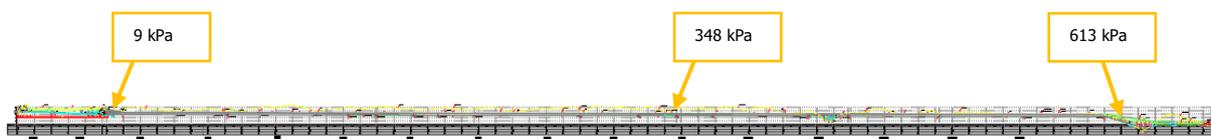
**Gambar 5. Ilustrasi Tumpuan Pada *Penstock* Terekspos (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

**Gambar 5** merupakan ilustrasi tumpuan pada pipa *penstock* kondisi terekspos dengan jarak antar tumpuan 6 meter. Pada gambar diatas nomor 1 merupakan tumpuan jepit akibat jepitan angkur block terhadap pipa *penstock*, nomor 2 merupakan tumpuan *roll* dari *saddle* menuju pipa *penstock*, dan nomor 3 merupakan tekanan akibat berat air dan tekanan hidrostatik ditambah tekanan akibat *water hammer*. Hasil simulasi **Gambar 5** berupa tegangan *Hoop* dan Aksial.

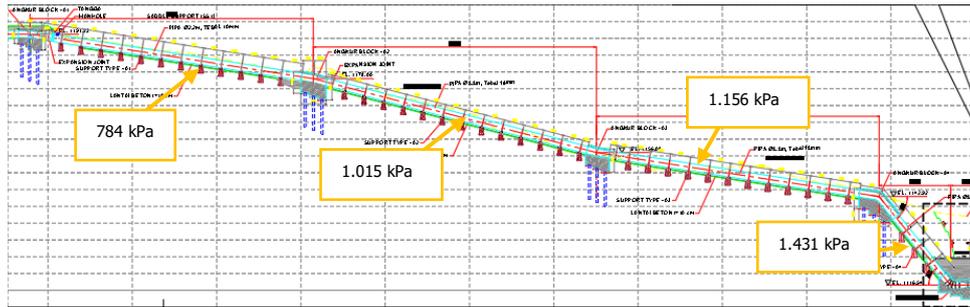
## 2. PEMBAHASAN DAN ANALISA

Pada kajian ini didapatkan beberapa analisa seperti, perhitungan *head loss* menghasilkan nilai *head netto* sebesar 85,9 m, salah satu yang mempengaruhi besarnya nilai *head netto* adalah *head losses mayor* yang sebesar 3,58 m. Besarnya *head losses mayor* yaitu diakibatkan oleh kecilnya diameter pipa, untuk meminimalisir besarnya *head losses mayor* dapat dibuatnya diameter pipa yang lebih besar sehingga akan memperkecil kecepatan aliran fluida dan akhirnya akan membuat nilai *head losses mayor* semakin kecil.

Analisa selanjutnya dari hasil simulasi tekanan yang diakibatkan *water hammer* menggunakan perangkat *Bentley Hammer*.

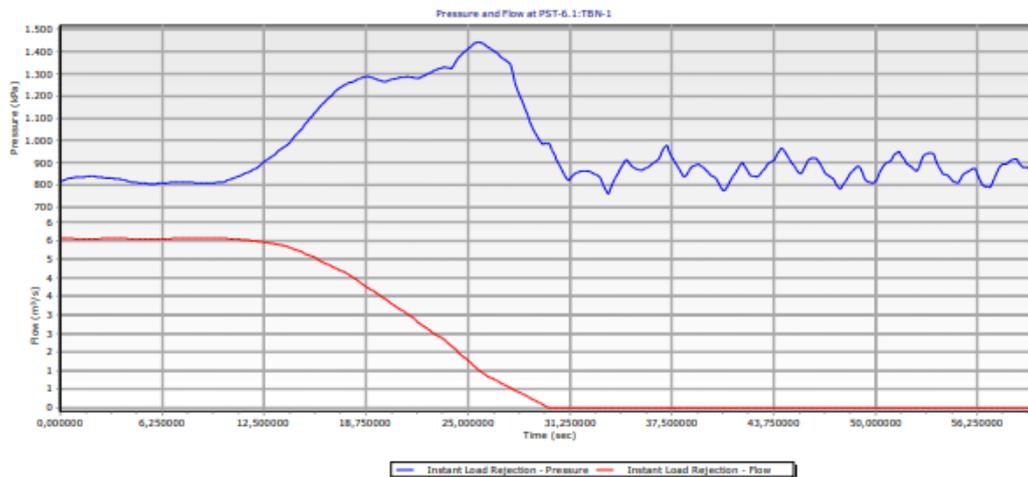


**Gambar 6. Tekanan Maksimum Akibat *Water Hammer* Pada *Penstock Horizontal* (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**



**Gambar 7. Tekanan Maksimum Akibat *Water Hammer* Pada *Penstock Diagonal* (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

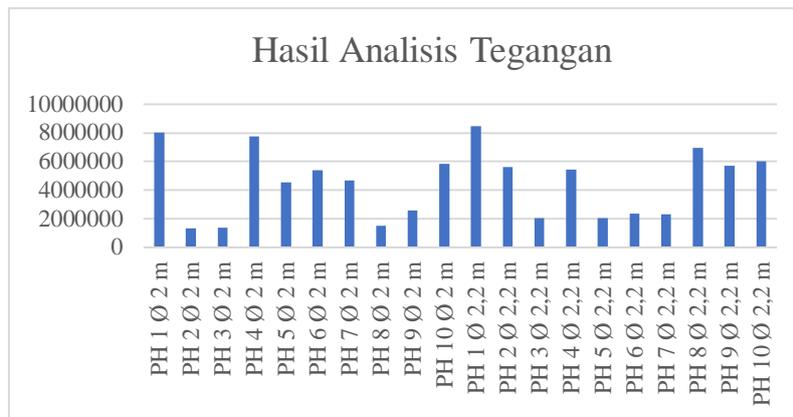
**Gambar 6** merupakan tekanan maksimum akibat *Water Hammer* pada *Penstock Horizontal*. Pada *Penstock Horizontal* 1 Ø 2 m mendapatkan tekanan maksimum sebesar 9 kPa, *Penstock Horizontal* 1 Ø 2,2 m sebesar 348 kPa, dan *Penstock Horizontal* 8 Ø 2,2 m sebesar 613 kPa. Sementara itu **Gambar 7** merupakan tekanan maksimum akibat *Water Hammer* pada *Penstock Diagonal*. Pada *Penstock Diagonal* 1 mendapatkan tekanan maksimum 784 kPa, *Penstock Diagonal* 2 sebesar 1.015 kPa, *Penstock Diagonal* 3 sebesar 1.156 kPa, dan *Penstock Diagonal* 4 sebesar 1.431 kPa. Dari **Gambar 6** dan **Gambar 7** juga menunjukkan perbedaan tekanan pada *Penstock Horizontal* 1 Ø 2 m jauh lebih kecil dibandingkan *Penstock Diagonal* 4, hal tersebut dikarenakan *Head Penstock Horizontal* 1 Ø 2 m lebih kecil dibandingkan *Head Penstock Diagonal* 4 sehingga mempengaruhi tekanan yang terjadi.



**Grafik 1. Hasil Simulasi *Water Hammer* Pada Turbin (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

**Grafik 1** diatas menunjukkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak *Bentley Hammer* pada turbin dengan kondisi penutupan katup sepenuhnya selama 30 detik. Grafik warna biru menunjukkan perbandingan tekanan dengan waktu sementara itu grafik warna merah menunjukkan debit dengan waktu. Pada grafik berwarna biru menunjukkan tekanan puncak sebesar 1.414 kPa pada waktu sekitar 25 detik dan tekanan awal sebesar 817 kPa, peningkatan tekanan ini sebesar 73%. Peningkatan yang tinggi ini terjadi pada saat penutupan katup hampir sepenuhnya, hal ini terjadi akibat semakin kecilnya luasan penampang keluar fluida tersebut maka akan semakin tinggi pula tekanan yang terjadi fenomena ini sejalan dengan persamaan tekanan yang mana semakin kecil luas permukaan atau penampang maka akan semakin besar tekanan yang terjadi.

Analisa berikutnya merupakan hasil dari simulasi tegangan menggunakan perangkat lunak *Solidworks*. **Grafik 2** berikut merupakan hasil proses *run Stress (vonMises)* pada *Penstock Horizontal*.



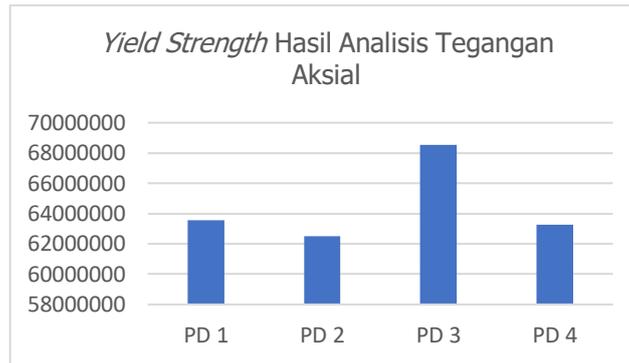
**Grafik 2. Hasil Analisis Tegangan (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

Dilihat dari grafik diatas *Penstock Horizontal* 1 diameter 2,2 m mendapatkan tegangan tertinggi yaitu sebesar 8.492.140 Pa dan paling rendah ditunjukkan oleh *Penstock Horizontal* 2 diameter 2 m yang mendapatkan nilai tegangan sebesar 1.320.850 Pa hal tersebut dikarenakan perbedaan panjang tiap bagian *penstock* yang mana semakin pendek panjang *penstock* maka akan semakin kecil luas permukaan yang terkena tekanan dan juga akan menyebabkan semakin besar tegangan yang terjadi. Akan tetapi dari aspek kekuatan tegangan sebesar itu masih aman, dikarenakan nilai *yield strength* dari material *Glass Reinforced Plastic* masih jauh lebih besar yaitu sebesar 99,7 MPa untuk arah *Hoop* dan 21,7 MPa untuk arah Aksial sehingga material *Glass Reinforced Plastic* ini dari aspek kekuatan masih aman digunakan pada *Penstock Horizontal*.

Selanjutnya Pada bagian *Penstock Diagonal* dilakukan dua kali simulasi, yaitu dengan menggunakan *Yield Strength Hoop* dan juga *Yield Strength aksial*. Hal tersebut dilakukan karena pada material *Glass Reinforced Plastic* ini memiliki kekuatan yang berbeda di tegangan arah *Hoop* dan juga tegangan arah Aksial. **Grafik 3** merupakan hasil simulasi menggunakan material dengan *Yield Strength Hoop* dan **Grafik 4** merupakan hasil simulasi menggunakan material dengan *Yield Strength aksial*.



**Grafik 3. Hasil Analisis Tegangan dengan Yield Strength Arah Hoop (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**



**Grafik 4. Hasil Analisis Tegangan dengan *Yield Strength* Arah Aksial (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

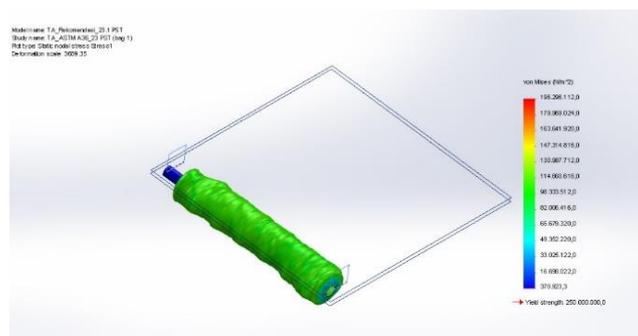
Grafik diatas terlihat bahwa tegangan terbesar terjadi pada *Penstock Diagonal* 3 dengan tegangan *Yield Strength Hoop* sebesar 68.542.550 Pa dan juga dengan tegangan *Yield Strength* Aksial sebesar 68.536.200 Pa. Hal tersebut menunjukkan bahwa material *Glass Reinforced Plastic* ini jika digunakan pada kondisi pipa terekspos dengan jarak antar tumpuan 6 meter masih mampu menerima tegangan dalam arah *Hoop* sedangkan dalam arah aksial material ini masih belum mampu menerima tegangan.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

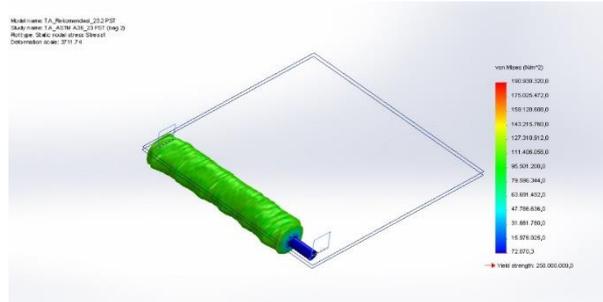
Adapun kesimpulan yang dapat diperoleh antara lain :

1. Dari aspek kekuatan Material *Glass Reinforced Plastic* ini masih cukup aman digunakan untuk *Penstock Horizontal* dengan kondisi tertimbun tanah dan pipa kosong terbukti dari hasil simulasi pada bagian *Penstock Horizontal* tegangan maksimum sebesar 8.492.140 Pa yang mana masih dibawah nilai *Yield Strength*, baik dari *Yield Strength Hoop* dan juga *Yield Strength* Aksial.
2. Dari aspek kekuatan Material *Glass Reinforced Plastic* masih sedikit kurang baik jika digunakan pada *Penstock Diagonal* dengan kondisi terekspos dan tumpuan tiap 6 meter, dikarenakan nilai tegangan maksimum sebesar 68.536.200 Pa dalam arah aksial yang mana nilai tersebut masih lebih besar dari nilai *Yield Strength* aksial. Akan tetapi jika dibandingkan dengan *Yield Strength Hoop* masih cukup aman.

Adapaun saran yang dapat digunakan untuk penggunaan *penstock* PLTM kapasitas 2X4 MW adalah Penggantian material. Dikarenakan dari aspek kekuatan, tegangan maksimum aksial *Penstock Diagonal* dengan Material *Glass Reinforced Plastic* kurang baik, maka untuk pengganti dapat menggunakan material ASTM A36. Sebagai referensi dilakukan simulasi tegangan menggunakan material ASTM A36 yang ditunjukkan **Gambar 8** dan **Gambar 9** dibawah ini.



**Gambar 8. Simulasi Bagian 1 (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**



**Gambar 9. Simulasi Bagian 2 (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)**

Dari hasil simulasi material ASTM A36 ini mendapatkan nilai tegangan maksimum sebesar  $193.613.000 \text{ N/m}^2$  yang mana material ASTM A36 Memiliki *Yield Strength* sebesar  $250.000.000 \text{ N/m}^2$  maka dapat disimpulkan dari aspek kekuatan material ATM A36 masih cukup aman jika digunakan pada kondisi terekspos dan jarak antar *saddle* 6 m.

### DAFTAR PUSTAKA

- Al Rosyid, H., Handayasari, I., & Hariyanto, S. T. (2015). Analisa Water Hammer Pada Pipa Sirkulasi Condensate Extraction PUMP PT PJB UBJOM PLTU Indramayu. *JURNAL POWERPLANT*, 3(1), 26-31.
- Dr. Ingeniero de Minas. Layman's Guidebook : on how to develop a small hydro site. European Small Hydropower Association (ESHA) : Brussel, 1998.
- Maulana, A. (2016). Perhitungan Tegangan Pipa Dari Discharge Kompresor Menuju Air Cooler Menggunakan Software Caesar II 5.10 Pada Proyek Gas Lift Compressor Station. *Universitas Mercubuana*.
- Nayiroh, N. (2013). Teknologi material komposit. *Yogyakarta. Ebaltdiaksesdari www. ebalta.de/rs/datasheet/en*.
- Prasetyo, Z. T. E., & Pane, Z. (2013). Studi Proteksi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) Silau 2 Tonduhan Kabupaten Simalungun. *Singuda ENSIKOM*, 2(3), 113-118.
- Zainudin, I made Adi Sayoga, I made Nuarsa. (2012). Analisa Pengaruh Variasi Sudut Sambungan Belokan Terhadap Head Losses Aliran Pipa, *Dinamika Teknik Mesin*, 75-83.