

PENGARUH BUKAAN SUDU PENGARAH TERHADAP TINGKAT KAVITASI DI SISI MASUK PIPA ISAP TURBIN FRANCIS VERTIKAL

Fernando P. Gurning¹, A.Halim Nasution², Syahril Gultom³, Zulkifli Lubis⁴, Farida Ariani⁵
^{1,2,3,4,5}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara
E-mail : fernando_gurning@ymail.com

ABSTRAK

Kavitasi yaitu proses terbentuknya gelembung-gelembung air pada turbin karena tekanan air pada turbin turun menjadi tekanan uap jenuh yang menyebabkan getaran, pengikisan, dan penurunan efisiensi. Fenomena kavitasi tersebut dapat diprediksi dan dihindari dengan menghitung besar tingkat kavitasi turbin yang berasal dari hasil perbandingan nilai angka *Thoma* aktual dan kritis. Tingkat kavitasi yang diteliti yaitu pada Sisi Masuk Pipa Isap (*Draft Tube*) di Turbin Francis Vertikal Unit 3 PLTA Siguragura P.T. Inalum (Persero). Tingkat kavitasi sebagai variabel terikat diteliti pengaruhnya dengan bukaan sudu pengarah (*Guide Vane Opening/GVO*) sebagai variabel bebas pada penelitian ini. Besar GVO yang dipakai dalam penelitian ini ada sembilan variasi yaitu sebesar 19,5 mm; 78 mm; 102 mm; 129,5 mm; 136 mm; 143 mm; 150 mm; 160,5 mm; dan 195 mm. Berdasarkan penelitian ini diperoleh nilai tingkat kavitasi pada setiap GVO. Tingkat kavitasi diperoleh melalui 2 metode yaitu metode perhitungan dan simulasi. Berdasarkan metode perhitungan diperoleh tingkat kavitasi terbesar pada penelitian ini yaitu sebesar 0,9743 pada GVO sebesar 195 mm, tingkat kavitasi terkecil yaitu sebesar 0,8099 pada GVO sebesar 102 mm; sedangkan pada metode simulasi diperoleh tingkat kavitasi terbesar yaitu sebesar 0,9734 pada GVO 195 mm dan tingkat kavitasi terkecilnya yaitu sebesar 0,8090 pada GVO 102 mm. Sisi masuk pipa isap tersebut mengalami kavitasi apabila tingkat kavitasi melebihi nilai 1 atau nilai angka *Thoma* aktual lebih besar dari nilai angka *Thoma* kritis. Kavitasi tidak terjadi pada sisi masuk pipa isap apabila tingkat kavitasi kurang dari nilai 1 atau nilai angka *Thoma* aktual lebih kecil dari nilai angka *Thoma* kritis. Jadi, besar GVO yang terbaik untuk menghindari kavitasi di Sisi Masuk Pipa Isap Turbin Francis Vertikal Unit 3 PLTA Siguragura, yaitu sebesar 102 mm karena memiliki tingkat kavitasi terkecil; sedangkan besar GVO yang dihindari dan paling rentan terkena kavitasi yaitu sebesar 195 mm karena memiliki tingkat kavitasi terbesar.

Kata kunci: Sudu Pengarah, Kavitasi, Pipa Isap, Angka Thoma, Turbin Francis

1. PENDAHULUAN

Energi air adalah energi yang diperoleh dari air yang mengalir dan dapat dimanfaatkan secara maksimal dengan menggunakan turbin air. Turbin air adalah mesin penggerak mula yang mengubah energi potensial dan kinetik yang berasal dari aliran air menjadi energi mekanik yang menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik.

Adapun turbin dibagi menjadi dua berdasarkan aksi air pada sudu turbin yaitu turbin impuls dan turbin reaksi. Turbin impuls contohnya yaitu turbin Pelton dan turbin *Cross Flow*, sedangkan turbin reaksi contohnya turbin Francis, Turbin Kaplan dan *propeller*. Pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai turbin Francis, khususnya mengenai permasalahan kavitasi yang sering terjadi pada saat beroperasi. Kavitasi yaitu gelembung-gelembung air yang terbentuk akibat penurunan tekanan fluida di turbin yang menyebabkan pengikisan, suara, dan getaran, serta menurunkan efisiensi turbin. Fenomena kavitasi tersebut dapat diprediksi dan dihindari dengan menghitung angka *Thoma* (σ) aktual dan kritis agar tidak melewati nilai aktualnya tidak melewati kritisnya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Kerugian Head Mayor (Persamaan Hazen–Williams)

Persamaan ini dikenalkan oleh *Gardner Williams* dan *Allan Hazen* pada tahun 1902. Persamaan ini sebagai pengembangan dari persamaan *Chezy*. Rumus ini pada umumnya dipakai untuk menghitung kerugian *head* dalam pipa yang relatif sangat panjang seperti jalur pipa penyalur air minum. Persamaan ini lebih mudah digunakan untuk menghitung kerugian pipa secara manual pada sistem yang terdiri dari bermacam-macam pipa dibandingkan dengan menggunakan persamaan *Darcy-Weisbach*. Persamaan ini digunakan hanya untuk aliran turbulen [1].

Bentuk umum persamaan *Hazen – Williams* [1] ditunjukkan pada persamaan (1) berikut ini.

$$h_f = \frac{10,67 Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} L \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- h_f = Kerugian *head* akibat gesekan (m)
- Q = Debit air (m³/s)
- D = Diameter dalam pipa (m)
- L = Panjang pipa (m)
- C = *Resistance Coefficient*

Kerugian Head Minor

Kerugian *head* minor terjadi diawal pipa, belokan pipa, perubahan penampang, dan lain – lain (*fitting*). Kerugian *head* minor [2] dapat dinyatakan dengan persamaan (2) berikut ini.

$$h_m = \sum nK \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- h_m = Kerugian *head minor* (m)
- v = Kecepatan air dalam pipa (m/s)
- $\sum nK$ = Total koefisien kerugian pada *fitting*

Kavitasi pada Turbin Francis

Kavitasi berasal dari kata “*cavus*” yang berarti kosong. Kavitasi adalah suatu peristiwa terjadinya gelembung-gelembung uap di dalam air yang mengalir apabila tekanan di tempat tersebut sama atau di bawah tekanan uap jenuhnya. Air pada kondisi biasa akan mendidih dan menguap pada suhu 100⁰ C di tekanan 1 atm, apabila tekanan berkurang sampai cukup rendah, air pada suhu udara lingkungan yaitu sekitar 20°C-33°C akan mendidih dan menguap. Tempat-tempat bertekanan rendah atau berkecepatan tinggi mudah terjadi kavitasi, terutama pada sisi keluar runner dan bagian masuk pipa isap. Kavitasi akan timbul apabila tekanannya terlalu rendah. Proses terjadinya kavitasi adalah sebagai berikut, air yang mengandung udara atau gelembung-gelembung uap air yang disebabkan oleh adanya kondisi setempat yang tekanannya turun hingga dapat menimbulkan penguapan. Pada tempat yang tekanannya lebih tinggi, maka gelembung-gelembung tersebut akan terkondensasi dan pecah dengan tiba-tiba, hal ini akan mengakibatkan tekanan pada sisi masuk pipa isap atau komponen turbin lainnya. Pecahnya gelembung-gelembung ini akan menghasilkan tekanan yang sangat tinggi. Penurunan tekanan aliran didalam turbin air disebabkan perubahan energi tekanan menjadi energi kecepatan (*Bernoulli*). Makin tinggi kecepatan aliran dan makin

tinggi temperatur airnya, maka makin tinggi pula bahaya dari pembentukan uap dan kavitasi [3].

Faktor Kavitasi

Prof. *Dietrich Thoma* dari *Munich*, Jerman mengemukakan faktor atau tingkat kavitasi (σ /angka *Thoma*) untuk menentukan tekanan dimana turbin dapat bekerja tanpa terkena dampak kavitasi sehingga kavitasi dapat dihindari. Untuk menghindari kavitasi perlu diketahui angka *Thoma* kritis [4]. Adapun nilai angka *Thoma* kritis (σ_c) yaitu sebagai berikut pada persamaan (3):

$$\sigma_c = \frac{p_{atm} - p_v - h_s}{h_{efektif}} \dots\dots\dots(3)$$

dimana:

- σ_c = Angka *Thoma* kritis
- p_{atm} = *Head* tekanan atmosfer (m)
- p_v = *Head* tekanan uap jenuh (m)
- h_s = Jarak vertikal antara sumbu pusat *runner* dan *tail water level* (m)
- h_{eff} = *Head* efektif (m) = *Head* maksimum – Kerugian *head* (*head races* sampai *inlet valve*)

Adapun angka *Thoma* pada saat turbin bekerja disebut angka *Thoma* Aktual [4]. Untuk menghitung nilai aktual dari faktor kavitasi (σ_a) yaitu pada persamaan (4) berikut:

$$\sigma_a = \frac{p_{atm} - p_{min} - h_s}{h_{efektif}} \dots\dots\dots(4)$$

dimana:

- σ_a = Angka *Thoma* aktual
- p_{atm} = *Head* tekanan atmosfer (m)
- p_{min} = *Head* tekanan minimum pada komponen turbin yang diteliti (m)
- H_s = Jarak vertikal antara sumbu pusat *runner* dan *tail water level* (m)
- H_{eff} = *Head* efektif (m) = *Head* maksimum – Kerugian *head* dari *head race* sampai *inlet valve*)

Agar kavitasi tidak terjadi maka *head* tekanan minimum (p_{min}) harus lebih besar daripada *head* tekanan uap jenuh cairan (p_v). Selain itu agar tidak terjadi kavitasi maka nilai σ_a harus lebih kecil daripada nilai σ_c [4]. Dari keadaan tersebut maka dapat diketahui besarnya tingkat kavitasi, yaitu persamaan (5):

$$\text{Tingkat Kavitasi} = \frac{\sigma_a}{\sigma_c} \dots\dots\dots(5)$$

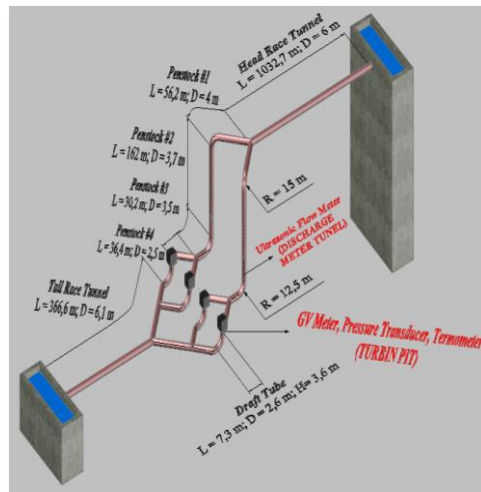
Keterangan: σ_c = *Thoma* kritis
 σ_a = *Thoma* aktual

Dari rumus diatas jika didapatkan nilai lebih dari 1 maka dapat dipastikan dalam turbin tersebut terjadi kavitasi dan sebaliknya, jika didapatkan nilai kurang dari 1 maka pada turbin tersebut tidak terjadi kavitasi [4].

3. METODOLOGI PENELITIAN
Waktu dan Tempat

Penelitian dan pengambilan data dilakukan selama 2 hari pada tanggal 14-15 Juli 2014 di PLTA Siguragura P.T. Inalum (Persero) di Paritohan, Kecamatan Pintu Pohan Meranti, Kabupaten Tobasa, Sumatera Utara.

Instalasi Penelitian



Turbin yang diteliti dalam instalasi penelitian ini adalah Turbin Francis Vertikal Unit-3 PLTA Siguragura. Gambar sederhana tiga dimensi instalasi penelitian pada skripsi ini ditunjukkan pada gambar 1.

Gambar 1. Instalasi Penelitian

Metode Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu:

- Data primer, merupakan data yang diperoleh dari pengujian PLTA Siguragura P.T. Inalum (Persero), seperti: spesifikasi lengkap turbin Francis vertikal (gambar kerja), *head* maksimum, debit air masuk turbin, suhu air, dan tekanan minimum di sisi masuk pipa isap turbin, serta survei lapangan yang dilakukan oleh peneliti.
- Data sekunder, merupakan data yang bersumber dari pustaka-pustaka yang mendukung penelitian.

Metode Pengolahan Data

Metode pengolahan data yang dipakai dalam penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu:

- Metode Analisis Perhitungan
Metode analisis perhitungan ini menggunakan rumus-rumus yang bersumber dari pustaka. Adapun rumus yang dipakai seperti: Persamaan *Hazen-Williams*, rumus *head losses minor*, persamaan kontinuitas, angka *Thoma*, dan tingkat kavitasi. Penghitungan dengan menggunakan rumus-rumus tersebut dilakukan di *Software Microsoft Office Excel 2007* sehingga data hasil perhitungan dapat ditampilkan dalam tabel dan grafik.
- Metode Simulasi
Metode simulasi dilakukan sebagai pembandingan dengan hasil dari metode analisis perhitungan sehingga diperoleh nilai galat. Metode simulasi dalam penelitian ini menggunakan dua software, yaitu *Software Pipe Flow Expert V 5.12* (simulasi kerugian head untuk mendapatkan head efektif) dan *Software ANSYS Workbench*

14.0 (simulasi tekanan minimum dan uap jenuh di sisi masuk pipa isap/*draft tube* untuk mendapatkan tingkat kavitasi).

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dalam skripsi ini dibagi menjadi tiga yaitu:

a. Prosedur Penelitian dengan Metode Analisis Perhitungan

- 1). Diambil data pengujian debit air masuk turbin (Q) di tiap bukaan sudu pengarah (GVO)
- 2). Ditentukan nilai koefisien kekasaran pipa (C) dari tabel *Hazen-Williams*
- 3). Dihitung nilai kerugian *head* mayor (h_f) dengan dimasukkannya nilai Q , C , L (panjang pipa), D (diameter pipa) pada persamaan *Hazen-Williams* di setiap bagian pipa turbin.
- 4). Dihitung kecepatan aliran (v) pipa di setiap bukaan sudu pengarah
- 5). Ditentukan nilai koefisien kekasaran (K) di setiap komponen kelengkapan pipa berdasarkan tabel koefisien kekasaran komponen kelengkapan pipa
- 6). Dihitung nilai kerugian *head* minor (h_m) di tiap komponen kelengkapan pipa dengan dimasukkan nilai K , v , dan g (percepatan gravitasi) ke persamaan kerugian *head* minor
- 7). Dihitung nilai kerugian *head* total (h_L) pada setiap bukaan sudu pengarah
- 8). Dihitung nilai kerugian *head* efektif (h_{efektif}) pada setiap bukaan sudu pengarah
- 9). Diambil data pengujian tekanan minimum (p_{min}) dan jarak vertikal antara *runner* dan *tail water level* (h_s) pada setiap bukaan sudu pengarah
- 10). Ditentukan nilai tekanan uap jenuh air di turbin (p_v) dan tekanan atmosfer (p_{atm}) di permukaan *head race* dan *tail race water level* berdasarkan suhu (T) pada saat pengambilan data.
- 11). Dihitung nilai angka *Thoma* aktual (σ_a) dan kritis (σ_c) dengan dimasukkan nilai p_{atm} , p_{min} , p_v , h_s , h_{efektif} ke rumus angka *Thoma* aktual dan kritis
- 12). Dihitung nilai tingkat kavitasi di setiap bukaan sudu pengarah dengan dibandingkan nilai σ_a terhadap σ_c
- 13). Diperoleh tingkat kavitasi terbesar dan terkecil dari setiap bukaan sudu pengarah yang diuji.

b. Prosedur Penelitian dengan Metode Simulasi (*Software Pipe Flow Expert V 5.12*)

- 1). Dibuka program *Pipe Flow Expert V 5.12*
- 2). Diatur terlebih dahulu satuan (Unit: Metrik)
- 3). Dibuat reservoir (*Head race water level*) dengan perintah *Add Tanks*
- 4). Ditentukan fluida yang mengalir di turbin dengan dimasukkan spesifikasi sifat air yaitu suhu fluida (T), tekanan fluida (p), massa jenis (ρ), tekanan uap jenuh (p_v), *surface pressure* (p_{atm}), *liquid level* (h_{max}), *bottom elevation* (titik acuan)
- 5). Dibuat sistem jaringan pipa (*Head Race Tunnel*, *Penstock #1* sampai *Penstock #4*) dengan perintah *Add Pipes*
- 6). Dimasukkan nilai panjang pipa (*Length*), diameter dalam (*internal diameter*), dan kekasaran pipa (*roughness*) pada tiap pipa
- 7). Dibuat komponen kelengkapan pipa (*Entrance*, *Gate Valve*, *Wye Branch*, *Bending 90°*, *Gradual Contraction*, *Spherical Branch*, *Butterfly Valve*) dengan perintah *Add Fittings*.
- 8). Dimasukkan nilai elevasi tiap pipa (*Elevation of Joint*) dan nilai debit aliran air masuk turbin (*Add Demand*)
- 9). Diklik *calculate* untuk diperoleh kerugian *head* mayor dan kerugian *head* minor

- 10). Dilakukan kembali input data (prosedur nomer 4 dan seterusnya) jika *result log* tidak berhasil
- 11). Dilakukan kembali input data (prosedur nomer 8 dan seterusnya) untuk bukaan sudu pengarah yang lainnya dengan diubahnya nilai debit air masuk turbin.
- 12). Dihitung galatnya antara simulasi dan metode analisis perhitungan

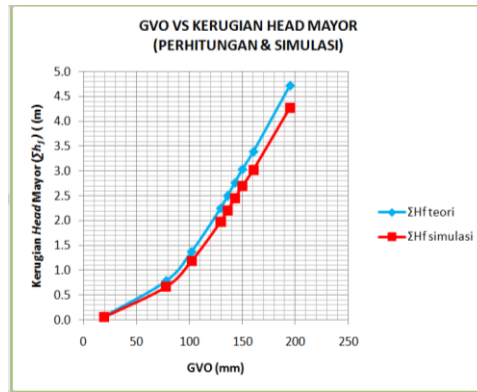
c. Prosedur Penelitian dengan Metode Simulasi (Software ANSYS Workbench 14.0)

- 1). Dibuat terlebih dahulu geometri pipa isap (*Draft Tube*) di Solidworks 2010
- 2). Dilakukan proses import geometri di ANSYS Workbench 14.0 dengan dibukanya file berekstensi STEP File dari Solidwork 2010
- 3). Dilakukan proses *Meshing* secara otomatis dengan perintah *Generate Mesh*
- 4). Dilakukan proses *SETUP* dengan diaturnya: *Scale (mm)*; *Model (Viscous, Standard k-Epsilon-2 eqn, Standard Wall Functions)*; *Material (Fluid-Water, Solid-Steel)*; *Cell Zone Condition (Type: Fluid)*; *Boundary Condition-Input [Gauge Total Pressure (Pa); Turbulent Intencity (%), Turbulent Viscosity Ratio]*; *Reference Values [Density (kg/m³), Pressure (Pa), Temperatur (K), Velocity (m/s)]*; *Solution Method [Momentum dan Turbulent Kinetic Energy (First Order Upwind)]*; *Monitor [Titik Pengukuran-SurfacePoint-koordinat (X,Y,Z)]*; *Solution Initialization [Standard Initialization, Compute from: Input, Initial Value: Gauge Pressure (Pa), Y Velocity (m/s)]*; *Run Calculation: Number of Iteration.*
- 5). Diklik *calculate* untuk melakukan proses iterasi tekanan minimum dan uap jenuh fluida di sisi masuk pipa isap
- 6). Dilakukan kembali prosedur nomer 4 jika iterasi tidak berhasil atau tidak konvergen
- 7). Diplot kontur tekanan pada *surface point* di sisi masuk pipa isap dengan menu *volume rendering* (variabel tekanan) jika iterasi berhasil (konvergen)
- 8). Dilakukan proses penyimpanan pada program ANSYS
- 9). Dibuka file *Notepad* dengan ekstensi *outfile* sehingga diperoleh hasil iterasi tekanan minimum (p_{min}) dan tekanan uap jenuh (p_v) dalam satuan *Pascal*
- 10). Dilakukan kembali prosedur nomer 4 dan seterusnya untuk bukaan sudu pengarah lainnya
- 11). Dihitung galatnya antara simulasi dan metode analisis perhitungan

4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Kerugian Head Mayor pada Tiap GVO (Perhitungan dan Simulasi)

Gambar 2 berikut ini adalah grafik yang menunjukkan perbandingan hasil perhitungan antara kerugian *head* mayor dengan metode analisis perhitungan (persamaan *Hazen-Williams*) dan simulasi (*Software Pipe Flow Expert V 5.12*)

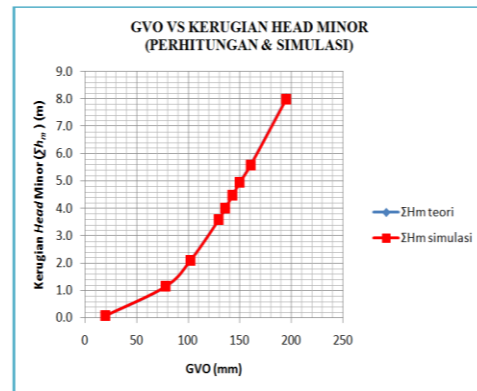


Gambar 2. Grafik Buka-an Sudu Pengarah terhadap Kerugian Head Mayor (Perhitungan dan Simulasi)

Berdasarkan gambar 2 ditunjukkan bahwa galat antara metode analisis perhitungan dan simulasi cukup besar karena kerugian head mayor pada analisis perhitungan menggunakan persamaan *Hazen-Williams*, sedangkan pada simulasi menggunakan persamaan *Darcy-Weisbach*. Selain itu, semakin besar bukaan sudu pengarah maka semakin besar kerugian head mayor karena nilai debit aliran air masuk yang semakin besar pula.

Kerugian Head Minor (Perhitungan dan Simulasi)

Gambar 3 berikut ini adalah grafik hasil perhitungan kerugian head minor antara hasil perhitungan dari analisis perhitungan menggunakan persamaan (2) dan *Software Pipe Flow Expert V 5.12*.

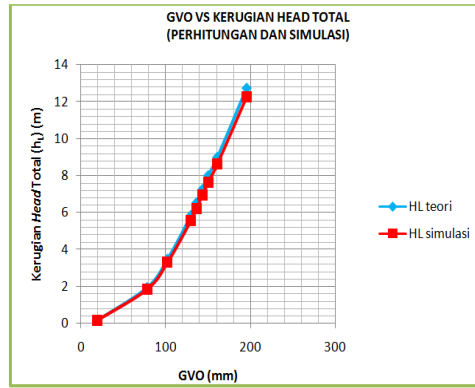


Gambar 3. Grafik Buka-an Sudu Pengarah terhadap Kerugian Head Minor (Perhitungan dan Simulasi)

Berdasarkan gambar 3 ditunjukkan bahwa galat antara metode analisis perhitungan dan simulasi menunjukkan nilai yang sangat kecil sehingga kedua kurva pada grafik berimpit. Hal itu disebabkan karena persamaan yang digunakan antara metode analisis perhitungan dan simulasi sama yaitu dengan menggunakan persamaan (2). Selain itu, semakin besar bukaan sudu pengarah maka semakin besar kerugian head minor karena kecepatan air yang semakin besar pula.

Kerugian Head Total (Perhitungan dan Simulasi)

Kerugian head total di bawah ini adalah hasil dari penjumlahan kerugian head mayor dan minor dari metode analisis perhitungan dan metode simulasi (*Software Pipe Flow Expert V 5.12*) yang ditunjukkan pada gambar 4.

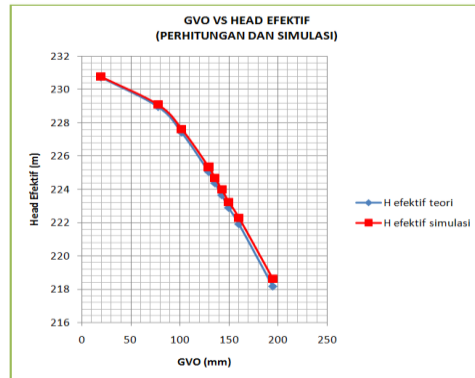


Gambar 4. Grafik Buka-an Sudu Pengarah terhadap Kerugian *Head* Total (Perhitungan dan Simulasi)

Berdasarkan grafik di atas diperoleh nilai galat dari 3,751% hingga 8,289%. Nilai galat terbesar terdapat pada GVO 19,5 mm dan terkecil pada GVO 195 mm. Selain itu, hasil perhitungan kerugian *head* dengan menggunakan metode analisis perhitungan lebih besar daripada menggunakan simulasi (*Software Pipe Flow Expert V 5.12*).

Head Efektif pada Tiap GVO (Perhitungan dan Simulasi)

Head efektif yang dihitung pada penelitian ini merupakan head maksimum pada Turbin yang dikurangi dengan kerugian *head* total dari *gate valve* sampai *inlet valve* yang ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Grafik Buka-an Sudu Pengarah terhadap Head Efektif (Perhitungan dan Simulasi)

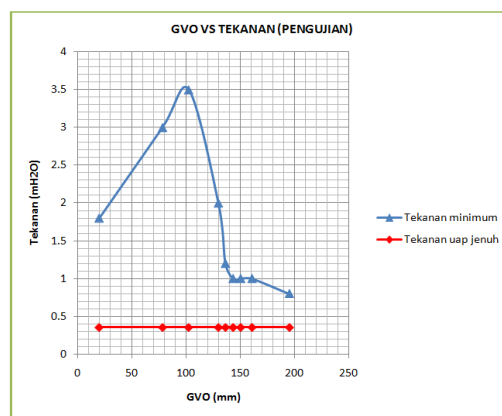
Berdasarkan gambar 5 ditunjukkan bahwa semakin besar bukaan sudu pengarah maka semakin kecil head efektif karena kerugian head yang semakin besar pula.

Hubungan antara GVO dan Tekanan pada Sisi Masuk Pipa Isap (Pengujian)

Data bukaan sudu pengarah (*Guide Vane Opening/GVO*) terhadap tekanan minimum (p_{min}) dan tekanan uap jenuh (p_v) di bawah ini merupakan hasil pengujian Turbin Francis Vertikal Unit-3 PLTA Siguragura yang dilakukan oleh P.T. Inalum (Persero) pada tanggal 10 November 2011. Nilai tekanan minimum di diperoleh dari pembacaan alat ukur *pressure transducer* di turbin pit. Tekanan minimum di atas adalah nilai tekanan yang diperoleh setelah dilakukan pengujian sebanyak 3 kali dan diambil nilai tekanan yang paling kecil (p_{min}). Nilai tekanan uap jenuh pada tiap GVO adalah sebesar 3,491 kPa. Nilai tersebut diperoleh dari interpolasi dari tabel *Physical Properties of Water* Tekanan uap tersebut terletak pada suhu 26,5°C (suhu air yang

diukur di P.T. Inalum pada tanggal 10 November 2011). Nilai tekanan uap jenuh dalam satuan kPa dikonversikan menjadi satuan mH₂O agar memiliki satuan yang sama dengan tekanan minimum pada sisi masuk pipa isap dimana 1 kPa sebanding dengan 0,101972 mH₂O. Jadi tekanan uap jenuh di sisi masuk pipa isapsebesar 0,356 mH₂O.

Gambar 6 berikut ini adalah grafik yang menunjukkan menunjukkan hubungan tekanan minimum dan tekanan uap jenuh pada tiap GVO di sisi masuk pipa isap.

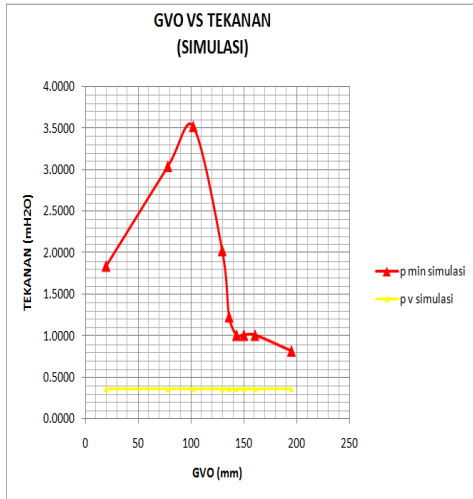


Gambar 6. Grafik Bukaan Sudu Pengarah terhadap Tekanan (Pengujian)

Berdasarkan grafik pada gambar 6 ditunjukkan bahwa pada awal GVO mengalami kenaikan tekanan dan di pertengahan dan akhir GVO mengalami penurunan tekanan. Tekanan minimum tertinggi yaitu sebesar 3,5 mH₂O pada GVO 102 mm, sedangkan tekanan minimum terendah yaitu sebesar 0,8 mH₂O pada GVO 195 mm. Tekanan uap jenuh memiliki nilai yang tetap karena nilai tersebut akan dijadikan sebagai komponen perhitungan pada nilai angka *Thoma* kritis yang nilainya juga tetap. Tekanan uap jenuh ini terjadi pada temperatur air konstan yang mengalir di pipa isap yaitu pada suhu 26,5°C. Nilai tekanan tersebut naik karena head tekanan berubah menjadi head kecepatan, begitu juga sebaliknya [3].

Hubungan antara GVO dan Tekanan pada Sisi Masuk Pipa Isap (Simulasi)

Gambar 7 berikut ini adalah hasil dari metode penelitian dengan simulasi yang menggunakan *Software ANSYS Workbench 14.0* dan dibandingkan dengan nilai tekanan minimum (p_{min}) yang diperoleh dari pengujian dan tekanan uap jenuh (p_{vapor}/p_v) dari tabel sifat air. Nilai tekanan minimum dan uap jenuh dari metode simulasi diperoleh setelah melakukan iterasi pada *software*.

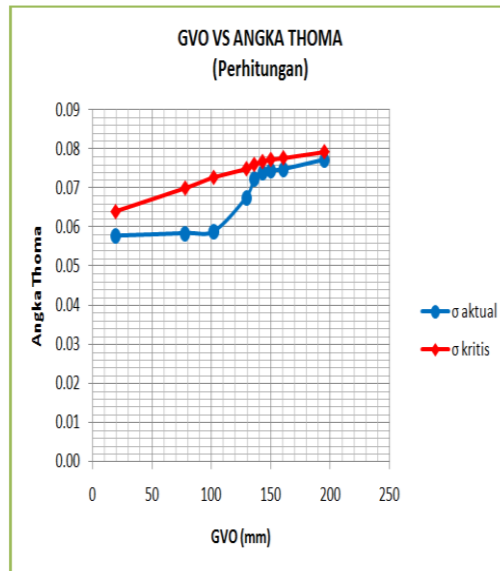


Gambar 7. Grafik Bukaan Sudu Pengarah terhadap Tekanan (Simulasi)

Berdasarkan grafik di atas ditunjukkan bahwa Tekanan minimum tertinggi yaitu sebesar 3,5181 mH₂O pada GVO 102 mm, sedangkan tekanan minimum terendah yaitu sebesar 0,8204 mH₂O pada GVO 195 mm, dan tekanan uap jenuhnya sama pada 0,3603 mH₂O.

Hubungan antara GVO dan Angka Thoma pada Sisi Masuk Pipa Isap (Perhitungan)

Angka Thoma yang dihitung pada penelitian ini yaitu angka Thoma aktual dan angka Thoma kritis. Angka Thoma kritis (σ_c) dihitung berdasarkan persamaan (3) sedangkan angka Thoma aktual (σ_a) dihitung berdasarkan persamaan (4). Gambar 8 berikut ini adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara GVO dan angka Thoma aktual dan kritis pada sisi masuk pipa isap dengan menggunakan metode perhitungan.

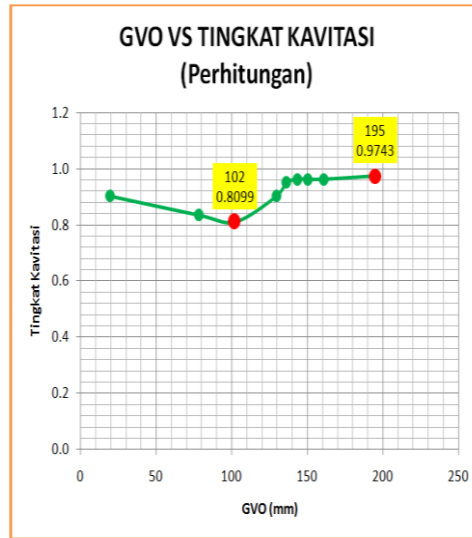


Gambar 8. Grafik Bukaan Sudu Pengarah terhadap Angka Thoma (Perhitungan)

Berdasarkan gambar di atas ditunjukkan bahwa semakin besar GVO maka semakin besar pula angka Thoma aktual dan angka Thoma kritis pada sisi masuk pipa isap.

Hubungan antara GVO dan Tingkat Kavitasi pada Sisi Masuk Pipa Isap (Perhitungan)

Tingkat kavitasi dihitung berdasarkan persamaan (5). Gambar 9 berikut ini adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara GVO dengan Tingkat Kavitasi pada sisi masuk pipa isap dengan menggunakan metode analisis perhitungan.

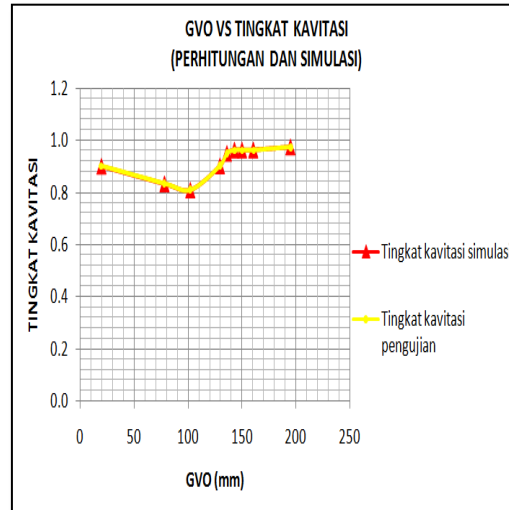


Gambar 9. Grafik Bukaan Sudu Pengarah terhadap Tingkat Kavitasi (Perhitungan)

Berdasarkan grafik di atas ditunjukkan bahwa di awal hingga pertengahan GVO, tingkat kavitasi mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan; sedangkan di pertengahan dan akhir GVO, tingkat kavitasi mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Tingkat kavitasi terbesar yaitu sebesar 0,9743 pada GVO 195 mm; sedangkan tingkat kavitasi terkecil yaitu sebesar 0,8099 pada GVO 102 mm. Berdasarkan nilai tingkat kavitasi di atas pada tiap GVO diketahui bahwa pada sisi masuk pipa isap tidak mengalami kavitasi, tetapi nilai yang mendekati 1 (rentan kavitasi) dialami pada tingkat kavitasi terbesar yaitu pada GVO 195 mm. Kenaikan dan penurunan tingkat kavitasi disebabkan oleh perubahan head tekanan menjadi kecepatan dan sebaliknya (Persamaan Bernoulli) [3].

Hubungan antara GVO dan Tingkat Kavitasi pada Sisi Masuk Pipa Isap (Perhitungan dan Simulasi)

Tingkat kavitasi pada simulasi dihitung juga dengan menggunakan formula yang sama yaitu berdasarkan persamaan (5) dimana angka Thoma aktual dan kritisnya didapatkan dari nilai tekanan minimum dan tekanan uap jenuh pada metode simulasi. Gambar 10 berikut ini menunjukkan hubungan antara GVO dan tingkat kavitasi pada sisi masuk pipa isap.



Gambar 10. Grafik Buka-an Sudu Pengarah terhadap Tingkat Kavitasi (Perhitungan dan Simulasi)

Berdasarkan grafik di atas ditunjukkan bahwa tingkat kavitasi pada sisi masuk pipa isap antara metode perhitungan (persamaan 5) dan simulasi (*Software ANSYS Workbench 14.0*) tidak memiliki perbedaan yang besar karena nilai galat untuk tekanan minimum antara keduanya kecil, yaitu dari 0,0431 % sampai 0,2910 %. Tingkat kavitasi terbesar pada metode simulasi yaitu sebesar 0,9734 pada GVO 195 mm; sedangkan tingkat kavitasi terkecil pada metode simulasi yaitu sebesar 0,8090 pada GVO 102 mm. Berdasarkan nilai tingkat kavitasi tersebut dapat disimpulkan hal yang sama dengan metode perhitungan yaitu pada sisi masuk pipa isap tidak mengalami kavitasi pada tiap GVO, tetapi nilai yang mendekati 1 (rentan kavitasi) dialami pada tingkat kavitasi terbesar yaitu pada GVO 195 mm.

5. KESIMPULAN

- Tingkat kavitasi terbesar di Sisi Masuk Pipa Isap (*Draft Tube*) Turbin Francis Vertikal Unit 3 PLTA Siguragura P.T. Inalum (Persero) berdasarkan metode perhitungan yaitu sebesar 0,9743 pada bukaaan sudu pengarah (*Guide Vane Opening/GVO*) sebesar 195 mm; sedangkan tingkat kavitasi terkecil yaitu sebesar 0,8099 pada GVO sebesar 102 mm. Berdasarkan metode simulasi diperoleh tingkat kavitasi terbesarnya yaitu sebesar 0,9734 pada bukaaan sudu pengarah (*Guide Vane Opening/GVO*) sebesar 195 mm, sedangkan tingkat kavitasi terkecil yaitu sebesar 0,8090 pada GVO sebesar 102 mm.
- Kavitasi tidak terjadi pada Sisi Masuk Pipa Isap (*Draft Tube*) Turbin Francis Vertikal Unit 3 PLTA Siguragura pada GVO 102 mm karena tingkat kavitasi (perbandingan angka *Thoma* aktual dan kritis) di bawah nilai 1 dimana *angka Thoma* aktual perhitungan dan simulasinya masing-masing adalah 0,0589 dan 0,0588 lebih kecil daripada *angka Thoma* kritis perhitungan dan simulasinya masing-masing yaitu sebesar 0,0727 dan 0,0726; sedangkan pada GVO 195 mm tidak terjadi kavitasi juga, tetapi rentan mengalaminya karena tingkat kavitasi mendekati nilai 1 dimana *angka Thoma* aktual perhitungan dan simulasinya masing-masing adalah 0,0772 dan 0,0769, sedangkan *angka Thoma* kritis perhitungan dan simulasinya masing-masing sebesar 0,0792 dan 0,0790.
- Bukaan sudu pengarah (GVO) yang terbaik digunakan untuk menghindari kavitasi di sisi masuk pipa isap turbin yaitu pada 102 mm karena memiliki tingkat kavitasi terkecil, sedangkan GVO yang dihindari untuk digunakan karena paling rentan

terkena kavitasi yaitu pada GVO sebesar 195 mm karena memiliki tingkat kavitasi terbesar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wikipedia Bahasa Inggris. *Hazen-Williams Equation dalam http://en.wikipedia.org/wiki/Hazen%E2%80%93Williams_equation* diakses pada tanggal 1 Oktober 2014.
- [2] Rayan, Magdy Abou. 2009. *A Textbook of Hydraulic Machines*. Egypt: Zagagig University.
- [3] Dietzel, Fritz. 1988. *Turbin, Pompa, dan Kompresor*. Jakarta: Erlangga.
- [4] Massey, Bernard. 2006. *Mechanic of Fluids, Eight Edition*. London & New York: Taylor & Francis Group.