

ANALISIS TRANSIEN PENSTOK: PENGARUH WAKTU PENUTUPAN

Haryadi Mumin
Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung
E-mail: haryadi1214@yahoo.com

Abstract

Hydroelectricity is eligible energy resource to be developed in the future because of a variety of advantages. Hydropower potential on a river in North Sulawesi has been known for a long time. With rising electricity demand today, the potential energy of the water will soon be realized into hydropower. Existing site conditions do not allow for the use of surge tanks as dampening device for water hammer effects. This research will perform transient and water hammer analysis as basic of the penstock design and turbine selection. Water hammer transient analysis was carried out with varying the main valve closure time from 5 s, to 120 s. It can be concluded that the sharp decrease water hammer effect on the main valve closure time will end when the closure time was 30 s. After that, decrease water hammer parameters were no longer significant.

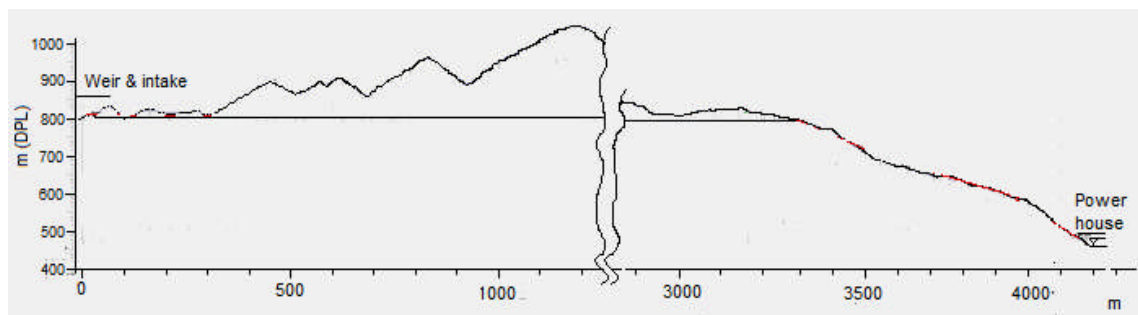
Keyword : transien, penstok, water hammer, waktu penutupan.

Pendahuluan

Energi air adalah energi yang layak untuk dikembangkan pada masa yang akan datang. Beberapa keunggulan dari pembangkit listrik tenaga air di antaranya adalah: bersifat terbarukan, respon pembangkit listrik yang cepat dalam menyesuaikan perubahan beban sehingga sering digunakan untuk memenuhi beban puncak, umur yang relatif panjang, serta bisa dikatakan bebas emisi karbon, yang tentu saja merupakan kontribusi berharga bagi lingkungan. Akan tetapi

PLTA juga memiliki kekurangan, seperti: mengganggu keseimbangan ekosistem, biaya investasi yang tinggi, serta seringkali dampak sosial yang dikibatkan cukup besar.

Meskipun PLTA mempunyai berbagai kelebihan, tetapi kontribusi energi air dalam bauran energi (*Energy Mix*) nasional relatif kecil. Dalam *Outlook Energi Indonesia 2014*, Energi air dimasukkan dalam EBT. Peran EBT ini dalam bauran energi pada tahun 2013 sebesar 8%, dibutuhkan upaya meningkatkan pangsa



Gambar 1 Long section jalur head race dan penstock PLTA

EBT sebesar 10% untuk mencapai target pada tahun 2015. Dalam Skenario BaU (*Business as Usual*), total produksi listrik diproyeksikan meningkat mencapai 536 TWh pada tahun 2025, dan mencapai 2.162 TWh ditahun 2050 (rata-rata sebesar 6,5% pertahun) yang didominasi oleh pembangkit batubara (68%), dan EBT sebesar 10,4%.[1]

Skenario KEN (Kebijakan Energi Nasional), produksi listrik diproyeksikan tetap meningkat dengan laju yang lebih lambat dibandingkan skenario BaU (*Business as Usual*) rata-rata sebesar 5,4% per tahun selama periode proyeksi, dimana pembangkit listrik EBT (40%) menggantikan dominasi pembangkit batubara setelah tahun 2035. Skenario KEN mengacu pada Rancangan KEN, di dalamnya ada upaya untuk lebih meningkatkan pengembangan EBT, termasuk di dalamnya PLTA[1].

Potensi energi hidro sebuah sungai di Sulawesi Utara telah ditemukan sejak dahulu. Dalam upaya memenuhi kebutuhan daya listrik dan meningkatkan pangsa EBT, potensi tersebut akan direalisasikan menjadi PLTA dalam waktu dekat ini. Lokasi Gedung PLTA cukup sulit ditempuh, karena kondisi profil permukaan tanah yang berbukit terjal dan merupakan kawasan hutan primer. Profil permukaan tanah mulai dari bangunan intake sampai *power house* diperlihatkan pada Gambar 1. Pada gambar tersebut terlihat bahwa pada jarak sekitar 2900 – 3300 m dari bendungan, tidak terdapat bukit yang bisa digunakan untuk menginstalasi *surge tank*. Dari studi yang telah dilakukan, diketahui bahwa ketinggian permukaan air danau adalah 803 m DPL, sedangkan tinggi permukaan *tail race* adalah 443 m DPL. Debit desain adalah 10 m³/s. Sedangkan diameter dan panjang penstok, masing-masing adalah 2 m dan 920 m.

Paper ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu penutupan (*closure time*) katup utama (*main valve*) terhadap tekanan maksimum dan osilasi head, untuk selanjutnya digunakan untuk desain penstok, pemilihan katup utama dan turbin.

Tinjauan Pustaka

Bila aliran fluida kompresibel mengalir pada pipa kemudian secara tiba-tiba katup yang berada di ujung pipa ditutup, maka akan terjadi kenaikan tekanan pada fluida di dekat katup. Kondisi debit nol dan tekanan yang telah meningkat ini terjadi sepanjang pipa sesaat. Selanjutnya kenaikan tekanan ini akan bergerak dengan kecepatan a

dalam arah yang berlawanan dengan arah aliran, yang akhirnya sampai di ujung inlet. Kondisi pada ujung inlet juga tidak ekuilibrium, karena tekanan pada ujung pipa ini lebih rendah, sehingga mengakibatkan gelombang tekanan baru yang searah dengan arah aliran. Hal ini akan terjadi berulang-ulang. Hubungan antara kecepatan aliran, head, dan berbagai variabel lain dinyatakan dalam persamaan momentum dan persamaan kontinuitas berikut ini [2]:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} + \frac{V\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2 \partial V}{g \partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Persamaan di atas disederhanakan dengan membandingkan besaran yang kurang signifikan ($\Delta V/\Delta t$) dan $(g\Delta H/\Delta x) > (V\Delta V/\Delta x)$, serta $(\Delta H/\Delta t)$ dan $((a^2 \Delta V)/\Delta x) \gg (V\Delta H/\Delta x)$, sehingga menjadi [2, 3]:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{a^2 \partial V}{g \partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

Persamaan 4 dikalikan dengan konstanta λ , dan ditambahkan ke persamaan 3, diperoleh [2, 3]:

$$\lambda \left(\frac{g \partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \left(\frac{\lambda a^2 \partial V}{g \partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Dari definisi total derivatif diperoleh:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Dengan melihat persamaan di atas maka diperoleh:

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad \frac{dx}{dt} = \pm a \quad \dots\dots\dots (8)$$

Karena persamaan 5 merupakan kombinasi linier dari dua persamaan independen, maka dua harga riil λ , akan menghasilkan dua persamaan independen.

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dx} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dx} - \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

Persamaan 9 dan 10 di atas diselesaikan dengan metoda finite difference. Pipa sepanjang L dibagi menjadi N bagian dengan panjang setiap Δx , dengan $\Delta t = \Delta x/a$. Untuk mengetahui debit dan head pada titik ke i pada penstock pada saat Δt setelah katup dibuka, diperlukan informasi mengenai head dan debit pada $t = 0$ pada titik ke i-1 dan titik i+1. Demikian selanjutnya hingga semua titik pada $t = \Delta t$ dapat diketahui. Selanjutnya bila semua titik pada $t = \Delta t$ dapat diketahui maka kondisi head dan debit pada $t = 2\Delta t$ dapat dihitung. Persamaan finite difference yang dimaksud adalah [2, 3]:

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \dots\dots\dots (11)$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \dots\dots\dots (12)$$

$$H_{Pi} = (C_P + C_M)/2 \dots\dots\dots (13)$$

Dimana:

$$B = a/(gA)$$

$$R = f\Delta x/(2gDA^2)$$

Syarat batas mewakili kondisi aktual sistem pada ujung-ujung pipa. Sesuai kondisi batas yang ada, maka ujung atas berupa reservoir, sedangkan ujung bawah adalah katup. Pada kondisi reservoir, maka permukaan reservoir cukup luas sehingga fluktuasi debit dianggap tidak mempengaruhi tinggi permukaannya. Dengan demikian head pada sisi atas diasumsikan konstan. Untuk syarat batas katup utama (*main valve*), jika katup berada pada elevasi garis datum, maka persamaan untuk debit aliran yang melewati orifis adalah [3]:

$$Q_P = C_d A_G \sqrt{2g\Delta H} \dots\dots\dots (14)$$

Dimana ΔH adalah kondisi head sesaat. Selanjutnya koefisien bukaan katup tak berdimensi dan debit air yang melewati katup dinyatakan oleh persamaan berikut [3]:

$$\tau = \frac{C_d A_G}{(C_d A_G)_0} \dots\dots\dots (15)$$

$$Q_P = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}} \tau \sqrt{\Delta H} \dots\dots\dots (16)$$

Jenis katup menentukan fungsi τ terhadap waktu. Dalam studi ini fungsi τ terhadap waktu dinyatakan dalam persamaan berikut ini [3]:

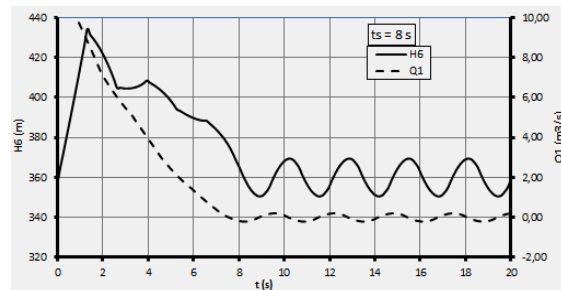
$$\tau = (1 - t/t_c)^{E_m} \dots\dots\dots (17)$$

Selanjutnya, dari berbagai perhitungan desain yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, penggunaan *surge tank* memang akan dapat menurunkan efek *water hammer* terhadap tekanan maksimum yang terjadi pada ujung penstock, amplitudo osilasi head dan debit [4, 5, 6]. Untuk meredam osilasi dapat ditambahkan orifis pada mulut *surge tank*, maupun berbagai berbagai alat peredam lain [7].

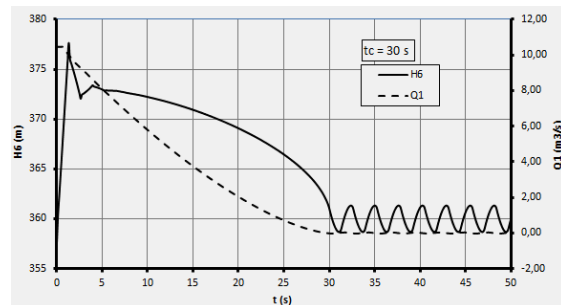
Hasil dan Pembahasan

Simulasi dilakukan untuk berbagai waktu (durasi) penutupan katup (*closure time*). Waktu penutupan ini berkaitan dengan pemilihan turbin. Kombinasi head dan debit yang ada memungkinkan untuk menggunakan turbin Francis, maupun turbin Pelton. Turbin Francis mempunyai kelebihan dalam hal efisiensi maksimum yang lebih tinggi, tetapi mempunyai kekurangan dengan waktu penutupan yang lebih singkat dan efisiensi *off design* yang lebih rendah. Sedangkan turbin Pelton mempunyai efisiensi maksimum yang sedikit lebih kecil, akan tetapi memiliki efisiensi *off design* yang lebih merata, dan waktu penutupan yang lebih lama.

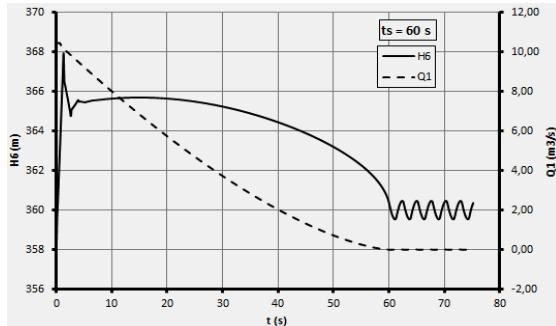
Simulasi dilakukan pada beberapa waktu penutupan (t_s), yaitu 5, 8, 30, 60 dan 120 s. Sebagian hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 2, 3, dan 4 berikut ini.



Gambar 2 Hasil simulasi untuk $t_s = 8$ s



Gambar 3 Hasil simulasi untuk $t_s = 30$ s



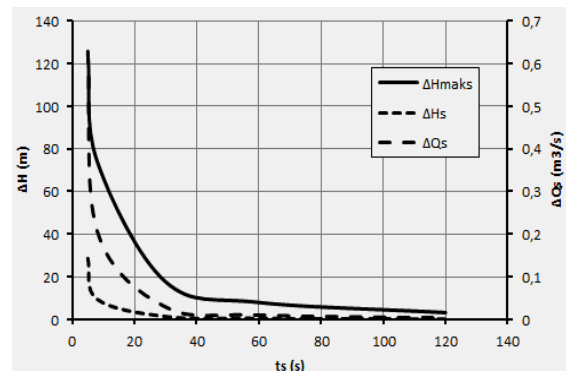
Gambar 4 Hasil simulasi untuk $t_s = 60$ s

Pada Gambar 3 terlihat bahwa untuk waktu penutupan sebesar 8 s, head statik pada ujung pipa penstock atau yang diterima oleh main valve mencapai 434,3 m (kenaikan head 74 m), setelah katup tertutup sempurna, head masih akan beresilasi dengan rentang antara 350,5 m sampai 369,5 m (simpangan 9,5 m), dan hanya sedikit berkurang rentangnya setelah beberapa kali osilasi. Pada gambar tersebut juga terlihat bahwa setelah katup tertutup sempurna, debit air pada penstock akan beresilasi dengan amplitudo sekitar 0,208 m³/s. Variasi debit ini juga akan sedikit berkurang setelah beberapa kali osilasi. Pengurangan simpangan osilasi head dan debit ini terjadi akibat adanya gesekan air dengan dinding pipa penstock.

Fenomena yang sama juga terjadi pada kedua waktu penutupan 30 s dan 60 s. Hanya saja pada kedua kasus ini, efek water hammer jauh berkurang, yang ditandai dengan berkurangnya parameter-parameter di atas. Pada waktu penutupan 30 s, head statik maksimum pada ujung pipa penstock berkurang menjadi 377,6 m (kenaikan head 17,6 m), rentang osilasi head menjadi antara 361,3 m sampai 358,7 m (amplitudo 1,3 m), dan debit air pada penstock akan beresilasi dengan amplitudo sekitar ±0,029 m³/s. Pada waktu penutupan 60 s, head statik maksimum pada ujung pipa penstock berkurang menjadi 367,9 m, rentang osilasi head menjadi antara 360,5 m sampai 359,5 m (amplitudo 0,5 m), dan debit air pada penstock akan beresilasi dengan amplitudo sekitar 0,010 m³/s.

Gambar 5 menunjukkan variasi ketiga parameter *water hammer* terhadap waktu penutupan katup, mulai dari 5 s sampai 120 s, dimana ΔH_{maks} adalah kenaikan head maksimum yang terjadi pada penstock akibat water hammer, ΔH_s adalah simpangan maksimum osilasi head setelah katup tertutup sempurna, dan ΔQ_s adalah simpangan

maksimum osilasi debit setelah katup tertutup sempurna. Dari gambar tersebut terlihat bahwa penurunan tajam ketiga parameter *water hammer* akan berakhir saat t_s mencapai sekitar 30 s. Setelah itu penurunan parameter *water hammer* tidak lagi signifikan. Hal ini bisa dijadikan dasar untuk desain penstock dan memilih turbin yang akan digunakan.



Gambar 5 Variasi parameter water hammer terhadap waktu penutupan

Pada waktu penutupan katup sebesar 30 s, kenaikan head maksimum yang terjadi pada penstock akibat *water hammer* (ΔH_{maks}) sebesar 17,6 m, amplitudo maksimum osilasi head setelah katup

tertutup sempurna (ΔH_s) sebesar 1,3 m, dan amplitudo maksimum osilasi debit setelah katup tertutup sempurna (ΔQ_s) sebesar 0,029 m³/s.

Kesimpulan dan Saran

Dari pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa penurunan tajam efek *water hammer* terhadap waktu penutupan katup utama akan berakhir, ketika waktu penutupan mencapai 30 s. Setelah itu penurunan parameter *water hammer* tidak lagi signifikan. Hal ini bisa dijadikan dasar untuk desain penstock, serta memilih turbin dan katup yang akan digunakan.

Nomenklatur:

- A : Luas penampang pipa, (m²)
- A_G : Luas penampang katup, (m²)
- a : Kecepatan suara di air, (m/s)
- B : Impedansi karakteristik pipa, (-)
- C_d : Koefisien discharge katup, (-)
- D : Diameter pipa, (m)
- f : Koefisien gesek Darcy Weisbach, (-)
- g : Percepatan gravitasi, (m/s²)
- H : Head piezometrik di dalam pipa, (m)
- i : indeks, (-)
- L : Panjang pipa (m)
- N : Jumlah nod/ pembagian pipa
- P : Tekanan, (N/m²)

Q : Debit, (m³/s)
 R : Koefisien hambatan (-)
 t : waktu, (s)
 V : Kecepatan, (m/s)
 x : Jarak dalam arah pipa, (m)
 λ : konstanta, (-)
 ρ : Massa jenis, (kg/m³)
 τ : Koefisien pembukaan katup, (-)

Daftar Pustaka

- [1] Dewan Energi Nasional. (2014). *Outlook Energi Indonesia 2014*. Jakarta: Kementerian ESDM
- [2] Tullis, J. Paul. (1989). *Hydraulic of Pipelines: Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. New York : John Wiley & Sons Inc.
- [3] Wylie, E. Benjamin & Streeter, Victor L. (1978). *Fluid Transients*. New York: McGraw-Hill International Book Company.
- [4] Ramadan, Abdulghani & Mustafa, Hatem. (2013). University Bulletin: *Surge Tank Design Considerations for Controlling Water Hammer Effects at Hydro-electric Power Plants*. ISSUE - 147 - No.15 – Vol . 3
- [5] Karadžić, U. Bergant, A. Vukoslavčević, P. (2010). IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems 25th: *Water hammer caused by closure of turbine safety spherical valves*.
- [6] Iliev, Viktor. Popovski, Predrag. Markov, Zoran. (2012). International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA): *Transient Phenomena Analysis in Hydroelectric Power Plants at Off-Design Operating Conditions*, Vol. 2, Issue 6, pp.1480-1488
- [7] Zaruba, Josef. (1993). *Water hammer in pipeline systems*. Amsterdam: Elsevier,.