

## Analisa Kondisi Aliran pada *Bifurcation Pipa Penstock* Pembangkit Listrik Tenaga Air Kapasitas 4 MW Menggunakan *Software Ansys*

Kisto\*, Agus Hermanto

Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Bandung,  
Jl. PHH Mustopa No. 23 Bandung 40124  
\*E-mail: kistohardianto2022@gmail.com

Diajukan: 06-12-2022; Diterima: 20-08-2023; Diterbitkan: 21-08-2023

### Abstrak

Salah satu komponen terpenting dalam sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah *penstock*, yang berfungsi mengalirkan fluida air dari *forebay* ke turbin. Fluida air menggerakkan turbin yang akan memutar generator untuk menghasilkan listrik. Dengan peranan *penstock* yang sangat penting tersebut, maka dibutuhkan perencanaan yang detail termasuk juga perkiraan penyebab kegagalannya. Sehingga indikasi kegagalan tersebut bisa segera diantisipasi, supaya tidak mengganggu sistem operasi pembangkit dalam menghasilkan energi listrik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui lokasi yang mendapatkan *over pressure* pada *bifurcation penstock*, sehingga bisa diambil langkah-langkah antisipasi untuk mengatasi *over pressure* di area tersebut. Ruang lingkup penelitian dibatasi di area *inlet penstock* sampai ke *outlet penstock*. Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan metode literasi dari penelitian terkait serta sumber-sumber kepustakaan yang relevan. Material yang digunakan pada penelitian ini memiliki *density* ( $\rho$ ) 2179 kg/m<sup>3</sup>, ( $\sigma_a$ ) *allowable unit tensile stress* 1300 kg/cm<sup>2</sup>, ( $\eta$ ) efisiensi 0.95, ( $\epsilon$ ) perlindungan terhadap korosi 3 mm, *head* 134,97 m, *density* ( $\rho$ ) air 996,4 kg/m<sup>3</sup>, diameter *penstock* 1.900 mm, dari hasil perhitungan diperoleh kecepatan di *penstock* ( $V_2$ ) 10,89 m/s, tekanan sebesar 59.136,84 Pa, tebal *penstock* 10 mm, sedangkan dari hasil simulasi dengan *Ansys Fluent* tekanan di area A sebesar 95.240 Pa. Kecepatan di area A yang berada di tembereng antara sudut 180-270° pipa *penstock* adalah 8,032 m/s, dan tekanan 95.240 Pa berada di titik 1 dan 2 (arah sudut 250° dan 135°) searah jarum jam. Sehingga di area A (*reducer*) sebelum ke *bifurcation* diperlukan perkuatan yang lebih, berupa *slide block* sehingga dapat menahan beban gaya yang terjadi pada dinding *penstock* sebesar 20667,08 kgf dengan dimensi *slide block* 4000 x 1400 x 1550 mm.

**Kata kunci:** perencanaan, *penstock*, *over pressure*, kegagalan

### Abstract

One of the most important components in Hydroelectric Power Plant is a *penstock*, which functions to flow water from *forebay* to the turbine. The water drives a turbine which turns a generator to produce electricity. With the very important role of the *penstock*, detailed planning is needed, including an estimate of the causes of failure. So that the failure indication can be immediately anticipated, so as not to interfere with the generator operating system in producing electricity. The purpose of this study is to determine the location that gets *over pressure* on the *penstock bifurcation*, so that anticipatory steps can be taken to overcome *over pressure* in that area. The scope of the research is limited from *inlet* to *outlet* the *penstock*. The method used in this study is literacy method from related research and relevant literature sources. The material used has a *density* ( $\rho$ ) 2179 kg/m<sup>3</sup>, ( $\sigma_a$ ) *allowable unit tensile stress* 1300 kg/cm<sup>2</sup>, ( $\eta$ ) efficiency 0.95, ( $\epsilon$ ) corrosion protection 3 mm, *head* 134,97 m, *density* ( $\rho$ ) of water 996,4 kg/m<sup>3</sup>, *penstock* diameter 1.900 mm, the calculation results show the velocity in the *penstock* ( $V_2$ ) 10,89 m/s, pressure 59.136,84 Pa, thickness of *penstock* is 10 mm, while from the simulation results with *Ansys Fluent* the pressure at area A is 95.240 Pa. The velocity in area A which is on the section between the angle 180-270° of the *penstock* pipe is 8,032 m/s, and the pressure is 95.240 Pa at point 1 and 2 (angle 250° and 135°) clockwise. So in area A (*reducer*) before going to the *bifurcation* more reinforcement is needed, in the form of *slide block*, that it can withstand the force load that occurs on the *penstock* wall of 20667,08 kgf with *slide block* dimension of 4000 x 1400 x 1550 mm.

**Keywords:** planning, *penstock*, *over pressure*, failure

### 1. Pendahuluan

Dalam rangka mendukung program pemerintah yang menargetkan tahun 2030 Indonesia sudah *green energy* dalam hal pembangkit energi listrik. Dimana strategi penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) mengacu pada Undang-undang No. 16 Tahun 2016 tentang Pengesahan *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change* (Persetujuan Paris atas Konversi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa Bangsa Mengenai Perubahan Iklim) dan

telah di tetapkanya target *Nationally Determined Contribution* (NDC), maka pemerintah mendukung dan berkomitmen dalam menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 29% pada tahun 2030 (terhadap proyeksi emisi skenario *business as usual*), dimana sub sektor ketenagalistrikan merupakan bagian dari komitmen nasional tersebut. Oleh karena itu PLN memprioritaskan pemanfaatan pembangkit energi baru dan terbarukan (EBT), salah satunya adalah pembangkit tenaga air [1].

Pembangkit listrik tenaga air adalah pembangkit listrik yang menggunakan energi air sebagai energi penggerak generator pembangkit listriknya [2]. Prinsip kerja tenaga air yaitu mendistribusikan aliran air dari tempat yang tinggi ke tempat yang lebih rendah dengan gaya gravitasi [3]. Aliran air diarahkan ke turbin melalui penstock. Sehingga *penstock* memiliki peran yang sangat penting untuk menghasilkan energi listrik, yang berfungsi mengalirkan fluida yang akan menggerakkan turbin. *Penstock* dapat dipasang diatas atau di bawah tanah, tergantung pada faktor – faktor seperti sifat tanah, bahan *penstock*, suhu sekitar dan persyaratan lingkungan. *Penstock* yang ukuran besar biasanya di tanam dalam tanah, sebelum di tanam *penstock* harus di cat dan di *wrapping* dengan hati-hati untuk melindungi bagian luar dari korosi. Dari segi lingkungan solusinya optimal karena tanah dapat dikembalikan ke kondisi semula, dan tidak menghalangi pergerakan satwa liar di sekitarnya, sedangkan *penstock* berukuran kecil bisa di pasang di atas permukaan tanah. *Penstock* yang dipasang di atas tanah dapat dirancang dengan atau tanpa sambungan ekspansi. Saat ini banyak pilihan bahan untuk *penstock*. Untuk *head* dan diameter yang besar, fabrikasi baja yang dilas merupakan pilihan terbaik, untuk *head* tinggi bahan baja atau pipa besi ulet lebih sesuai, tetapi pada *head* sedang dan rendah baja kurang kompetitif, karena lapisan pelindung korosi internal dan eksternal tidak berkurang dengan ketebalan dinding dan juga ada ketebalan dinding minimum untuk *penstock* [4].

## 2. Material dan metodologi

Pada analisa kondisi aliran *bifurcation penstock* ini langkah pertama adalah menentukan material pipa *penstock* yang akan digunakan [5]. Pada Tabel 1 di bawah ini adalah matriks perbandingan material *penstock* dilihat dari beberapa aspek.

**Tabel 1.** Matriks perbandingan material *penstock*

Material	Pressure	Impact Resistance	Friction Loss	Corrosion
PVC	**	**	*****	****
Concrete	*	*****	*	*****
Ductile Iron	****	*****	****	****
Mild Steel	*****	*****	***	****

Keterangan :

- \*\*\*\*\* : Sangat Baik
- \*\*\*\* : Baik
- \*\*\* : Cukup
- \*\* : Kurang Baik
- \* : Jelek

Berdasarkan matriks pada Tabel 1 diatas yang memiliki nilai paling tinggi adalah material *mild steel* dengan 17 point. Selain keunggulan diatas *mild steel* juga banyak digunakan untuk *penstock*, karena harganya relatif murah, tersedia dalam berbagai ukuran, tersedia dilokal, mudah didapat, dan mudah dalam metode penyambungan baik dengan sistem mur baut, maupun dengan sistem pengelasan [6]. Sehingga pada analisa ini material yang akan di gunakan adalah *mild steel*. Adapun *density* yang di pilih di *properties ansys fluent* sebesar 2719 kg/m3.

Untuk membantu dalam proses analisa ini maka digunakan beberapa rumus teoritikal diantara adalah:

Persamaan Bernoulli [7];

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (1)$$

Karena bak penenang terbuka ke udara maka  $P_1 = P_{atm} = 0$ , didasar bak penenang dipasang *penstock* yang penampangnya jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan penampang bak penenang ( $A_1 > A_2$ ), sehingga laju penurunan permukaan air dalam bak penenang sangatlah kecil atau mendekati nol ( $V_1 \cong 0$ ) [8]. Maka untuk mencari tekanan di *inlet penstock* adalah sebagai berikut:

$$P_2 = \rho g (h_1) \quad (2)$$

Untuk luas penampang *penstock* [9]:

$$A_2 = \frac{1}{4} \pi D_2^2 \quad (3)$$

Adapun untuk menentukan kecepatan aliran di  $V_2$  dapat di tentukan dengan persamaan;

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot g (h_1)} \quad (4)$$

Ketebalan dinding pipa *penstock* dikalkulasi oleh rumus untuk ketebalan dinding pipa dan rumus untuk ketebalan dinding pipa minimum. Dari kedua persamaan tersebut nilai yang lebih besar dari hasil perhitungan yang akan dipilih. Namun dalam berbagai kasus ketebalan dinding pipa *penstock* minimum adalah 6 mm [10]. Dibawah ini adalah persamaan untuk menentukan ketebalan dinding pipa *penstock*. Persamaan ketebalan dinding pipa *penstock* minimum termasuk margin adalah

$$t_{min} = \frac{D+800}{400} \quad (5)$$

Untuk persamaan ketebalan dinding pipa *penstock* dihitung berdasarkan tekanan air:

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma_a \cdot \eta} + \varepsilon \quad (6)$$

Dimana :

t = Ketebalan pipa *penstock* (mm)

P = *Design Water Pressure* ( $\text{kg/cm}^2$ )

D = Diameter pipa *penstock* (mm)

$\sigma_a$  = *Allowable unit tensile stress* ( $=1300 \text{ kg/cm}^2$ )

$\eta$  = Efisiensi ( $= 0.95$ )

$\varepsilon$  = Perlindungan terhadap korosi, ( $= 3\text{mm}$ )

Model *dynamic mesh* di *ANSYS Fluent* dapat digunakan untuk memodelkan aliran dimana bentuk domain berubah seiring waktu karena gerakan pada batas domain. *Dynamic mesh* dapat diterapkan untuk aliran tunggal atau multifasa. Persamaan *dynamic mesh* berlaku untuk turbulensi, energi, spesies, fasa dan aplikasi *steady state*. Untuk menggunakan *dynamic mesh model* diperlukan volume *mesh* dan mendiskripsikan dari setiap gerakan zona permodelan dengan menggunakan profil batas [11]. Bentuk persamaan konversi integral dari *dynamic mesh* skalar secara umum adalah sebagai berikut :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\vec{u} - \vec{u}_g) \cdot d\vec{A} = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (7)$$

$\vec{u}$  adalah vektor kecepatan aliran

$\overline{u_g}$  adalah kecepatan pada pergerakan mesh

$\Gamma$  adalah koefisien difusi

$S_\phi$  adalah istilah sumber dari  $\phi$

$\partial V$  disini digunakan untuk mewakili batas pengaturan volume,  $V$

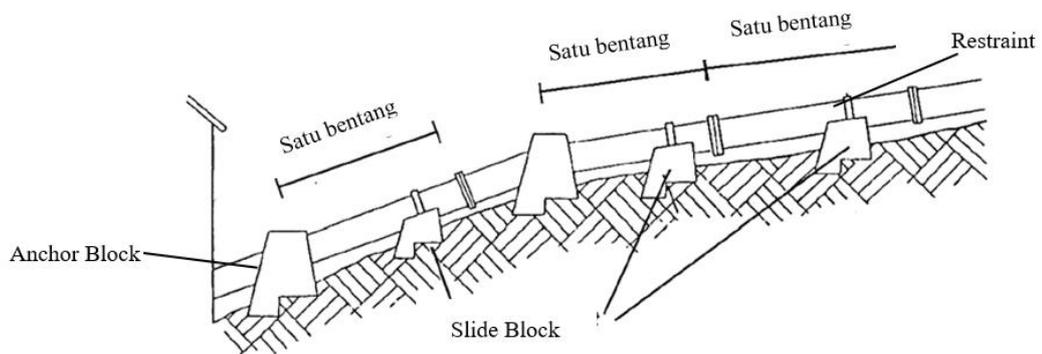
Untuk persamaan waktu dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV = \frac{3(\rho \phi V)^{n+1} - 4(\rho \phi V)^n + (\rho \phi V)^{n-1}}{2\Delta t} \quad (8)$$

Dimana  $n+1$  dan  $n-1$  menunjukkan jumlah tingkat waktu masing-masing yang berurutan dengan  $n+1$  menunjukkan waktu saat ini.

Setelah *dynamic mesh* selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan *pressure base solver* menggunakan algoritma yang termasuk dalam kelas umum atau metode proyeksi. Proses solusi pada saat simulasi melibatkan iterasi dimana seluruh himpunan persamaan yang mengatur diselesaikan berulang kali sampai solusi konvergen. Langkah berikutnya untuk melihat kondisi aliran pada *bifurcation penstock* adalah dengan memvisualisasikan hasil simulasi dengan berbagai aspek solusi dengan *postprocessing ribbon tab* seperti *pathlines* dan *countour*.

Sehingga dari hasil simulasi tersebut setelah ditemukan kritikal *point* bisa dijadikan pertimbangan dalam memitigasi solusi yang akan diambil dengan metode penyelesaian masalah yang sesuai. Pada penelitian ini akan memberikan rekomendasi untuk langkah-langkah yang perlu diambil untuk mengatasi permasalahan tersebut, salah satunya dengan metode perkuatan atau penumpu *penstock* pada area kritis [12]. Metode perkuatan tersebut dengan penambahan *anchor blocks*, *slide blocks* atau *restraint* [13]. Fungsi *anchor block* adalah untuk membatasi pergerakan pipa *penstock* ke segala arah. *Anchor block* juga diperlukan untuk menahan gaya aksial pada *penstock* yang lurus dan panjang [14]. Desain *anchor block* disesuaikan dengan banyaknya gaya yang bekerja pada *anchor block*, baik dalam kondisi pipa *penstock* penuh air maupun kondisi pipa kosong [15]. Pada Gambar 1 dibawah ini adalah tipe penumpu tersebut.



**Gambar 1.** Slide block, anchor block dan restraint

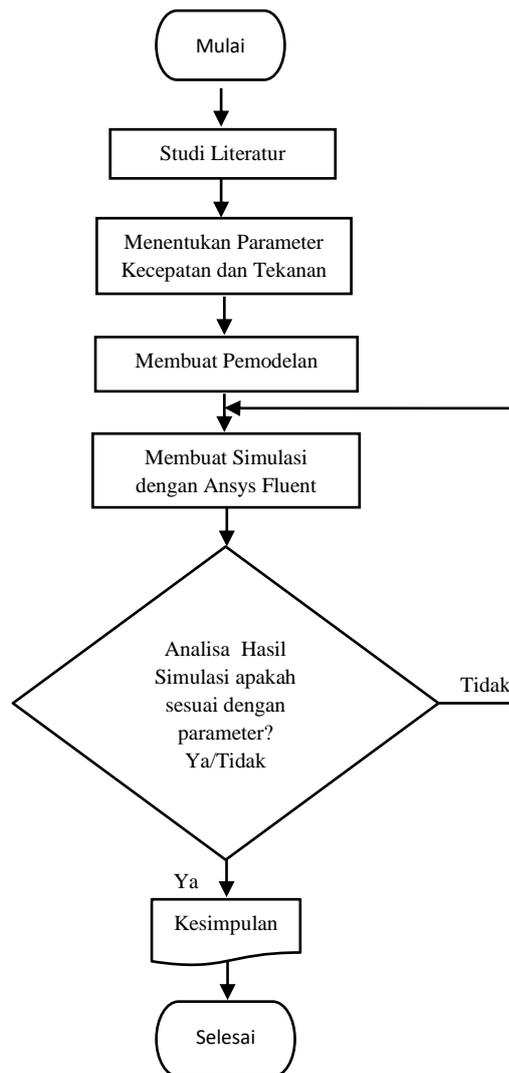
(Sumber : Adam, 1993)

Penstock dapat didukung dengan berbagai cara tergantung pada desain awal yang dipilih, kondisi geologi eksisting, dan profil *penstock* [16]. *Anchor block* biasanya berupa massa beton bertulang yang dikunci ke *penstock* supaya tidak dapat bergerak relatif terhadap *block*. *Anchor block* harus selalu di tempatkan pada tikungan vertikal atau horizontal di *penstock*. *Anchor block* harus selalu di tempatkan dimana *penstock* akan memasuki rumah pembangkit untuk melindungi turbin. *Anchor block* juga di tempatkan di sepanjang bagian pipa *penstock* yang lurus, masing-masing di samping sambungan ekspansi. Pada saat instalasi *head* rendah /sedang (dibawah 20 kW dan *head* 60 m) dengan *penstock* lurus tertanam atau diatas permukaan tanah bisa dirancang menurut aturan sederhana ini: satu bentang *anchor block* di letakan setiap 30 m,

dengan memasukan pipa ke satu meter kubik beton untuk setiap 300 mm, dengan kata lain pipa 200 mm hanya membutuhkan beton 0,67 m<sup>3</sup> beton [17].

Diharapkan dari hasil kajian ini bisa memberikan gambaran *problem solving* kritikal kondisi aliran pada *bifurcation* yang terjadi pada *penstock* tipikal, sehingga para perencana (*engineer*) bisa mempertimbangkan dalam desain *penstock* dengan sistem perkuatan yang sesuai. Dengan desain perkuatan yang sesuai diharapkan pipa *penstock* dapat berfungsi dengan baik, untuk mengalirkan fluida ke turbin. Sehingga suplai energi listrik tidak terganggu.

Metode penelitian pada analisa ini dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini.

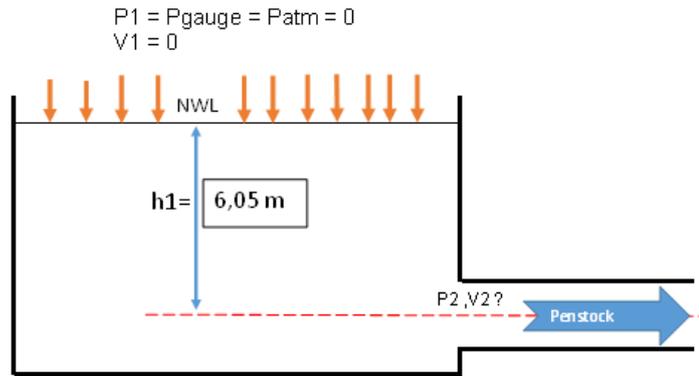


**Gambar 2.** Diagram alir analisa kondisi aliran pada *bifurcation* penstock

Pada diagram aliran diatas menggambarkan detail tahapan dalam menganalisa kondisi aliran pada *bifurcation penstock* dengan 2 outlet. Dimulai dari studi literatur, dilanjutkan dengan tahapan perhitungan untuk menentukan batasan parameter penelitian serta area *penstock* yang akan di analisa, setelah parameter di tentukan maka tahapan berikutnya adalah membuat pemodelan untuk simulasi di *Ansys Fluent*, pada proses simulasi ini parameter hasil perhitungan menjadi dasar *input parameter* di *software Ansys Fluent* untuk di *running*. Kondisi aliran pada *bifurcation* yang terjadi pada *penstock* dapat terlihat dari hasil simulasi *software Ansys Fluent* dan akan di analisa sesuai parameter yang sudah di tentukan. Setelah hasil analisa diperoleh maka akan dibuatkan kesimpulan dari hasil penelitian tersebut, berupa saran dan rekomendasi untuk perencanaan berikutnya dengan pemodelan *penstock* yang tipikal.

### 3. Hasil dan pembahasan

Dibawah ini adalah sketsa bak penenang dan inlet penstock.



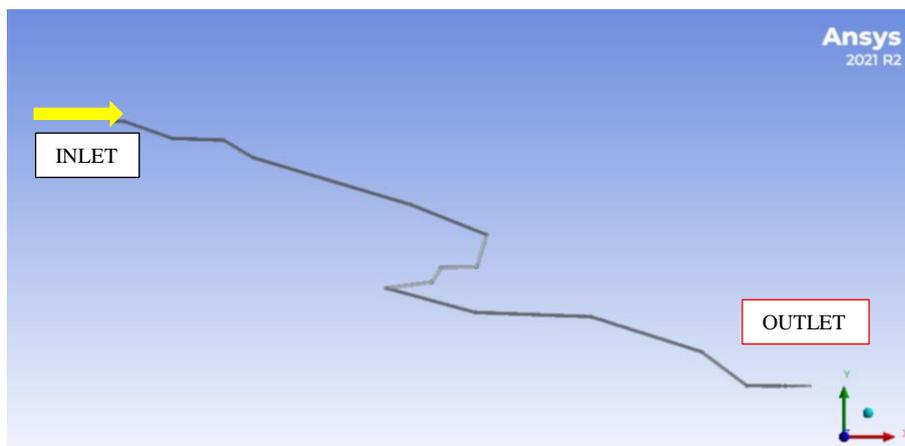
**Gambar 3.** Sketsa *forebay* dan inlet penstock.

Dengan ketinggian level muka air di bak penenang 6,05 m, dengan *density* ( $\rho$ ) air 996,4 kg/m<sup>3</sup>, dihasilkan parameter sebagai berikut:

**Tabel 2.** Parameter kecepatan dan tekanan

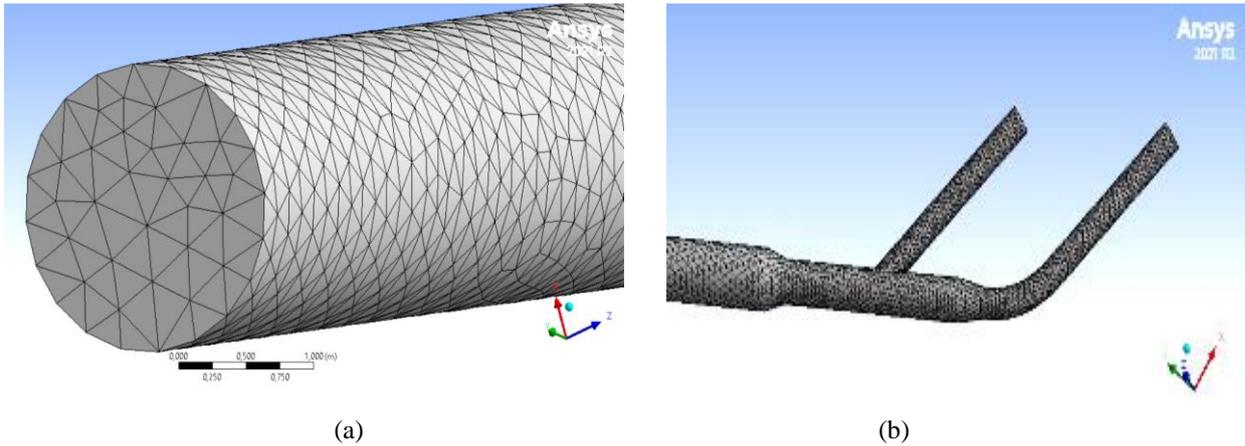
Parameter	Hasil
Kecepatan ( $V_2$ )	10,89 m/s
Tekanan ( $P_2$ )	59.136,84 Pa
Diameter <i>Penstock</i> ( $D$ )	1900 mm
Tebal <i>Penstock</i> ( $t_{min}$ )	6,75 mm

Dari hasil perhitungan diatas maka tebal dinding pipa *penstock* yang diambil adalah 6,75 mm dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan di pasaran dan adanya deformasi saat proses rol dari lembaran plat menjadi bentuk pipa, maka dipilih tebal plat *mild steel* 10 mm. Untuk mempermudah simulasi aliran di *Ansys fluent* langkah pertama yang dilakukan adalah membuat pemodelan *penstock*, seperti terlihat pada Gambar 4.



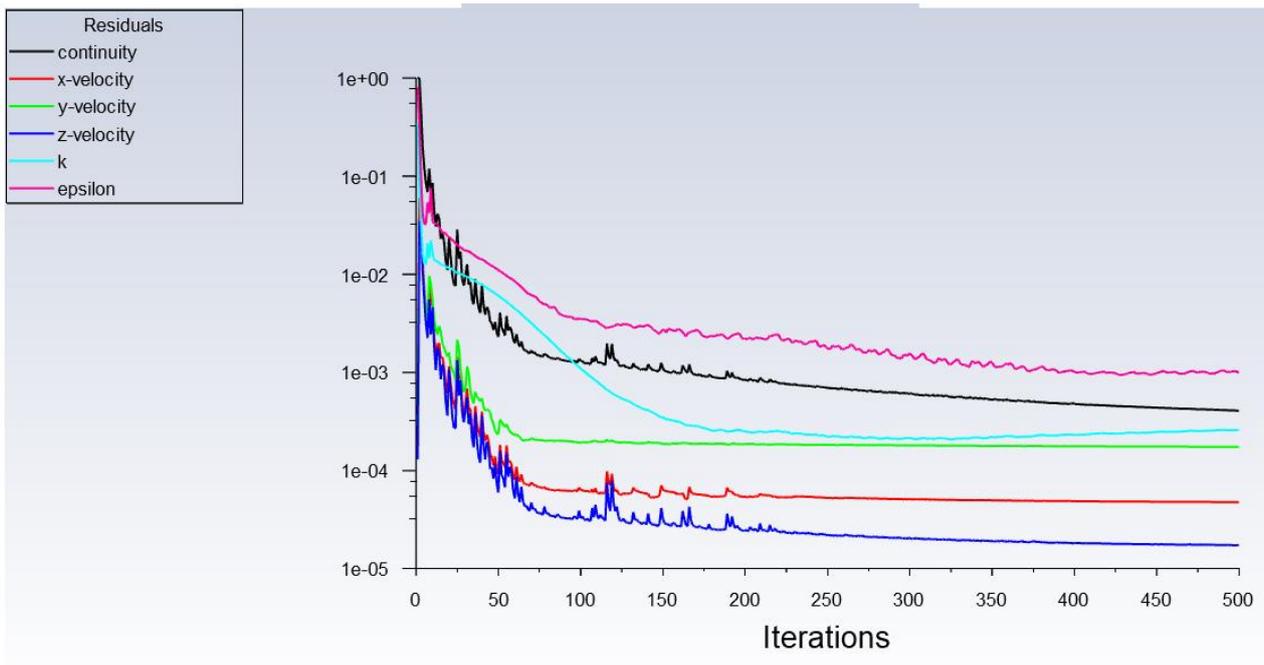
**Gambar 4.** Pemodelan *penstock* di Ansys Fluent.

Untuk memodelkan aliran dimana bentuk domain berubah seiring waktu maka dibuatkan *dynamic mesh* seperti tersaji pada Gambar 5.



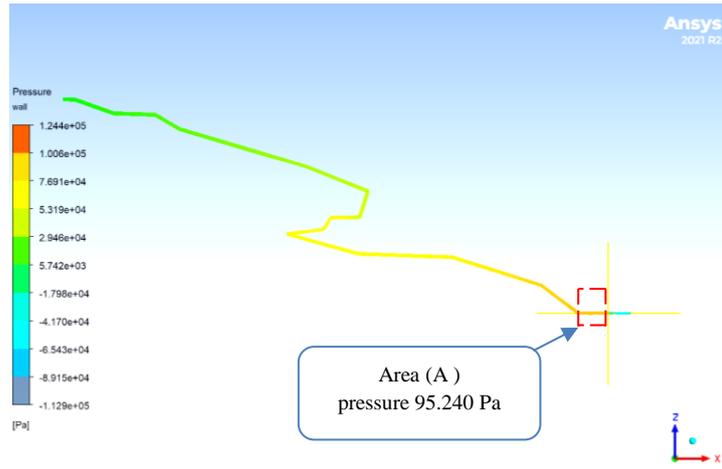
**Gambar 5.** Bentuk meshing di inlet (a), dan meshing di outlet (b) pada Ansys Fluent

Pada gambar diatas 5 (a) adalah profil meshing dengan element size 0,5 m di *inlet* penstock, sedangkan pada 5 (b) adalah profil meshing dengan element size 0,5 m di *outlet* penstock. Setelah *meshing* terbentuk langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan parameter pada perhitungan diatas. Pada Gambar 6 adalah hasil *run calculation* dengan iterasi sebanyak 500 kali yang sudah *convergen*.



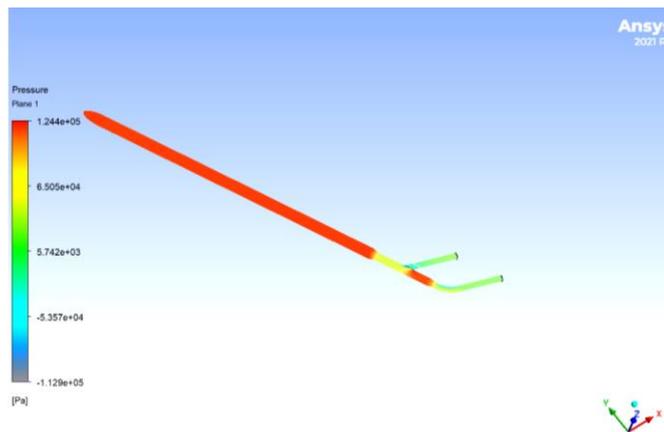
**Gambar 6.** Scaled residuals convergen run calculation result.

Pada Gambar 7 area A *pressure* hasil simulasinya sebesar 95.240 Pa lebih besar dibandingkan di area lain, sehingga di area tersebut harus ditambah perkuatan *anchor blocks*, *slide blocks* atau *restraint* untuk dapat menahan *pressure* tersebut.



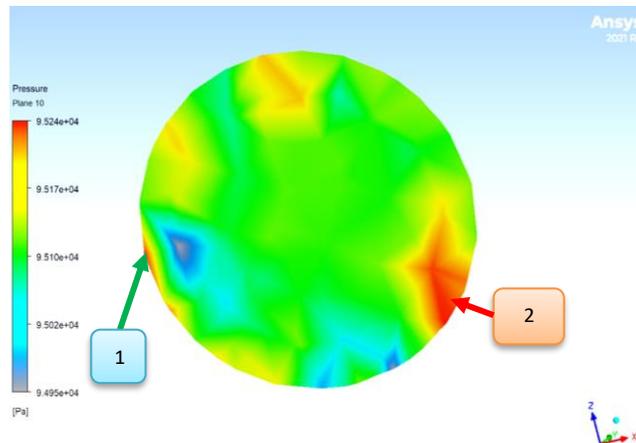
**Gambar 7.** Internal Pressure di Area Bifurcation sebesar 95.240 Pa

Untuk memastikan dan melihat profil *pressure* dan *velocity* yang terjadi pada area yang mendapatkan *pressure* 95.240 Pa pada profil *penstock* dengan 2 *outlet* ini maka akan di analisa bagian dari area A (Gambar 7). Dibawah ini adalah tahapan yang dilakukan. Langkah pertama adalah melihat detail *contour bifurcation* pada outlet *penstock*. Seperti tersaji pada Gambar 8.



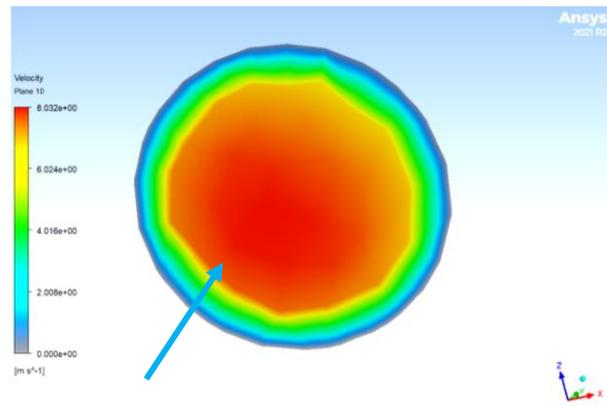
**Gambar 8.** Bentuk *contour* di area *bifurcation*

Bentuk *profil pressure* di area yang mendapatkan *pressure* 95.240 Pa adalah seperti terlihat pada Gambar 9.



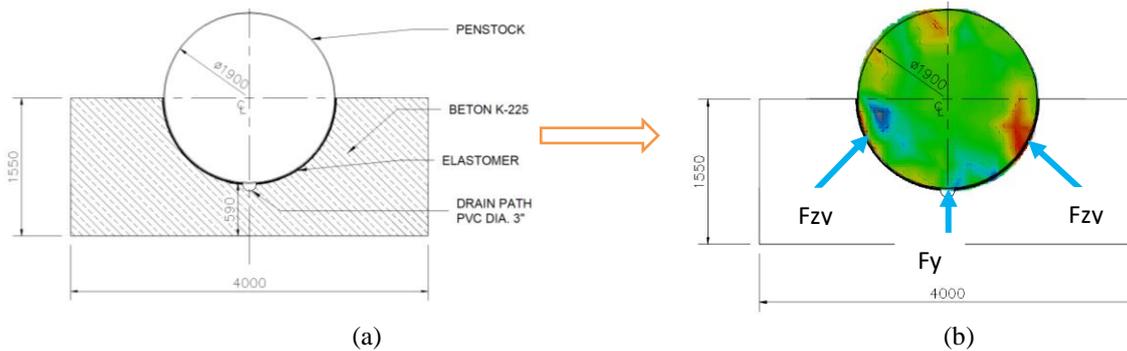
**Gambar 9.** Bentuk *Profil Pressure* 95.240 Pa

Adapun kecepatan aliran fluida air maksimal sebesar 8,032 m/s ada di tembereng antara sudut 180-270° searah jarum jam pada penstock. Seperti terlihat pada Gambar 10 dengan panah warna biru.

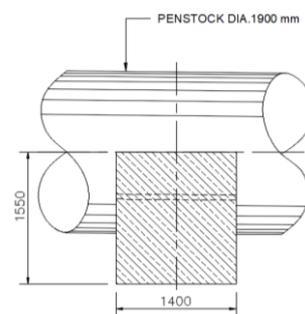


**Gambar 10.** Bentuk *Counter Velocity* 8,032 m/s

Berdasarkan Gambar 9 diatas dinding *penstock* yang mendapatkan *pressure* 95.240 Pa adalah di titik 1 (warna merah) atau di sudut 250° searah jarum jam dan di titik 2 (warna merah) atau di sudut 135° searah jarum jam. Sehingga bentuk *support* atau *slide block* untuk menahan *pressure* tersebut di rekomendasikan seperti Gambar 11 dibawah ini:



**Gambar 11.** Rekomendasi desain *slide block* (a), dan Ilustrasi gaya untuk menahan *pressure penstock* sebesar 95.240 Pa (b)



**Gambar 12.** Tampak samping profil *slide block* & *penstock*

Dengan *pressure* 95.240 Pa = 0,9524 kgf/cm<sup>2</sup>, dengan luas area pondasi 21.700 cm<sup>2</sup>, maka gaya yang di distribusikan dari *penstock* ke pondasi sebesar 20.667,08 kgf.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian analisa kondisi aliran pada *bifurcation penstock* diatas dapat disimpulkan bahwa dengan tinggi bak penenang 6,05 m dengan *density* ( $\rho$ ) air 996,4 kg/m<sup>3</sup>, tekanan di *inlet penstock* sebesar 59.136,84 Pa, sedangkan

*velocity* (kecepatan aliran) fluida air adalah 10,89 m/s. Dengan diameter pipa 1900 mm, tebal plat besi yang dipilih 10 mm. Setelah dibuat pemodelan dan *meshing* dengan elemen size 0,5 m dan dilakukan simulasi aliran dengan *Ansys Fluent* didapatkan *pressure* 95.240 Pa di area A sebelum ke *outlet* penstock. Hasil kajian lebih lanjut di area A (*reducer*) sebelum *bifurcation* mendapat *pressure* 95.240 Pa di titik 1 dan 2. Sehingga di area A (*reducer*) sebelum *bifurcation* pada titik 1 dan 2 diperlukan perkuatan lebih berupa *slide block*, diharapkan dengan tambahan *slide block* dapat menahan beban gaya yang terjadi pada dinding *penstock* tersebut sebesar 20667,08 kgf akibat *over pressure* dengan dimensi *slide block* 4000 x 1400 x 1550 mm.

#### Daftar Pustaka

- [1] Rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL). 2021-2030. Indonesia: PT PLN (Persero); 2021. p II-54.
- [2] Sardi, S., Listrik tenaga air berdasarkan potensi debit andalan sungai. Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro (FORTEI 2017) ISBN 978-602-6204-24-0. Fakultas Teknik Universitas Negeri Gorontalo, 18 Oktober 2017; Gorontalo, Indonesia. Fakultas Teknik Universitas Negeri Gorontalo; 2017. P299.
- [3] Thapar, O.D., Hydropower engineering. India: Alternate Hydro Energy Centre Indian Institute Of Technology, Roorkee; 2008. p 7.
- [4] Bernhard, P., Guide on how to develop a small hydropower plant. 6<sup>th</sup> edition. Brussels – Belgium: European Small Hydropower Association - ESHA; 2004. p 134.
- [5] A, Kunwor. Technical Specifications of Micro Hydropower System Design and its Implementation, “Feasibility Analysis and Design of Lamaya Kholo Micro Hydro Power Plant”. Lappeenranta: Lahti University of Technology LUT; 2015. P.33.
- [6] PPA, SEIAPI., Micro hydropower system design guidelines. United States: Global Sustainable Energy Solutions; 2020. p 29.
- [7] Yunus, A.C., Robert, H.T., Fundamental of thermal fluid sciences: Bernaoulli and Energy Equations (Chapter 12). Washington, DC: McGraw-Hill;2003. p 535.
- [8] Mikrajuddin, A., Fisika dasar 1. Bandung: Institut Teknologi Bandung;2016. P 783.
- [9] Tutorial No. 1. Fluid flow theory. [http://home.zcu.cz/~kovarikp/MT/freestudy/FLUID\\_MECHANICS\\_D203/FLUID\\_MECHANICS\\_D203.pdf](http://home.zcu.cz/~kovarikp/MT/freestudy/FLUID_MECHANICS_D203/FLUID_MECHANICS_D203.pdf). D.J.DUNN [www.freestudy.co.uk](http://www.freestudy.co.uk); (Diakses pada tanggal 29 Jun 2022).
- [10] Japan International Cooperation Agency. [https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11137890\\_06.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11137890_06.pdf).AP-5-31 (Diakses pada tanggal 7 Aug 2022).
- [11] ANSYS 2021 R1. ANSYS Fluent Theory Guide. USA:ANSYS, Inc 2021. p 37.
- [12] Ranti, H., Efisiensi penggantian pipa *penstock* PLTA siman dengan metode welded lap joint. Jurnal Forum Mekanika. 2017 Mei; Vol.6 No.1: p. 38.
- [13] Ranti, H., Andy, B., Piyantha H., Allen, I., Micro hydro design manual, “A guide to small-scale water power schemes”. 6th edition. London: Intermediate Technology Publications; 1993. p 132.
- [14] BPC Hydroconsult., Civil works guidelines for micro-hydropower in nepal. Nepal: Practical Action; 2003. p 5.
- [15] Rishiraj, P.M., Bijimol, J., Dangy, G., Jithin, J., Design and analysis of anchor block and penstock pipe of a hydroelectric project. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2018 March; Volume: 05 Issue: 03: p. 1064.
- [16] John, H.B., Steel penstocks. 2<sup>th</sup> edition. United States: American Society of Civil Engineers; 2012. p 87.
- [17] Adam, H., Andy, B., Priyantha, H., Allen, I., Micro-hydro design manual,”A guide to small-scale water power schemes”. London: Intermediate Technology Publications; 1993. p 134.