

Optimasi Desain *Penstock Intricate Countur* dengan Kapasitas *Hydro Power Plant* 4 x 2 MW

Kisto^{1✉}, Agus Hermanto²

^{1,2} Program Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diserahkan : 24-03-2023

Direvisi : 27-03-2023

Diterima : 31-03-2023

Kata Kunci:

Energi terbarukan, Hydro power, Penstock, Optimasi desain.

Keywords :

Renewable energy, Hydro power, Penstock, Design optimization.

Corresponding Author :

Kisto

Program Studi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung

Jl.Phh. Mustopa No. 23 Neglasari Kec. Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat 40124

Email: elsiraj2018@gmail.com

ABSTRAK

Kebutuhan daya listrik nasional sebesar 8,5% per Tahun. Untuk memenuhi kebutuhan listrik tersebut salah satunya dengan sumber energi terbarukan dari aliran air atau *hydro power plant*. Penstock merupakan bagian dari *hydro power plant* yang mempunyai peranan penting. Sehingga dibutuhkan desain penstock yang bisa menunjang kelancaran *hydro power* tersebut. Metode penelitian yang dilakukan adalah dengan simulasi di software caesar. Tujuan dari penelitian ini yaitu melakukan optimasi desain penstock. Hasil dari penelitian dengan diameter penstock 1,9 m, panjang 2000 m, tebal 12 mm, tekanan *inlet* penstock sebesar 53.880,99 Pa dan kecepatan air 10,40 m/s, tegangan maksimum yang dihasilkan sebesar 29.896.150 Pa masih di bawah *allowable stress* 160.670 kPa. Tetapi untuk *displacement* maksimum di segmen 13 area AB#12 sampai AB#13 node 349-350. Arah sumbu X sebesar -12,702 mm, arah sumbu Y sebesar 16,418 mm, arah sumbu Z sebesar 32,835 mm. Setelah dilakukan optimasi desain *displacement* yang terjadi dibawah 1 mm.

ABSTRACT

National electricity demand is 8,5% per year. To meet demand for electricity is use renewable energy sources from running water or hydro power plants. Penstock is part of a hydro power plant which has an important. So need a penstock design that can support the smooth running of the hydro power. The research method used simulating caesar software. The purpose of this research is to optimize penstock design. The results of the study with a penstock diameter of 1,9 m, length 2000 m, thickness 12 mm, penstock inlet pressure of 53.880,99 Pa and water speed of 10,40 m/s, resulting maximum stress of 29.896.150 Pa still below allowable stress of 160.670 kPa. But for maximum displacement in segment 13 area AB#12 to AB#13 nodes 349-350. The direction X-axis is -12,702 mm, the Y-axis is 16,418 mm, the Z-axis is 32,835 mm. After optimizing the displacement design that occurs below 1 mm.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi, pertambahan jumlah penduduk, dan pertumbuhan pembangunan. Berdasarkan data Perusahaan Listrik Negara terjadi peningkatan kebutuhan daya listrik nasional sebesar 8,5% per tahun (Ma'ali. 2017). Berdasarkan Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 112 Tahun 2022 langkah

pemerintah dalam memenuhi kebutuhan energi listrik adalah dengan percepatan pengembangan energi terbarukan. Sumber energi terbarukan merupakan sumber energi yang dihasilkan panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran air serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut. Untuk penyediaan tenaga listrik energi terbarukan dari sumber aliran air, Indonesia memiliki sumber daya alam yang sangat melimpah, salah satunya adalah aliran sungai yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit tenaga listrik. Potensi energi *mini-micro hydro* di Indonesia adalah sebesar 19.385 MW dan 30 MW (Widiana et al. 2020). Salah satu bagian dari *hydro power plant* yang mempunyai peranan cukup penting adalah penstock. Dimana penstock merupakan saluran penghubung antara bak penenang dengan turbin pada rumah pembangkit listrik. Upaya meminimalisir kehilangan energi pada penstock sangat penting untuk mengoptimalkan bangkitan energi listrik (Pratama et al. 2021). Penstock sebagian besar terbuat dari baja karbon yang dilas. Dalam beberapa aplikasi *head* rendah, pipa HDPE bisa digunakan. Penstock harus dioptimalkan sehubungan dengan *head loss* dan kebutuhan material (Thapa et al. 2016). Pengoperasian yang ekstensif pada penstock menghasilkan pengurangan ketebalannya apabila terus berlanjut ke ketebalan kritis dapat menyebabkan pecahnya penstock (Pathak et al. 2020). Sistem penstock dapat dioptimalkan untuk efisiensi dengan menggunakan elemen pipa dengan koefisien *losses* yang lebih rendah (Bondar et al. 2021). Pipa penstock dilengkapi dengan *manhole* yang dapat digunakan untuk keperluan pemeliharaan. Selain itu penstock dilengkapi dengan *expansion joint* dengan desain standar yang dapat bergeser secara mulus tanpa terjadi kebocoran dari permukaan penstock yang bergeser. *Expansion joint* harus dapat bergeser minimal sepanjang kurang lebih 100 mm. *Expansion joint* dilengkapi dengan *dismanteling joint* dengan tujuan agar *expansion joint* dapat dilepas dari pipa penstock bila diperlukan (Hidayawanti. 2017). Dari penelitian sebelumnya *water hammer* yang berlebihan yang disebabkan oleh pemutusan aliran yang cepat diketahui sebagai penyebab langsung dari ledakan penstock. Kekuatan *shell* penstock yang rendah karena kualitas sambungan las yang rendah dan kurangnya penguatan di tempat-tempat dengan konsentrasi tegangan yang besar juga berkontribusi terhadap kegagalan penstock (Anakiya et al. 2014).

Tujuan dari penelitian Optimasi Desain Penstock *Intricate Countur* dengan Kapasitas Hydro Power Plant 4 x 2 MW adalah untuk mengetahui gaya-gaya, tegangan dan *displacement* yg terjadi akibat dari *dead load*, *live load*, *wind load*, *water hammer* dan *seismic*. Sebagai asesemen bahwa penstock masih layak dioperasikan atau memerlukan *improvement*.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan simulasi dengan menggunakan software caesar. Perhitungan tegangan akan dilakukan pada seluruh panjang pipa penstock dari *intake* sampai *outlet*. Pemodelan pipa terdiri dari pendefinisian geometri, sifat material, kondisi pembebanan, pemodelan *supports*, dan peralatan lainnya. Asumsi dan kondisi pemodelan pipa dilakukan sedemikian rupa sehingga sedekat mungkin dengan kondisi sebenarnya ketika penstock dioperasikan. Hasil keluaran dari perhitungan adalah tegangan, perpindahan, dan gaya tumpuan. Ketika hasil analisis memenuhi semua persyaratan desain serta mematuhi kode ASME B31.3, desain sistem pipa penstock dianggap dapat diterima. Bentuk *intricate countur* geometri dari penstock yang akan dianalisa adalah sebagai berikut:



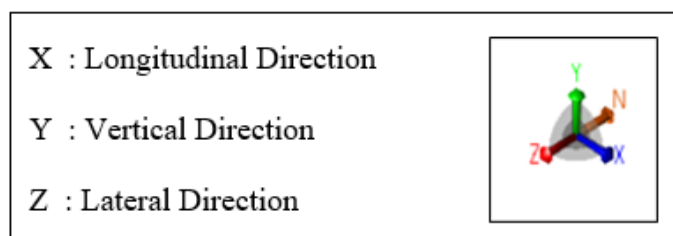
Gambar 1. Geometri *intricate countur* penstock

Pada Gambar 1 diatas menggambarkan bentuk *intricate countur* penstock dan *saddle support* eksisting yang akan di analisa. Bentuk *saddle support* eksisting dengan tiga gaya penahan, satu penahan vertikal dan dua penahan miring membentuk sudut 30°. Adapun jarak tiap *saddle support* bervariasi dari jarak per 5, 6, 7 dan 8 meter, seperti tersaji pada Gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Jarak dan jumlah support per segmen pada penstock

Diameter pipa penstock yang akan di analisa sebesar 1,9 m, panjang total penstock dari *inlet* ke *outlet* 2000 m dengan tebal pipa penstock 12 mm. Type penstock yang akan di analisa pada penelitian ini adalah *type exposed* penstock. Material yang digunakan adalah A53 Grade B dengan kekuatan luluh spesifik minimum (SMYS) 241 MPa, kekuatan tarik spesifik minimum (SMTS) 432 MPa. Pemodelan analisis tegangan pipa penstock dimodelkan berdasarkan koordinat global seperti pada Gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Sistem koordinat global yang digunakan pada Software Caesar

Analisa tegangan pada pipa penstock dilakukan berdasarkan kode ASME B31.3, kasus pembebanan terdiri dari :

a. *Sustained Load*

Sustained Load adalah beban yang bekerja pada pipa secara terus menerus selama beroperasi yang berasal dari tekanan fluida, berat dari pipa, komponen pipa dan fluida dalam pipa.

$$L = L_0 \left(0.25 + \frac{4.57}{\sqrt{K_{LL} A_T}} \right) \quad (1)$$

Dimana:

L = *Desain live load* dalam m² dikurangi area yang didukung oleh anggota struktur

L₀ = *Desain live load* dalam m² tanpa dikurangi area yang didukung oleh anggota struktur.

K_{LL} = Faktor elemen *live load*. Untuk kolom interior K_{LL} = 4

A_T = Area tributary dalam m²

b. *Occasional Load*

Occasional Load adalah beban yang sewaktu-waktu terjadi selama pipa beroperasi seperti *wind load*, pelepasan *relief valve*, dan *seismic load*.

c. *Expansion Load*

Expansion Load adalah beban yang bekerja pada pipa karena adanya deformasi pada pipa yang disebabkan oleh beban ekspansi seperti perbedaan temperatur.

Untuk lokasi penelitian di daerah X dengan koordinat 7.47554 Lintang Selatan, dan 107.61245 Bujur Timur. Nilai PGAm yang diperoleh adalah 0.5611 g. Sehingga nilai percepatan *seismic* $U_x = 0.5611$ g arah sumbu X, $U_z = 0.5611$ g arah sumbu Z. Temperature operasi di lokasi kajian sebesar 28 °C. Kecepatan angin di lokasi kajian paling tinggi terjadi pada bulan agustus sebesar 11,5 km/jam atau 3,19 m/s. Desain pembebanan angin dapat diperlakukan sebagai pendekatan statis atau dinamis.

$$qz = 0.613 Kz Kzt KdV^2 (N/m^2) \quad (2)$$

Dimana :

Koefisien = 0,613

Koefisien eksposur tekanan kecepatan (Kz) = 1,09

Faktor topografi, untuk tanah datar (Kz) = 1

Faktor arah angin (Kd) = 1

Kecepatan angin dasar (v) = 1

Pembebanan angin (qz)

Analisa *water hammer* dilakukan untuk mengetahui tekanan maksimum dan minimum sepanjang penstock. Tekanan maksimum dan minimum tersebut harus berada dalam batas toleransi tertentu. Dimana kenaikan tekanan harus kurang dari 25% dan tekanan minimum harus lebih besar dari tekanan atmosfer. Pada analisa *water hammer* disimulasikan saat *wicket gate* di tutup dengan *closing time* 6 s dan 12 s. Untuk kecepatan tekanan gelombang:

$$a_c = \sqrt{\frac{k}{\rho_w \left(1 + \frac{D_p k c_1}{eE}\right)}} \quad (3)$$

Dimana :

Velocity of pressure wave (a_c), m/s

Bulk modulus of the water, (k), Pa

Water's density (ρ_w), kg/m³

Pipe inner diameter (D_p), m

Constant function of the boundary conditions of pipe (c_1) = 0,85

Practical pipe thickness (e), m

Young modulus (E), Gpa

Sehingga *transient pressure induced by rapid gate closure* adalah

$$\Delta H = \rho_w \cdot a_c \cdot \Delta V \quad (4)$$

Dimana :

Variation velocity of water (ΔV), m/s

Variation pressure of water hammer (ΔH), Pa

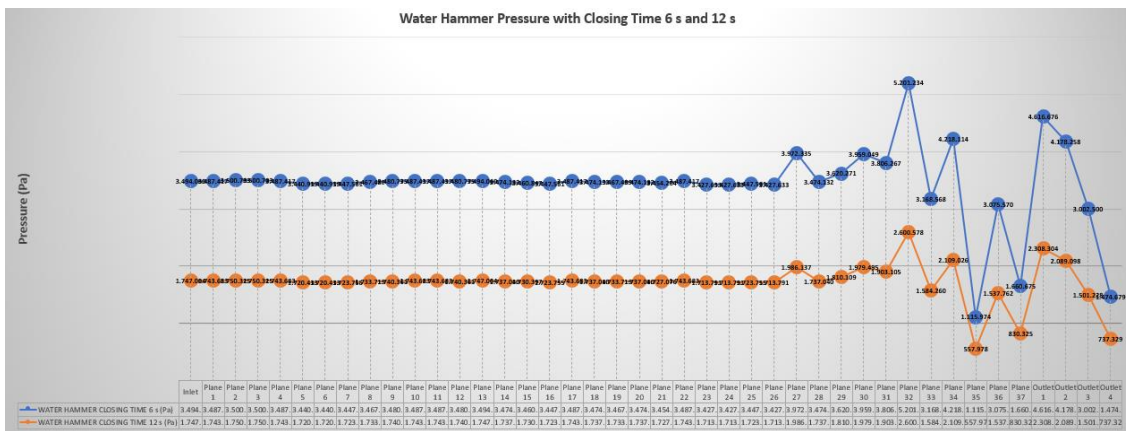
HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter input untuk simulasi di caesar adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter input software Caesar

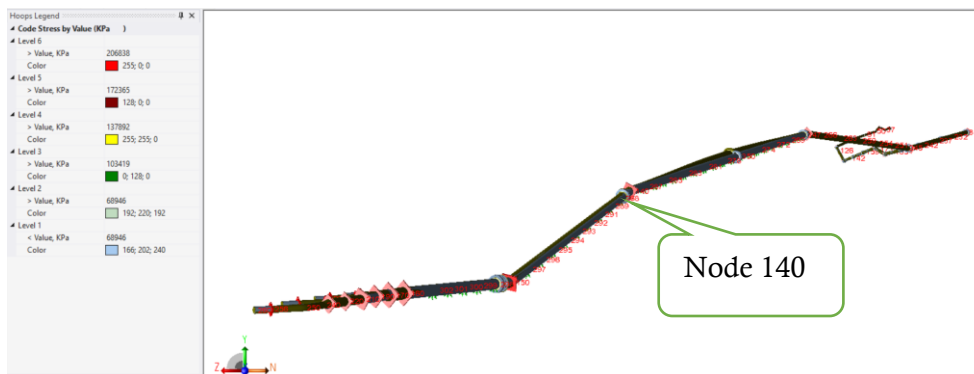
| Parameter | Nilai | Satuan |
|----------------------|--------------|-------------------|
| Tekanan Inlet | 53.880,99 | Pa |
| Tekanan Outlet | 1.403.569,36 | Pa |
| Debit | 29,47 | m ³ /s |
| Diameter Penstock | 1,9 | m |
| Corrossion Factor | 0,7950 | mm |
| Fluid Density | 998,2 | kg/m ³ |
| Temperature Minimal | 17 | °C |
| Temperature Maksimal | 28 | °C |

Dengan parameter input pada Tabel 1 diatas dan *allowable stress* untuk material pipa penstock sebesar 160,67 MPa (241/1,5 MPa). Ketika *wicket gate* ditutup dengan *closing time* 6 s dan 12 s terjadi fenomena fluktuasi tekanan (*water hammer*) yang diakibatkan oleh penutupan *wicket gate* tersebut. Simulasi *water hammer* yang terjadi sesuai dengan distribusi kenaikan tegangan per *plane* sepanjang pipa penstock dengan *closing time* 6 s dan 12 s dapat dilihat pada Gambar 4 dibawah.



Gambar 4. Fenomena *water hammer* pada penstock

Dari hasil simulasi *water hammer* pada Gambar 4 diatas terjadi fluktuasi tegangan yang cukup signifikan dari *wicket gate* sampai ke *plane* 27, tegangan maksimal di *plane* 32 sebesar 5.201.234 Pa ketika *closing time* 6 s dan terdistribusi merata dari *plane* 26 sampai ke *inlet* di bak penenang. Setelah fenomena *water hammer* di ketahui, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi *stress analysis* dengan *combination load* (*dead load, live load, water hammer, seismic and wind load*) pada software caesar. Hasil simulasi seperti terlihat pada Gambar 5 dibawah ini.



Gambar 5. Hasil *stress analysis* pada penstock

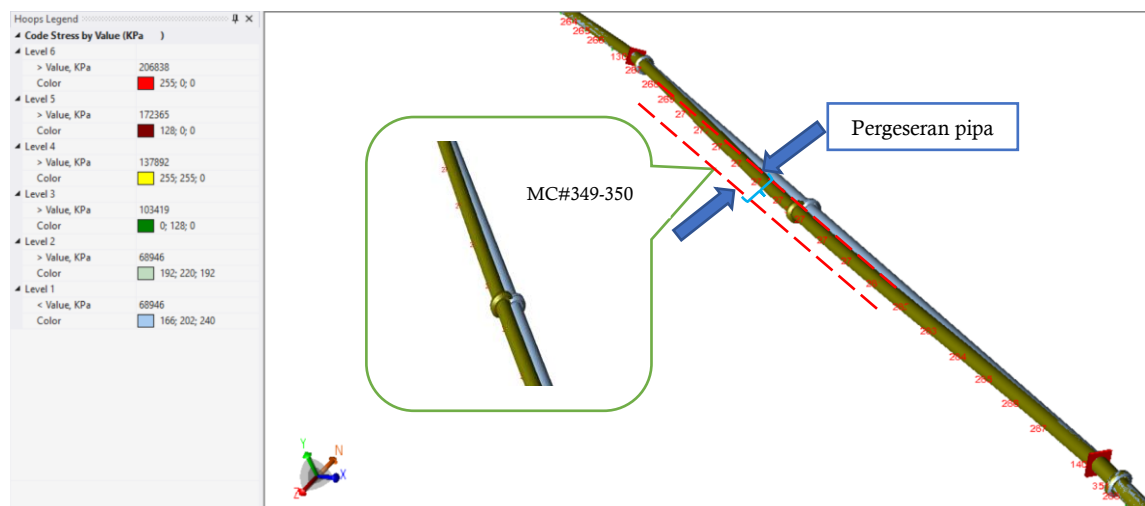
Berdasarkan skala warna pada hasil stress analysis diatas besarnya tegangan tiap segmen sepanjang pipa penstock tersaji pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Hasil stress analysis pada penstock

| B31.3 STRESSES REPORT: Stresses on Elements | | | | |
|---|-------------------|------------------------|-------------|--|
| CASE 7 (SUS) W+T1+P1+U3+WIN2 | | | | |
| Segmen | Code Stress (kPa) | Allowable Stress (kPa) | Percent (%) | Remarks |
| 1 | 17548,80 | 160.670 | 10,92% | Inlet ke AB#1 Area Node 10 |
| 2 | 17166,70 | 160.670 | 10,68% | AB#1 ke AB#2 Area Node 30 |
| 3 | 16370,30 | 160.670 | 10,19% | AB#2 ke AB#3 Area Node 38 |
| 4 | 16948,10 | 160.670 | 10,55% | AB#3 ke AB#4 Area Node 50 |
| 5 | 16380,80 | 160.670 | 10,20% | AB#4 ke AB#5 Area Node 59 |
| 6 | 16595,40 | 160.670 | 10,33% | AB#5 ke AB#6 Area Node 70 |
| 7 | 16847,40 | 160.670 | 10,49% | AB#6 ke AB#7 Area Node 80 |
| 8 | 16563,80 | 160.670 | 10,31% | AB#7 ke AB#8 Area Node 80 |
| 9 | 16392,50 | 160.670 | 10,20% | AB#8 ke AB#9 Area Node 171 |
| 10 | 16625,00 | 160.670 | 10,35% | AB#9 ke AB#10 Area Node 110 |
| 11 | 16416,70 | 160.670 | 10,22% | AB#10 ke AB#11 Area Node 227 |
| 12 | 18471,20 | 160.670 | 11,50% | AB#11 ke AB#12 Area Node 130 |
| 13 | 29896,20 | 160.670 | 18,61% | AB#12 ke AB#13 Area Node 140 |
| 14 | 17117,90 | 160.670 | 10,65% | AB#13 ke AB#14 Area Node 150 |
| 15 | 17480,10 | 160.670 | 10,88% | AB#14 ke Bifurkasi Area Node 160 |
| 16 | 20855,8 | 160.670 | 12,98% | Bifurkasi Node 160 ke Radius Node 250 di area Node 210 |
| 17 | 16935,2 | 160.670 | 10,54% | Outlet 1 area Node 215 |
| 18 | 16890,9 | 160.670 | 10,51% | Outlet 2 area Node 235 |
| 19 | 16932,1 | 160.670 | 10,54% | Outlet 3 area Node 255 |
| 20 | 21999,7 | 160.670 | 13,69% | Outlet 4 area Node 256 |
| Note : | | | | |
| 160.670 kPa = 160,67 Mpa | | | | |

Dari Tabel 2 diatas tegangan maksimal ada di node 140 pada segmen 13 antara AB#12 sampai AB#13, sebesar 29896,20 kPa atau 18,61% tegangan tersebut masih di bawah dari (*allowable stress*) 160.670 kPa. Tegangan maksimal di node 140 di akibatkan adanya *combination load* pada pipa penstock.

Untuk mengetahui fenomena *displacement* yang terjadi pada penstock, maka dilakukan analisa lebih lanjut terhadap seluruh fasilitas penstock dari *inlet* sampai *outlet*. Hasil dari simulasi *displacement* maksimum ada di node 349-350 seperti terlihat pada pada Gambar 6 di bawah ini.



Gambar 6. Node 130 (AB#12) sampai node 140 (AB#13)

Untuk besarnya nilai *displacement* tiap segmen di penstock berdasarkan pergeseran pipa (*Gap*) dari posisi awal sebelum dilakukan *sustained load* pada Gambar 6 diatas tersaji pada Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Nilai *displacement* pada penstock

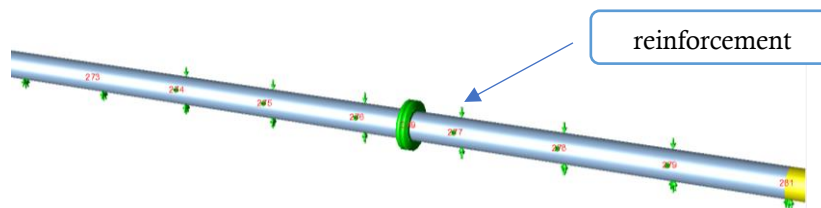
| Segmen | dX (mm) | dY (mm) | dZ (mm) | Remarks |
|--------|---------|---------|---------|-----------------------------------|
| 1 | -0,006 | 0,131 | 0,197 | Inlet ke AB#1 |
| 2 | 0,035 | 0,043 | 0,065 | AB#1 ke AB#2 |
| 3 | 0,045 | -0,024 | 0,008 | AB#2 ke AB#3 |
| 4 | 0,044 | -0,020 | 0,016 | AB#3 ke AB#4 |
| 5 | 0,053 | -0,026 | 0,019 | AB#4 ke AB#5 |
| 6 | 0,053 | -0,026 | 0,020 | AB#5 ke AB#6 |
| 7 | 0,044 | -0,027 | 0,014 | AB#6 ke AB#7 |
| 8 | 0,055 | -0,033 | 0,017 | AB#7 ke AB#8 |
| 9 | 0,043 | -0,027 | 0,015 | AB#8 ke AB#9 |
| 10 | 0,046 | -0,024 | 0,016 | AB#9 ke AB#10 |
| 11 | 0,049 | -0,026 | 0,022 | AB#10 ke AB#11 |
| 12 | 0,049 | -0,024 | 0,023 | AB#11 ke AB#12 |
| 13 | -12,702 | 16,418 | 32,835 | AB#12 ke AB#13 |
| 14 | 0,074 | -0,013 | 0,074 | AB#13 ke AB#14 |
| 15 | 0,710 | -0,048 | -0,086 | AB#14 ke Bifurkasi |
| 16 | 0,004 | 0,000 | 0,042 | Bifurkasi Node 160 ke Node 240 |
| 17 | 0,109 | -0,024 | 0,167 | Outlet 1 area Node 160 - Node 270 |
| 18 | 0,109 | -0,025 | 0,167 | Outlet 2 area Node 304 - Node 280 |
| 19 | 0,109 | -0,024 | 0,167 | Outlet 3 area Node 220 - Node 290 |
| 20 | 0,000 | -0,226 | -0,790 | Outlet 4 area Node 250 - Node 260 |

Dari Tabel 3 di atas *displacement* maksimum ada di segmen 13 area AB#12 sampai AB#13. Arah sumbu X sebesar -12,702 mm, arah sumbu Y sebesar 16,418 mm, arah sumbu Z sebesar 32,835 mm. *Displacement* maksimum yang terjadi akibat adanya *combination load* (*dead load, live load, water hammer, seismic and wind load*) yang tidak mampu ditopang oleh *support* penstock di area tersebut. Sehingga di area tersebut perlu dilakukan optimasi desain. Adapun besarnya gaya di tiap *saddle support* (SS) di segmen 13 area AB#12 sampai AB#13 dapat dilihat pada Tabel 4 dibawah ini.

Tabel 4. Besarnya gaya di AB#12-AB13

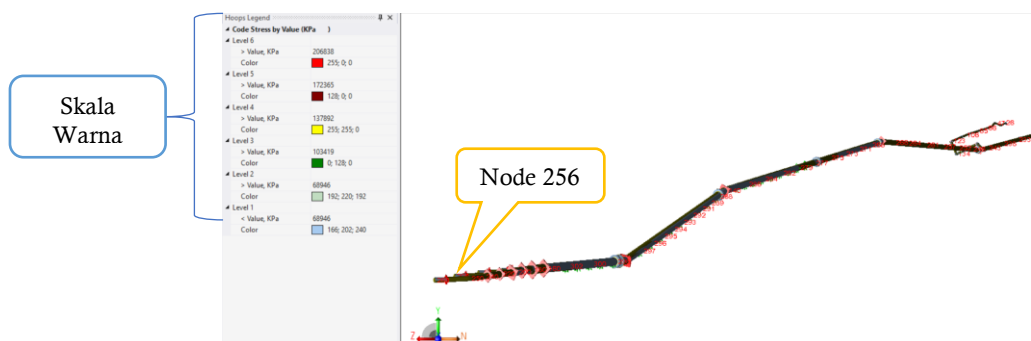
| Area | Node | FX N. | FY N. | FZ N. | Resultant Force N. |
|-----------------------|------|-------|--------|-------|--------------------|
| ANCHOR BLOCK 12 (A12) | 130 | 5784 | 106767 | 53031 | 119352 |
| SS209 | 267 | 0 | -41205 | 20602 | 46069 |
| SS210 | 268 | 0 | -37822 | 18911 | 42286 |
| SS211 | 269 | 0 | -38635 | 19318 | 43196 |
| SS212 | 271 | 0 | -38508 | 19254 | 43053 |
| SS213 | 272 | 0 | -38526 | 19263 | 43073 |
| SS214 | 273 | 0 | -38540 | 19270 | 43089 |
| SS215 | 274 | 0 | -38421 | 19211 | 42956 |
| SS216 | 275 | 0 | -39176 | 19588 | 43801 |
| SS217 | 276 | 0 | -37553 | 18777 | 41986 |
| SS218 | 277 | 0 | -40507 | 20254 | 45288 |
| SS219 | 278 | 0 | -37920 | 18960 | 42395 |
| SS220 | 279 | 0 | -38618 | 19309 | 43177 |
| SS221 | 281 | 0 | -38520 | 19260 | 43067 |
| SS222 | 282 | 0 | -38461 | 19231 | 43001 |
| SS223 | 283 | 0 | -38942 | 19471 | 43539 |
| SS224 | 284 | 0 | -37017 | 18508 | 41386 |
| SS225 | 285 | 0 | -23166 | 11583 | 25900 |
| SS225a | 286 | 0 | -59366 | 29683 | 66374 |
| SS225b | 287 | 0 | -2271 | 908 | 2445 |
| ANCHOR BLOCK 13 (A13) | 140 | 90907 | 125319 | 94090 | 181168 |

Berdasarkan hasil analisa tegangan dan analisa *displacement* diatas pada penstock segmen 13 masih sangat besar, sehingga di perlukan optimasi untuk mengurangi tegangan dan *displacement* yang terjadi. Berikut di bawah ini adalah gambar penstock dengan *reinforcement* untuk optimasi desain.



Gambar 7. Penstock dengan *reinforcement*

Pada Gambar 8 di bawah ini adalah *overview* hasil analisa tegangan setelah di lakukan optimasi dengan tambahan *reinforcement* di segmen 13 antara AB#12 - AB#13.



Gambar 8. Hasil simulasi tegangan *after reinforcement*

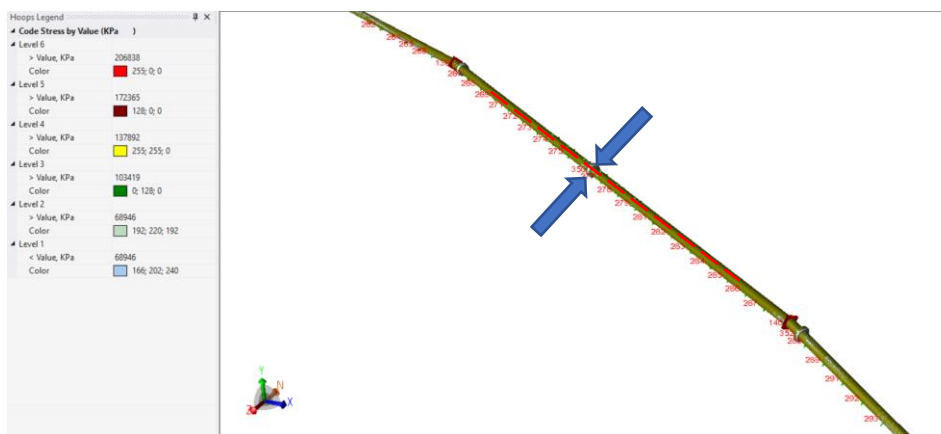
Untuk besarnya tegangan berdasarkan skala warna pada Gambar 8 diatas, setelah dilakukan optimasi desain dengan tambahan *reinforcement* dapat di lihat pada Tabel 5 di bawah ini.

Tabel 5. Analisa tegangan after reinforcement

| B31.3 STRESSES REPORT: Stresses on Elements | | | | |
|---|-------------------|------------------------|-------------|--|
| CASE 7 (SUS) W+T1+P1+U3+WIN2 | | | | |
| Segmen | Code Stress (kPa) | Allowable Stress (kPa) | Percent (%) | Remarks |
| 1 | 17548,80 | 160.670 | 10,92% | Inlet ke AB#1 Area Node 10 |
| 2 | 17166,70 | 160.670 | 10,68% | AB#1 ke AB#2 Area Node 30 |
| 3 | 16370,30 | 160.670 | 10,19% | AB#2 ke AB#3 Area Node 38 |
| 4 | 16948,10 | 160.670 | 10,55% | AB#3 ke AB#4 Area Node 50 |
| 5 | 16380,80 | 160.670 | 10,20% | AB#4 ke AB#5 Area Node 59 |
| 6 | 16595,40 | 160.670 | 10,33% | AB#5 ke AB#6 Area Node 70 |
| 7 | 16847,40 | 160.670 | 10,49% | AB#6 ke AB#7 Area Node 80 |
| 8 | 16563,80 | 160.670 | 10,31% | AB#7 ke AB#8 Area Node 80 |
| 9 | 16392,50 | 160.670 | 10,20% | AB#8 ke AB#9 Area Node 171 |
| 10 | 16625,00 | 160.670 | 10,35% | AB#9 ke AB#10 Area Node 110 |
| 11 | 16416,70 | 160.670 | 10,22% | AB#10 ke AB#11 Area Node 227 |
| 12 | 18471,10 | 160.670 | 11,50% | AB#11 ke AB#12 Area Node 130 |
| 13 | 18469,70 | 160.670 | 11,50% | AB#12 ke AB#13 Area Node 140 |
| 14 | 17117,90 | 160.670 | 10,65% | AB#13 ke AB#14 Area Node 150 |
| 15 | 17480,10 | 160.670 | 10,88% | AB#14 ke Bifurkasi Area Node 160 |
| 16 | 20855,8 | 160.670 | 12,98% | Bifurkasi Node 160 ke Radius Node 250 di area Node 210 |
| 17 | 16935,2 | 160.670 | 10,54% | Outlet 1 area Node 215 |
| 18 | 16890,9 | 160.670 | 10,51% | Outlet 2 area Node 235 |
| 19 | 16932,1 | 160.670 | 10,54% | Outlet 3 area Node 255 |
| 20 | 21999,7 | 160.670 | 13,69% | Outlet 4 area Node 256 |

Note :
160.670 kPa = 160,67 Mpa

Dari Tabel 5 diatas tegangan maksimal ada di node 256 di radius penstock outlet 4 pada segmen 20 sebesar 21.999,7 kPa atau 13,69%, tegangan tersebut masih di bawah dari (*allowable stress*) 160.670 kPa. Tegangan maksimal di node 256 diakibatkan oleh tegangan terdistribusi dari tegangan keseluruhan pada penstock, yang semula ada di node 140 tetapi karena sudah di optimasi di area tersebut sehingga tegangan berpindah ke node 256. Untuk *displacement* yang terjadi setelah dilakukan optimasi dapat terlihat pada Gambar 9 di bawah ini. Bentuk *displacement* di segmen 13 antara AB#12 sampai AB#13, pergeseran pipanya (*Gap*) lebih kecil jika dibandingkan dengan sebelum dilakukan *reinforcement* pada Gambar 6 yang *Gap*-nya cukup besar.



Gambar 9. Bentuk displacement segmen 13 setelah reinforcement

Sedangkan untuk besarnya nilai *displacement* tiap segmen setelah optimasi desain tersaji pada Tabel 6 di bawah ini.

Tabel 6. Analisa tegangan after reinforcement

| Segmen | dX (mm) | dY (mm) | dZ (mm) | Remarks |
|--------|---------|---------|---------|-----------------------------------|
| 1 | -0,060 | 0,088 | 0,167 | Inlet ke AB#1 |
| 2 | 0,035 | 0,043 | 0,065 | AB#1 ke AB#2 |
| 3 | 0,045 | -0,024 | 0,020 | AB#2 ke AB#3 |
| 4 | 0,044 | -0,020 | 0,016 | AB#3 ke AB#4 |
| 5 | 0,053 | -0,026 | 0,019 | AB#4 ke AB#5 |
| 6 | 0,053 | -0,026 | 0,020 | AB#5 ke AB#6 |
| 7 | 0,044 | -0,027 | 0,014 | AB#6 ke AB#7 |
| 8 | 0,055 | -0,033 | 0,016 | AB#7 ke AB#8 |
| 9 | 0,043 | -0,027 | 0,015 | AB#8 ke AB#9 |
| 10 | 0,046 | -0,024 | 0,012 | AB#9 ke AB#10 |
| 11 | 0,049 | -0,026 | 0,022 | AB#10 ke AB#11 |
| 12 | 0,049 | -0,024 | 0,023 | AB#11 ke AB#12 |
| 13 | -0,385 | 0,499 | 0,998 | AB#12 ke AB#13 |
| 14 | 0,074 | -0,013 | 0,074 | AB#13 ke AB#14 |
| 15 | 0,047 | -0,016 | -0,048 | AB#14 ke Bifurkasi |
| 16 | 0,130 | -0,048 | -0,086 | Bifurkasi Node 160 ke Node 240 |
| 17 | 0,109 | -0,024 | 0,167 | Outlet 1 area Node 160 - Node 270 |
| 18 | 0,109 | -0,025 | 0,167 | Outlet 2 area Node 304 - Node 280 |
| 19 | 0,109 | -0,024 | 0,167 | Outlet 3 area Node 220 - Node 290 |
| 20 | 0,710 | -0,226 | -0,790 | Outlet 4 area Node 250 - Node 260 |

Dari Tabel 6 diatas nilai *displacement* maksimum ada di segmen 13 (area AB#12 sampai AB#13) yang dipengaruhi oleh bentang segmen penstock yang cukup panjang dari AB#12 ke AB#13 dan segmen 20 (outlet 4 area node 250 – node 260) dipengaruhi oleh posisi terujung dari penstock sehingga ada beban terpusat di area tersebut dan adanya penyempitan penampang pipa dan adanya belokan, sehingga ketika ada tegangan di belokan tersebut ada ekspansi untuk mengakomodir tegangan yang terjadi. Tetapi nilai *displacement* di kedua area tersebut masih di bawah 1 mm.

KESIMPULAN

Dengan tekanan inlet penstock sebesar 53.880,99 Pa dan kecepatan air 10,40 m/s. Setelah di kaji lebih lanjut terhadap keseluruhan tegangan yang terjadi pada penstock dari *inlet* sampai *outlet* dengan *sustained load* (*dead load, live load, water hammer, seismic and wind*) tegangan maksimum ada di Node 140 (AB#13) sebesar 29.896,15 kPa (29.896.150 Pa) atau 18,61% di bawah dari (*allowable stress*) 160.670 kPa. *Displacement* maksimum ada di segmen 13 area AB#12 sampai AB#13 node 349-350. Arah sumbu X sebesar -12,702 mm, arah sumbu Y sebesar 16,418 mm, arah sumbu Z sebesar 32,835 mm. Setelah dilakukan optimasi desain *displacement* yang terjadi dibawah 1 mm. Faktor yang mempengaruhi tegangan dan *displacement* yang terjadi pada penstock adalah bentuk pembebanan yang terjadi, bentang segmen pipa dan support, serta bentuk profil dari penampang penstocknya.

Daftar Pustaka

- Anakiya, A., Prajapati, H., & Prajapati, S. (2014). Analysis of the Penstock for Pit Turbine Using Computational Fluid Dynamics. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 11(3), 36-42.
- Bernard, D. 2013. Numeric modelling of water hammer effect in penstock. *Masters thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Ottawa*. Diakses dari <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.962.5724&rep=rep1&type=pdf>

- Bondar, P.L., & Myrsten, F. 2021. *Efficiency analysis of a wave energy converter penstock*. Diakses dari <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1620442/FULLTEXT01.pdf>
- Hidayawanti, R. (2017). Efisiensi Penggantian Pipa Penstock PLTA Siman dengan Metode Welded Lap Joint. *Jurnal Forum Mekanika*, 6(1), 33-40.
- Ma'ali, N. 2017. Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Kepung Kabupaten Kediri. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pathak, S., & Darlami, K. 2016. Flow and stress analysis of aged penstock of sundarijal hydropower plant (SJHPP). Proceedings of 8th IOE Graduate Conference, pp. 2350-8914. Diakses dari <http://conference.ioe.edu.np/ioegc8/papers/ioegc-8-013-80016.pdf>
- Peraturan Presiden Republik Indonesia. 2022. Percepatan pengembangan energi terbarukan untuk penyediaan tenaga listrik. Jakarta: Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia.
- Pratama, A.D., Hidayah, E., & Wiyono, R.U.A. 2021. Penentuan Desain Optimum Penstock untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Sungai Poreng, Jember. *Jurnal Teknik Pengairan*, 12(1), 71 - 80.
- Thapa, D., Luintel, M.C., & Bajracharya, T.R. 2016. Flow analysis and structural design of penstock bifurcation of kulekhani III HEP. Proceedings of IOE Graduate Conference, pp. 271-276. Diakses dari <https://www.researchgate.net/publication/333448770>
- Singhal, M.K., & Kumar, A. (2015). Optimum Design of Penstock for Hydro Projects. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 4(4), 216-226.
- Widiana, I.N., Giriantari, I.A.D., & Setiawan, I.N. 2020. Perancangan Penstock (Pipa Pekat) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Banjar Dinas Mekarsari, Desa Panji, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 19(2), 235 - 240.