

SKRIPSI

**ANALISA TINGKAT KAVITASI TURBIN FRANCIS
DI PT.PLN (PERSERO) PLTA BATANG AGAM**

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat*



Oleh

RIZKI HAMDANI PUTRA
17.10.002.21201.027

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA BARAT
2021**

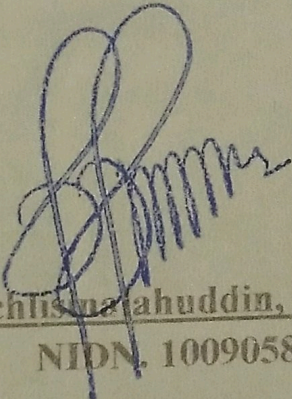
HALAMAN PENGESAHAN

ANALISA TINGKAT KAVITASI TURBIN FRANCIS
DI PT.PLN (PERSERO) PLTA BATANG AGAM

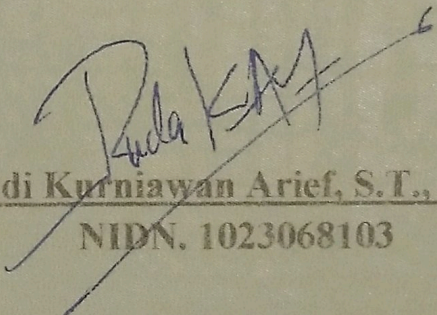
Oleh

RIZKI HAMDANI PUTRA
17.10.002.21201.027


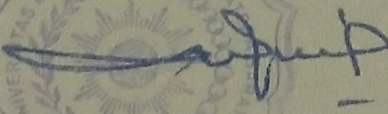
Dosen Pembimbing I,


Muchlisna Zahuddin, S.T., M.T.
NIDN. 1009058002

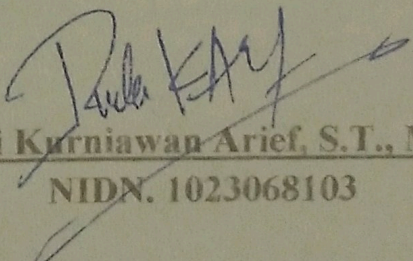
Dosen Pembimbing II,


Rudi Kurniawan Arief, S.T., M.T.
NIDN. 1023068103

Dekan Fakultas Teknik
UM Sumatera Barat



Masril, S.T., M.T.
NIDN. 1005057407

Ketua Program Studi Teknik Mesin
UM Sumatera Barat


Rudi Kurniawan Arief, S.T., M.T.
NIDN. 1023068103

LEMBARAN PERSETUJUAN TIM PENGUJI


Skripsi ini telah dipertahankan dan disempurnakan berdasarkan masukan dan koreksi Tim Penguji pada ujian tertutup tanggal 31 Agustus 2021 di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat

Bukittinggi, 10 September 2021
Mahasiswa,

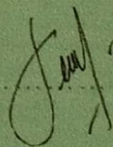
Rizki Hamdani Putra
171000221201027

Disetujui Tim Penguji Skripsi tanggal 10 September 2021 :

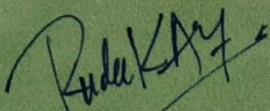
1. Riza Muharni, S.T., M.T.

1. 
.....

2. Dr. Femi Earnestly, M.Si

2. 
.....

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Mesin


Rudi Kurniawan Arief, S.T., M.T.
NIDN. 1023068103

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Rizki Hamdani Putra
Tempat dan tanggal Lahir : Bukittinggi / 28 September 1995
NIM : 171000221201027
Judul Skripsi : Analisa Tingkat Kavitasi Turbin Francis di PT.
PLN (Persero) PLTA Batang Agam

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa penulisan Skripsi ini berdasarkan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli dari saya sendiri, baik untuk naskah laporan maupun kegiatan yang tercantum sebagai bagian dari Skripsi ini. Jika terdapat karya orang lain, saya akan mencantumkan sumber yang jelas.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya tulis ini dan sanksi lain sesuai dengan peraturan yang berlaku di UM Sumatera Barat.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa paksaan dari pihak manapun.

Bukittinggi, 10 September 2021
Yang membuat pernyataan,



Rizki Hamdani Putra
171000221201027

ABSTRAK

PLTA Batang Agam merupakan pembangkit listrik tenaga air tertua di Sumatera Barat yang terletak di Kabupaten Lima Puluh Kota. Menurut fakta di lapangan, pada saat PLTA Batang Agam beroperasi di beban tertentu menyebabkan tingkat vibrasi yang tinggi. Salah satu penyebab vibrasi pada turbin generator yaitu kavitasi. Penelitian ini membahas bagaimana tingkat kavitasi yang terjadi di PLTA Batang Agam dengan turbin yang diteliti yaitu turbin unit 3 menggunakan beban operasi sebagai variabel yaitu 700 kW, 1800kW, 2000 kW, 2300 kW, 2500 kW, 2800 kW, 3000 kW , 3500 kW serta tingkat kavitasi berdasarkan hubungan antara koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik turbin. Metode yang dilakukan untuk mengumpulkan data dalam penelitian ini adalah observasi langsung, wawancara dan studi pustaka. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Head* efektif berkebalikan dengan debit air masuk turbin. *Head* efektif tertinggi berada di 100,55 m dengan debit pada 0,9 m³/s. Sedangkan *head* efektif terendah berada pada 96,26 m dengan debit sebesar 4,8 m³/s. Hasil lain juga menunjukkan bahwa koefisien kavitasi yang didapatkan berbanding lurus dengan debit air masuk turbin. Koefisien kavitasi terbesar ditunjukkan oleh nilai 0,111157 dengan debit air masuk turbin 4,8 m³/s. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil pada 0,106414 dengan debit sebesar 0,9 m³/s. Koefisien kavitasi yang didapatkan berbanding lurus dengan kecepatan spesifik. Koefisien kavitasi terbesar berada di nilai 0,111157 dengan kecepatan spesifik sebesar 147,158 rpm. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil dengan nilai 0,106414 dengan kecepatan spesifik 62,318 rpm. Turbin unit 3 PLTA Batang Agam mengalami kavitasi berdasarkan analisa yang ditunjukkan nilai koefisien kavitasi serta kecepatan spesifiknya. Berdasarkan temuan yang didapatkan dapat disimpulkan bahwa tingkat kavitasi di PLTA Batang Agam masih dalam daerah aman kavitasi sehingga tidak mengakibatkan kerusakan yang besar terhadap runner dan turbin.

Kata Kunci : PLTA, kavitasi, turbin francis

ABSTRACT

The hydroelectric power plant of Batang Agam is the oldest hydroelectric power plant in Lima Puluh Kota Regency, West Sumatra. When The hydroelectric power plant of Batang Agam is operated at a definite load cause the high vibration. One of the vibration causes on the generator turbine is cavitation. This study described how the cavitation rate with a turbine of the hydroelectric power plant of Batang Agam is unit 3 using an operation load as a variable that is 700 kW, 1800kW, 2000 kW, 2300 kW, 2500 kW, 2800 kW, 3000 kW, 3500 kW, and the cavitation rate base on a relation between the cavitation coefficient and the turbine specific speed. The study methods to collect data are observation, interview, and literature. The study result shows that the effective head is inversely proportional to the water discharge into the turbine. The high effective head is on 100,55 m with the water discharge on 0,9 m³/s. The low effective head is on 96,26 m with the water discharge on 4,8 m³/s. The other result describes that the cavitation coefficient is equal to the water discharge into the turbine. The biggest cavitation coefficient is 0,111157 to the water discharge into the turbine 4,8 m³/s. The smallest cavitation coefficient is 0,106414 to the water discharge into the turbine 0.9 m³/s. The cavitation coefficient is equal to the specific speed. The higher cavitation coefficient is 0,111157 to a peculiar speed of as much as 147,158 rpm. The low cavitation coefficient is 0,106414 to the particular speed of as much as 62,318 rpm. The turbine unit 3 of the hydroelectric power plant of Batang Agam has a cavitation base on the analysis of the cavitation coefficient value and the specific speed. Based on the result, we have the conclusion that the cavitation rate in the hydroelectric power plant of Batang Agam is in the safety zone to the cavitation. It doesn't cause too much negative impact to runner and turbine.

Keywords: *cavitation, hydroelectric power plant, francis turbine*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Yang Maha Kuasa atas berkat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan Skripsi ini. Adapun judul dari Skripsi penulis adalah “Analisa Tingkat Kavitas Turbin Francis di PT. PLN (Persero) PLTA Batang Agam”.

Skripsi ini merupakan salah satu kewajiban yang harus diselesaikan untuk memenuhi sebagian persyaratan akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin di Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat.

Penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan, bantuan, dan doa dari berbagai pihak, Skripsi ini tidak akan dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses pengerjaan skripsi ini.

1. Kedua orang tua yang telah memberikan dukungan penuh kepada penulis sehingga selesainya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak Masril, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat.
3. Bapak Hariyadi, M.Kom selaku Wakil Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat.
4. Bapak alm. Ir. Hariadi, M.Eng selaku Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis.
5. Bapak Rudi K Arief, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, sekaligus Pembimbing II skripsi yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis.
6. Bapak Muchlisinalahuddin, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik sekaligus pengganti Pembimbing I skripsi yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis.
7. Ibu Riza Muharni, S.T., M.T. selaku Penguji I yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis.
8. Ibu Dr. Femi Earnestly, M.Si selaku Penguji II yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis.

9. Bapak maupun Ibu Dosen yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan selama penulis menempuh pendidikan di Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Bukittinggi.
10. Semua pihak yang telah membantu dalam penulisan Skripsi ini.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa mungkin masih terdapat banyak kekurangan dalam skripsi ini. Oleh karena itu, saran dari pembaca akan sangat bermanfaat bagi penulis. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya, khususnya Mahasiswa Teknik Mesin.

Bukittinggi, 10 September 2021



Rizki Hamdani Putra
171000221201027

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	
LEMBAR PERSETUJUAN TIM PENGUJI	
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	
ABSTRAK	
ABSTRACT	
KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR NOTASI.....	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian	2
1.5. Metode Pengumpulan Data	3
1.6. Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Turbin Air	5
2.1.1. Definisi Turbin Air	5
2.1.2. Klasifikasi Turbin Air.....	5
2.1.3. Klasifikasi Pemilihan turbin	7
2.1.4. Prinsip Kerja Turbin Francis.....	8
2.1.5. Bagian Utama Turbin	10
2.2. Kavitasi.....	11
2.2.1. Pengertian Kavitasi.....	11
2.2.2. Akibat Kavitasi.....	12
2.2.3. Daerah Rawan Kavitasi	12
2.2.4. Pencegahan Kavitasi	13
2.2.5. Koefisien Kavitasi	14
2.2.6. Bangunan dan Peralatan Utama PLTA Batang Agam.....	15
2.3. Persamaan yang Mendukung Penelitian.....	23

2.3.6.	Persamaan Bernoulli	23
2.3.7.	Persamaan <i>Head</i> Efektif	25
2.3.8.	Persamaan Kecepatan Spesifik	26
2.3.9.	Persamaan Koefisien Kavitasi	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		28
3.1.	Waktu dan Tempat Pengambilan Data	28
3.2.	Data Penelitian.....	28
3.3.	Metode Analisis Data.....	28
3.4.	Diagram Alir.....	29
BAB IV DATA DAN ANALISIS		30
4.1.	Data yang Diperoleh dan Contoh Perhitungan	30
4.1.1.	<i>Head</i> Efektif (H_{eff}).....	30
4.1.2.	Kecepatan Spesifik Turbin.....	35
4.1.3.	Koefisien Kavitasi	38
4.2.	Data Hasil Perhitungan dan Analisa.....	40
4.2.1.	Perbandingan Debit Air Masuk Turbin dan <i>Head</i> Efektif.....	40
4.2.2.	Perbandingan Koefisien Kavitasi dan Debit Air Masuk Turbin...	41
4.2.3.	Perbandingan Koefisien Kavitasi dan Kecepatan Spesifik.....	42
BAB V PENUTUP.....		45
5.1.	Kesimpulan.....	45
5.2.	Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA.....		47
LAMPIRAN		48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Klasifikasi turbin berdasarkan ketinggian air	7
Tabel 2.2. Klasifikasi turbin berdasarkan kecepatan spesifik	8
Tabel 2.3. Klasifikasi turbin berdasarkan kecepatan nominal dan <i>runaway speed</i>	8
Tabel 2.4. Spesifikasi turbin.....	21
Tabel 2.5. Spesifikasi generator	22
Tabel 2.6. Spesifikasi transformator.....	23
Tabel 4.1. Data hasil observasi di PLTA Batang Agam	30
Tabel 4.2. Data untuk perhitungan kecepatan spesifik	35
Tabel 4.3. Data untuk perhitungan koefisien kavitasi.....	38
Tabel 4.4. Data perbandingan debit air masuk turbin dan <i>head</i> efektif	40
Tabel 4.5. Data perbandingan koefisien dan debit air masuk turbin	41
Tabel 4.6. Data perbandingan koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik	42
Tabel 4.7. Data hasil pengukuran vibrasi	43



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Potongan turbin air	5
Gambar 2.2. Turbin Kaplan: (kiri) vertikal dan (kanan) horizontal	6
Gambar 2.3. Turbin Francis: (kiri) vertikal dan (kanan) horizontal	6
Gambar 2.4. Turbin Pelton: (kiri) vertikal dan (kanan) horizontal	7
Gambar 2.5. Potongan penampang Turbin Francis	9
Gambar 2.6. Wicket gate.....	9
Gambar 2.7. Runner	10
Gambar 2.8. Spiral casing	11
Gambar 2.9. Contoh kerusakan material akibat kavitasi	12
Gambar 2.10. Daerah rawan kavitasi	13
Gambar 2.11. Batas terendah dari sigma instalasi untuk menetapkan letak turbin	14
Gambar 2.12. Nilai H_s dan posisi turbin terhadap permukaan air bawah	15
Gambar 2.13. Intake weir.....	16
Gambar 2.14. Terowongan I	16
Gambar 2.15. Kolam pasir	17
Gambar 2.16. Kolam tando	17
Gambar 2.17. Surge tank.....	18
Gambar 2.18. Valve chamber.....	19
Gambar 2.19. Penstock	19
Gambar 2.20. Power house	20
Gambar 2.21. Power house	20
Gambar 2.22. Turbin Francis	21
Gambar 2.23. Generator	21
Gambar 2.24. Transformator	22
Gambar 2.25. Governor.....	23
Gambar 2.26. Energy balance	24
Gambar 4.1. Skema elevasi permukaan waduk dan elevasi tail race	31
Gambar 4.2. Grafik perbandingan debit air masuk turbin dan <i>head</i> efektif.....	40
Gambar 4.3. Grafik perbandingan koefisien kavitasi dan debit air masuk turbin	41
Gambar 4.4. Grafik perbandingan koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik.....	42
Gambar 4.5. Grafik data hasil pengukuran vibrasi	43

DAFTAR NOTASI

Notasi	Deskripsi	Satuan
A_1	Luas Permukaan Waduk	(m ²)
A_2	Luas Penampang <i>draft tube</i>	(m ²)
g	Percepatan grafitasi	(m/s ²)
H	<i>Head</i> efektif	(m)
H_{atm}	Tekanan Atmosfer	(m)
H_s	Tinggi hisap	(m)
H_v	Tekanan Uap air	(m)
n	Kecepatan nominal putaran	(rpm)
n_s	Kecepatan spesifik	(rpm)
P	Daya	(kW)
p	Tekanan	(N/m ²)
p_1	Tekanan permukaan air waduk	(N/m ²)
p_2	Tekanan pada <i>draft tube</i>	(N/m ²)
Q_1	Debit air permukaan waduk	(m ³ /s)
Q_2	Debit air masuk turbin	(m ³ /s)
v	Kecepatan aliran	(m/s)
v_1	Kecepatan aliran air di permukaan waduk	(m/s)
v_2	Kecepatan aliran air pada <i>draft tube</i>	(m/s)
z_1	Elevasi permukaan waduk	(mdpl)
z_2	Elevasi sensor tekanan <i>draft tube</i>	(mdpl)
ρ	Massa Jenis Air	(kg/m ³)
σ	Angka <i>Thoma</i>	-

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PLTA Batang Agam merupakan pembangkit listrik tenaga air tertua di Sumatera Barat yang terletak di Kabupaten Lima Puluh Kota. PLTA ini mulai digunakan pada tahun 1976. Putaran turbin generator pada *powerhouse* memanfaatkan potensi air sungai Batang Agam yang dibendung dan dialirkan menuju Kolam Tando dan diteruskan melalui terowongan *headrace tunnel* sepanjang 1.080 m. PLTA Batang Agam terdiri dari 3 unit mesin pembangkit dengan daya terpasang 10,5 MW. Peralatan utama PLTA Batang Agam berupa: Turbin, Generator dan Transformator.

Menurut fakta di lapangan pada saat PLTA Batang Agam beroperasi di beban tertentu menyebabkan tingkat vibrasi yang tinggi, salah satu penyebab vibrasi pada turbin generator yaitu kavitasi. Kavitasi adalah gelembung-gelembung air yang menyebabkan pengikisan, suara bising dan getaran pada komponen turbin. Fenomena kavitasi tersebut dapat diprediksi dengan menghitung angka *Thoma* (σ) agar tidak melewati angka kritis yang sudah ditentukan sesuai spesifikasi turbinnya.

Penelitian mengenai analisa kavitasi turbin Francis sebelumnya pernah dilakukan oleh Trihardika Biantoro dan Soeadghardo Siswantoro pada tahun 2016 di PLTA Soedirman. Dari hasil penelitian ini ditemukan bahwa tingkat kavitasi pada turbin Francis dipengaruhi oleh besar bukaan *guide vane*. Dengan semakin besarnya bukaan *guide vane* pada turbin Francis maka diperlukan lebih banyak debit air yang mengalir untuk mendapatkan *head* yang ditentukan (Biantoro, 2016). Sementara penelitian yang dilakukan oleh Mashuri dan Muhammad Irfan pada tahun 2011 menunjukkan bahwa penyebab tingkat kavitasi yang terjadi pada turbin air semakin meningkat adalah karena semakin tingginya nilai *head* (Mashuri, 2011). Penelitian mengenai kavitasi ini juga pernah dilakukan oleh Rakhasiwi dan Wistra Galih pada tahun 2020 di PLTA Musi. Hasil penelitiannya menyebutkan bahwa sebaiknya pengoperasian turbin Francis di

beban terbesar dihindari untuk menghindari resiko tingkat kavitasi yang tinggi. Dimana dalam strategi pengoperasian lebih baik pengoperasian unit dilakukan menggunakan unit yang lebih banyak dengan beban rendah dari pada hanya dengan satu unit namun dengan beban operasi beban terbesar (Rakhasiwi, 2020).

Hasil wawancara langsung dengan penanggung jawab PLTA Batang Agam, ditemukan bahwa belum ada peneliti yang melakukan penelitian mengenai tingkat kavitasi turbin francis di tempat tersebut. Berdasarkan latar belakang ini, maka peneliti tertarik untuk melakukan penelitian mengenai “Analisa Tingkat Kavitasi Turbin Francis Berdasarkan Hubungan Antara Koefisien Kavitasi Dan Kecepatan Spesifik Turbin di PLTA Batang Agam”

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam skripsi ini adalah bagaimana tingkat kavitasi yang terjadi di PLTA Batang Agam unit 3 ditinjau dari hubungan antara kecepatan spesifik dengan koefisien kavitasi.

1.3. Batasan Masalah

Dalam penyusunan laporan skripsi ini penulis memberi batasan masalah sebagai berikut:

- a. Turbin yang diteliti yaitu turbin unit 3 PLTA Batang Agam *type Horizontal Shaft Francis, Rated Speed 750 rpm dan Runaway Speed 1330 rpm.*
- b. Beban operasi sebagai variabel bebas yang digunakan yaitu 700 kW, 1800kW, 2000 kW, 2300 kW, 2500 kW, 2800 kW, 3000 kW dan 3500 kW.
- c. Tingkat kavitasi diketahui berdasarkan hubungan antara koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik turbin.

1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian yang dilakukan agar mengetahui tingkat kavitasi pada turbin Francis unit 3 di PLTA Batang Agam.

Manfaat dari penelitian yang dilakukan ialah:

- a. Dapat mengetahui tingkat kavitasi yang terjadi pada turbin francis unit 3 PLTA Batang Agam.
- b. Dapat memberikan referensi tingkat kavitasi yang terjadi di unit 3 PLTA Batang Agam.

1.5. Metode Pengumpulan Data

Metode yang dilakukan dalam penyusunan skripsi ini adalah:

1) Metode observasi

Pengumpulan data-data yang diperlukan untuk penyusunan skripsi yang dilakukan pengamatan secara langsung di PLTA Batang Agam.

2) Metode wawancara

Metode ini merupakan kegiatan mencari data-data dengan wawancara langsung dengan pembimbing lapangan, karyawan perusahaan, dan dari dosen pembimbing skripsi ini.

3) Studi pustaka

Metode ini dilakukan untuk mencari referensi yang menunjang penyusunan laporan dari berbagai media, seperti buku penunjang dan jurnal atau hasil penelitian yang ada di internet.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, maksud dan tujuan penelitian, metode pengumpulan data dan sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi landasan teori secara umum mengenai masalah yang akan diangkat dalam laporan skripsi.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini membahas bagaimana prosedur penelitian, data-data hasil penelitian pada model instalasi turbin Francis.

Bab IV Pembahasan dan Analisis

Bab ini membahas perhitungan data hasil penelitian dan analisisnya untuk menyimpulkan unjuk kerja turbin Francis serta penaruhnya terhadap tingkat kavitasi.

Bab V Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil analisa skripsi.

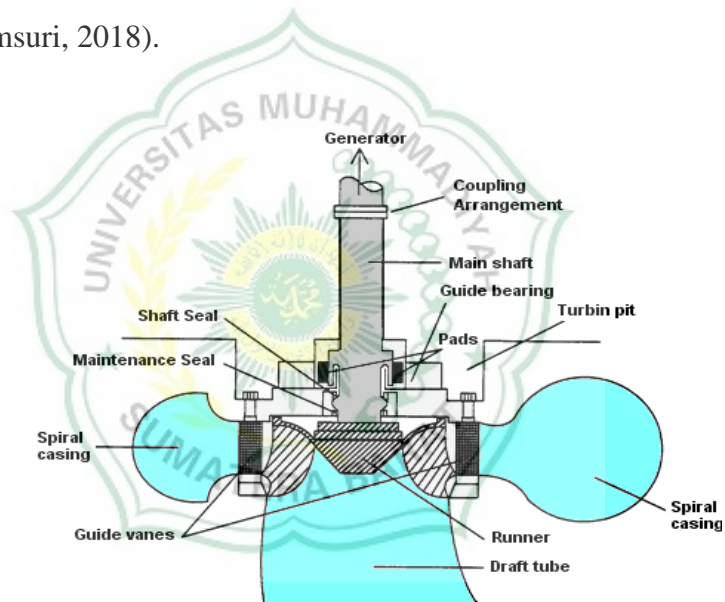


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Turbin Air

2.1.1. Definisi Turbin Air

Turbin air adalah turbin yang menggunakan fluida kerja air (Laksmana & Akbar, 2018). Air mengalir dari tempat tinggi ke tempat rendah. Dalam hal tersebut air memiliki energi potensial. Dalam proses aliran di dalam pipa energi potensial berangsur-angsur berubah menjadi energi kinetik. Di dalam turbin, energi kinetik air diubah menjadi energi mekanis, di mana air memutar roda turbin (Irawan & Syamsuri, 2018).



Gambar 2.1. Potongan turbin air

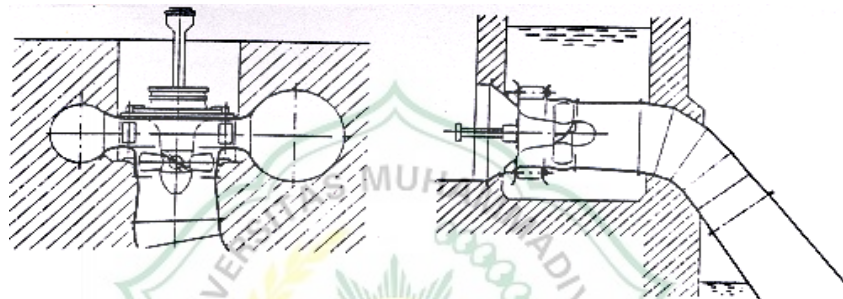
2.1.2. Klasifikasi Turbin Air

- A. Ditinjau dari kedudukan porosnya turbin air dibagi menjadi dua macam:
 - 1) Turbin horisontal
 - 2) Turbin vertikal
- B. Ditinjau dari fluida kerjanya dibagi menjadi dua macam:
 - 1) Turbin Reaksi

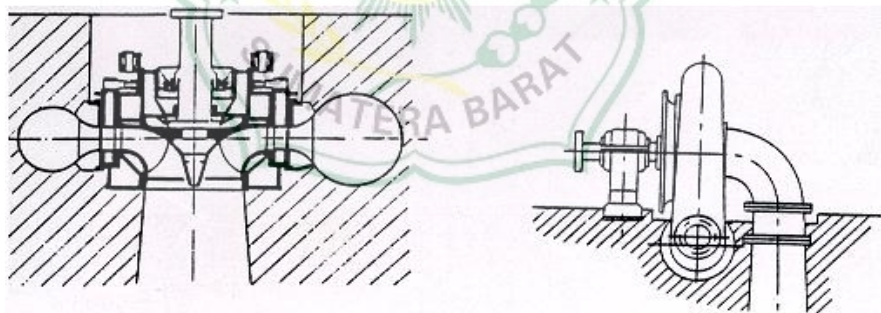
Turbin reaksi adalah turbin air yang melewati *runner* mengalami penurunan tekanan baik pada sudu pengatur maupun pada *runner* (Dewanto, Himawanto, & Cahyono, 2018). Contoh: Turbin Francis, Propeller dan Kaplan

2) Turbin Impuls

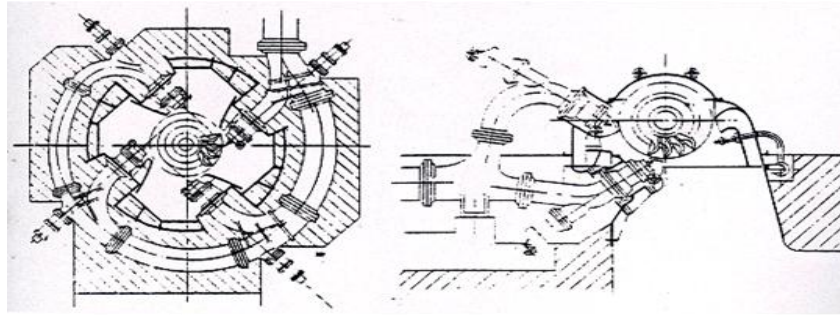
Turbin Impuls adalah turbin air dimana proses penurunan tekanan airnya terutama terjadi didalam distributor/noselnya dan tidak terjadi pada sudu-sudu jalannya (Chisnagara & Mohamad, 2020). Contoh: Turbin Pelton



Gambar 2.2. Turbin Kaplan: (kiri) vertikal dan (kanan) horizontal



Gambar 2.3. Turbin Francis: (kiri) vertikal dan (kanan) horizontal



Turbin Pelton

Gambar 2.4. Turbin Pelton: (kiri) vertikal dan (kanan) horizontal

C. Ditinjau dari aliran air:

- 1) Turbin radial ialah turbin dimana aliran air yang melewati *runner* dalam arah radial. Contoh : Turbin Pelton
- 2) Turbin aksial ialah turbin dimana aliran air yang melewati *runner* dalam arah aksial. Contoh : Turbin propeller dan turbin kaplan
- 3) Turbin radial aksial ialah turbin dimana air yang masuk ke *runner* dalam arah radial dan setelah keluar dari *runner* dalam arah aksial. Contoh : Turbin Francis

Pada pembangkit listrik tenaga air ia diklasifikasikan menjadi *high head*, *medium head* dan *low head*. Tidak ada batasan pasti yang dapat ditetapkan untuk masing-masing kelas namun umumnya adalah sebagai berikut:

- 1) *Low head* umumnya untuk tinggi jatuh lebih kecil dari 30 meter.
- 2) *Medium head* untuk tinggi jatuh antara 30–240 meter
- 3) *High head* untuk tinggi jatuh diatas 240 atau 300 meter

Jenis turbin yang digunakan untuk pembangkitan tergantung pada ketinggian (*head*) air yang ada dan faktor ekonomi.

2.1.3. Klasifikasi Pemilihan turbin

A. Berdasarkan Ketinggian Air atau Daerah Operasi Turbin

Tabel 2.1. Klasifikasi turbin berdasarkan ketinggian air

Jenis Turbin	Variasi <i>Head</i> (m)
Kaplan dan Propeller	$2 < H < 20$
Francis	$10 < H < 350$
Pleton	$50 < H < 1000$
Crossflow	$6 < H < 100$

B. Berdasarkan Kecepatan Spesifik

Tabel 2.2. Klasifikasi turbin berdasarkan kecepatan spesifik

Jenis Turbin	Kecepatan Spesifik (rpm)
Turbin Pleton	$12 \leq N_s \leq 25$
Turbi Francis	$60 \leq N_s \leq 300$
Turbin Crossflow	$40 \leq N_s \leq 200$
Turbin Propeller	$250 \leq N_s \leq 1000$

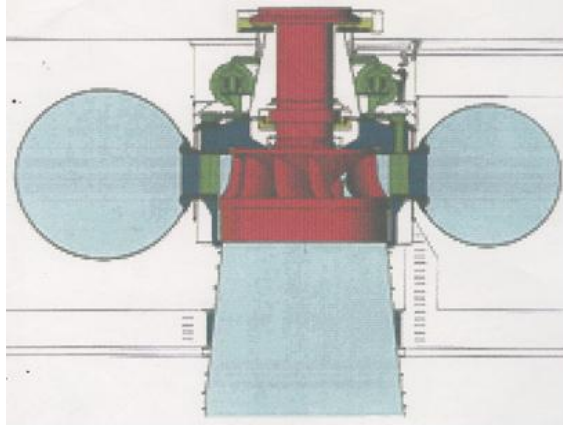
C. Berdasarkan Putaran Nominal dan *Run-away*

Tabel 2.3. Klasifikasi turbin berdasarkan kecepatan nominal dan *runaway speed*

Jenis Turbin	Putaran Nominal, N (rpm)	<i>Run-away</i> Speed
Semi Kaplan (<i>single regulated</i>)	75 – 100	2 - 2.4
Kaplan (<i>double regulated</i>)	75 – 150	2.8 – 3.2
<i>Small-medium</i> Kaplan	250 – 700	2.8 – 3.2
Francis (<i>medium & high head</i>)	500 – 1500	1.8 – 2.2
Francis (<i>low head</i>)	250 – 500	1.8 – 2.2
Pleton	500 – 1500	1.8 – 2
<i>Crossflow</i>	600 – 1000	1.8 – 2

2.1.4. Prinsip Kerja Turbin Francis

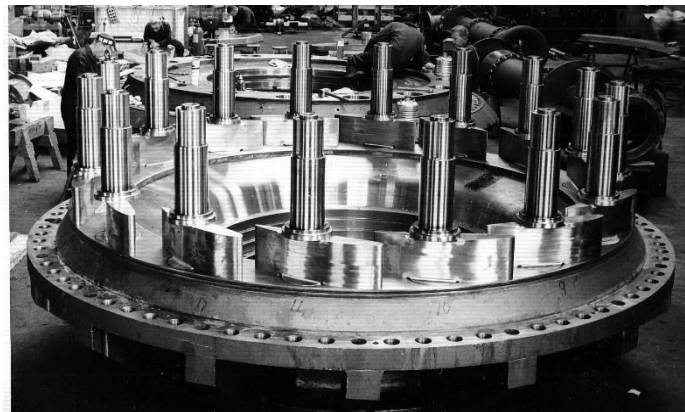
Turbin Francis termasuk salah satu turbin reaksi, artinya fluida yang bekerja mengubah tekanan bersamaan dengan gerak dari turbin tersebut, yang menghasilkan energi (Kusuma, 2011). Turbin Francis umumnya digunakan pada unit pembangkit dengan tinggi jatuh sedang Gambar 2.5 menunjukkan penampang melintang turbin Francis.



Gambar 2.5. Potongan penampang Turbin Francis

Kecepatan air yang masuk kedalam turbin Francis tergantung pada tinggi jatuh dan juga aliran yang melalui sudu pengatur (*guide vane* atau *wicket gate*) (Sudradjat, Bintoro, & Widianoro, 2010) seperti yang terlihat pada gambar 2.6. Kemudian air mengalir melalui *runner* dan akhirnya dibuang menuju pipa hisap (*draft tube*) semua laluan berisi penuh oleh air yang menggerakkan *runner*.

Pada kenyataannya hanya sebagian daya yang diperoleh dari gerak dinamik dari kecepatan air (Aryanto, Mara, & Nuarsa, 2013). Daya yang lebih besar diperoleh dari perbedaan tekanan yang bekerja pada sisi depan dan belakang dari sudu-sudu *runner*. *Draft tube* memungkinkan pemanfaatan *head* yang ada secara maksimum baik karena saluran masuk yang dibuat dibawah *runner* oleh kolom air vertikal maupun karena saluran keluar *draft tube* yang lebih besar dari pada leher yang berada dibawah *runner*. Dengan cara ini sebagian energi kinetik dari air yang meninggalkan *runner blade* dimanfaatkan.



Gambar 2.6. *Wicket gate*

2.1.5. Bagian Utama Turbin

Turbin air mempunyai beberapa bagian-bagian komponen utama yang penting, yaitu:

1. Sudu jalan (*runner*)

Berfungsi untuk merubah energi kinetik menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin.

Runner pada turbin francis dan *propeller* letak daun sudunya tetap, sedangkan pada turbin kaplan sudut pemasukkan sudu *runner* dan sudut keluarnya bisa diubah-ubah (diatur) dengan tujuan agar *runner* bisa secara cepat dan langsung mengimbangi respon air bila terjadi perubahan kecepatan air, sehingga putaran poros turbin tetap stabil. Disamping untuk mengatur daya yang diperlukan.



Gambar 2.7. *Runner*

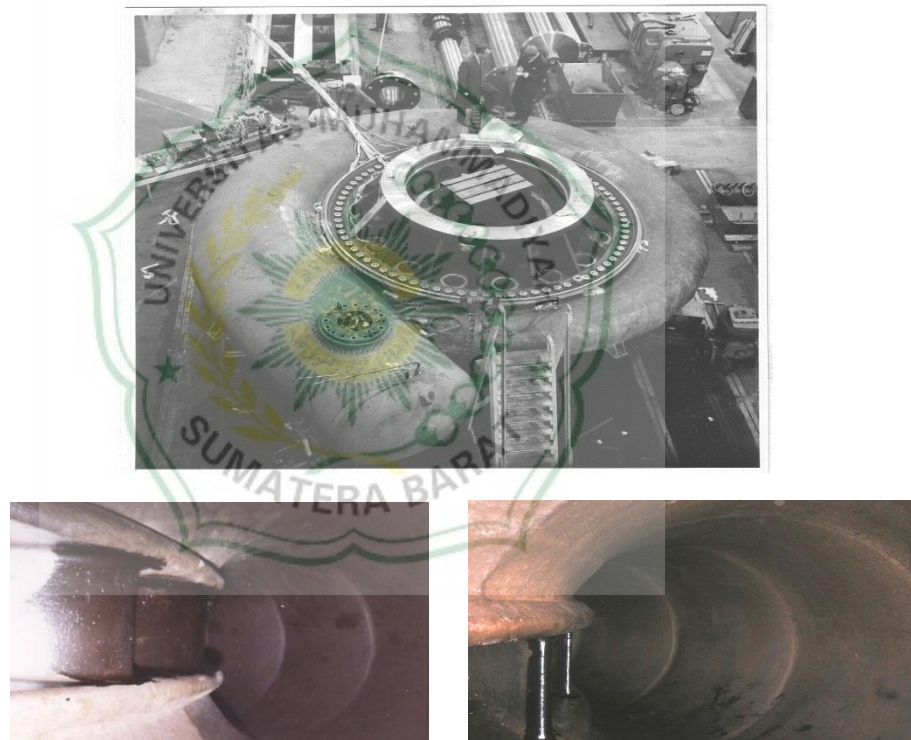
2. Kasing spiral (*spiral case*)

Bagian ini terdiri dari pipa baja yang mengelilingi *runner blade*, semakin ujung semakin mengecil sehingga disebut rumah siput. Hal ini bertujuan agar aliran air menjadi lebih cepat guna mendorong roda turbin berputar, disisi lain tekanan air didalamnya menjadi berkurang. Posisi dari *inlet spiral casing* tergantung pada saluran langsung air dari

penstock yang mungkin akan merubah keserasian penempatan (Bawono, n.d.)

Spiral case mempunyai 1 *manhole* dengan diameter 500mm dan tutupnya dirancang agar membuka kearah luar yang berfungsi untuk inspeksi didalam *spiral case*. Gantungan luar tutup *manhole* dan kaki-kaki gantungan terbuat dari baja. Disekeliling tutup *manhole* dilapisi karet dengan diamater ketebalan 6mm dan menyatu dengan mur dan baut untuk keperluan perapat (*sealing*).

Saat tutup *manhole* dibuka untuk pemeliharaan, karet pelapis tutup harus diganti dengan yang baru waktu tutup dipasang kembali untuk menjaga kekuatan *seal* yang baik.



Gambar 2.8. *Spiral casing*

2.2. Kavitas

2.2.1. Pengertian Kavitas

Kavitas berasal dari kata “*Cavus*” (Latin) yang berarti kosong (Arifin, 2017). Kavitas adalah suatu peristiwa terjadinya gelembung-gelembung uap di dalam aliran fluida apabila tekanan pada tempat-tempat tertentu lebih rendah dari tekanan uap fluida yang bersangkutan (ASHARI, 2019). Gelembung tersebut akan

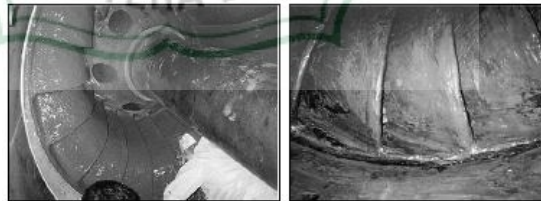
terbawa arus, apabila gelembung tersebut kemudian sampai di suatu daerah dimana tekanannya melebihi tekanan uap maka gelembung tersebut akan pecah secara tiba-tiba dan terjadi kondensasi dari uap tadi. Pecahnya gelembung-gelembung ini akan menghasilkan tekanan yang sangat tinggi (kadang-kadang mencapai 100 atm).

Proses kondensasi ini berlangsung sangat cepat ($t < 0,003$ detik), sehingga partikel-partikel cairan akan membentur permukaan dinding dari sudu, pipa atau elemen-elemen lainnya dengan kecepatan yang sangat tinggi dan menimbulkan getaran pada dinding tersebut.

2.2.2. Akibat Kavitasi

Dengan tekanan yang begitu tinggi pada peristiwa kavitasi sebagai akibatnya adalah sebagai berikut (Arifin, 2017):

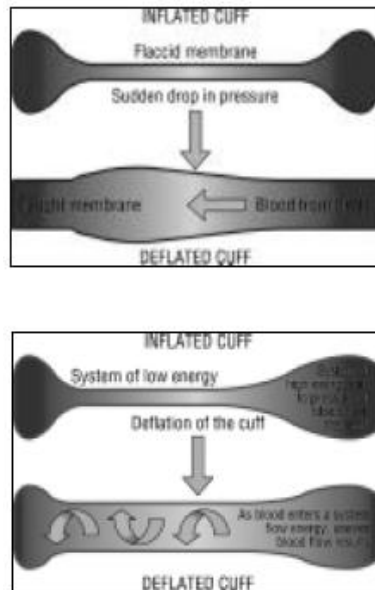
1. Menimbulkan suara yang sangat bising dan getaran-getaran yang sangat merusak instalasi turbin.
2. Mengikis bagian dalam pipa-pipa, permukaan *propeller* dan *runner*.
3. Akibat lebih parah *power swing* pada jaringan (tegangan turun naik).
4. Umur material menjadi pendek, berdampak kepada keandalan dan peningkatan biaya operasi dan pemeliharaan.
5. Menurunkan efisiensi dan daya turbin.



Gambar 2.9. Contoh kerusakan material akibat kavitasi

2.2.3. Daerah Rawan Kavitasi

Pada daerah aliran dalam pipa yang tidak rata, bersudut atau bercabang akan terjadi turbulensi dan dapat terjadi kavitasi. Contoh pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.10. Daerah rawan kavitasi

Pada daerah *runner*, sudu pengarah (*guide vane*) dan *draft tube*, kondisi yang cenderung terjadi kavitasi, maka bahan *guide vane* dan *runner* terbuat dari bahan yang keras dan tidak berkarat, serta *draft tube* dilapisi dengan cat anti karat.

2.2.4. Pencegahan Kavitasi

Untuk mencegah terjadinya kavitasi, maka perlu di ambil langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menghindarkan bentuk-bentuk yang tajam serta bergelombang sepanjang saluran instalasi.
2. Pemasangan letak instalasi yang tepat, yaitu letak turbin sedemikian rupa sehingga sesuai dengan perletakan antara *runner* dan *draft tube*.

Perletakan turbin bergantung pada:

- a. Spesifikasi *speed*-nya yang berkaitan dengan instalasi dan faktor Thoma (σ).
 - b. Ketinggian jatuh air.
 - c. Letak ketinggian turbin dari permukaan laut.
3. Mepergunakan material yang cukup kuat pada tempat-tempat dimana perkiraan kavitasi akan terjadi.

4. Memasang turbin pada tempat sebaik-baiknya, yaitu memperkecil jarak vertikal antara roda turbin dan permukaan air bawah (memperkecil tinggi isap).
5. Penambahan udara (*air injection system*).

2.2.5. Koefisien Kavitasasi

Mengenai koefisien kavitasasi (σ) perlu diterangkan lebih lanjut.

$$\sigma = \frac{H_b - H_s}{H} \quad \dots(2.1)$$

$$\text{dimana, } H_b = H_{atm} - H_v \quad \dots(2.2)$$

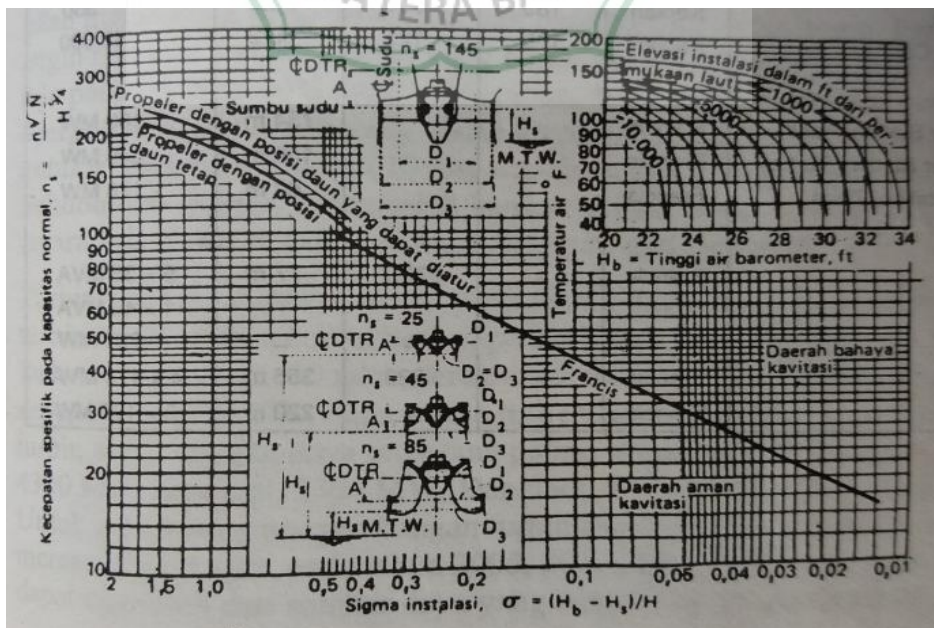
$$\text{sehingga, } \sigma = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H} \quad \dots(2.3)$$

Keterangan:

H_{atm} = tekanan atmosfer (m H₂O); tergantung dari lokasi atau ketinggian turbin dari permukaan air laut

H_v = tekanan uap air (m H₂O); tergantung dari temperatur rata-rata air pada turbin

H_s = tinggi isap (m H₂O); jarak vertikal dari permukaan air bawah sampai titik dimana tekanannya minimum (pada roda Francis berada pada dasar roda)



Gambar 2.11. Batas terendah dari sigma instalasi untuk menetapkan letak turbin

Gambar 2.11. menyatakan hubungan antara koefisien kavitasasi (σ) dan kecepatan spesifik (ns) yang diperoleh dari pengujian terhadap bermacam-macam turbin. Harga σ tersebut merupakan harga minimum (kritis) untuk instalasi turbin yang bersangkutan (ns tertentu), dimana di bawah harga tersebut besar kemungkinan terjadi kavitasasi. Jadi, untuk mencegah terjadinya kavitasasi, haruslah diusahakan supaya dalam segala keadaan, σ dari instalasi tidak lebih rendah daripada σ yang diperoleh dari grafik tersebut dalam Gambar 2.11.

Di sebelah kanan atas dari Gambar 2.11. dapat dicari harga H_b yang sesuai, sehingga dengan pertolongan persamaan (σ) dapatlah ditetapkan H_s yang maksimum. H_s yang negatif menunjukkan bahwa turbin (bagian dasar roda) harus berada di bawah permukaan air bawah (Gambar a). Sedangkan, H_s yang positif menunjukkan bahwa turbin (bagian dasar roda) harus berada di atas permukaan air bawah (Gambar b).



Gambar 2.12. Nilai H_s dan posisi turbin terhadap permukaan air bawah

2.2.6. Bangunan dan Peralatan Utama PLTA Batang Agam

A. Bangunan PLTA Batang Agam

Pada PLTA Batang Agam terdapat beberapa bangunan yang memiliki fungsi dan kegunaan masing-masing. Bangunan ini merupakan suatu kesatuan yang saling terkait antara satu dengan yang lainnya. Berikut ini adalah bangunan yang ada di PLTA Batang Agam:

1. Intake Weir (Pintu Air)



Gambar 2.13. *Intake weir*

Merupakan tempat pemasukan air dari sungai Batang Agam dengan debit air maksimum $13 \text{ m}^3/\text{s}$, Walaupun debit air sungai lebih dari maksimum yang dibutuhkan, akan tetapi *Intake Weir* secara otomatis tetap mengambil maksimum $13 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan luas penampang $5,4 \text{ m}^2$.

Data *intake weir* : Lebar 14 m, Elevasi dasar 677.00 m, Panjang screen 1 m, Tinggi screen 1 m, Lebar screen 70 mm, Tebal screen 12 mm.

2. *Tunnel I* (Terowongan I)



Gambar 2.14. Terowongan I

Dari *Intake Weir*, air disalurkan melalui terowongan I menuju ke *Sandtrap* (Kolam Pasir).

Data *tunnel I* : Panjang 175,5 m, Diameter 2,5 m, Volume Tunnel 13 m^3 .

3. *Sand Trap* (Kolam Pasir)



Gambar 2.15. Kolam pasir

Merupakan kolam yang berguna untuk menyaring pasir yang terbawa oleh air sungai Batang Agam , karena air yang dialirkan ke turbin harus bersih dari sampah dan pasir.

Data *sand trap* : Luas 7.000 m², Volume 20.000 m³

4. *Tunnel II* (Terowongam II)

Merupakan saluran yang menghubungkan air dari *Sand Trap* ke *Daily Pondage* (Kolam Tando).

Data *tunnel II*: Diameter 2,1 m, Luas 131 m², Volume *Tunnel II* 12 m³.

5. *Daily Pondage* (Kolam Tando)



Gambar 2.16. Kolam tando

Merupakan kolam penampungan yang berfungsi sebagai penampung air dari *Sand Trap* yang dialirkan melalui *tunnel III*.

Dalam kolam tando terdapat 3 bangunan:

1. *Inlet*, berfungsi sebagai pemasukan air dari terowongan II
2. *Spill Way*, berfungsi sebagai pelimpahan jika air kolam tando telah maksimum dan sebagai penguras jika sewaktu-waktu kolam dikuras atau dibersihkan
3. *Outlet*, berfungsi mengalirkan air menuju pembangkit

Data *Daily Pondage* : Luas 45.000 m², Volume 116.000 m³, Elevasi dasar 675 m dpl, Tinggi *Outlet* 675 m dpl – 684 m dpl.

6. *Tunnel III* (Terowongan III)

Tunnel III berfungsi untuk menyalurkan air dari *Outlet* kolam tando menuju *Surge Tank* (Kolam Peredam). Terowongan ini menembus bukit sepanjang 1.150 meter. Data *tunnel III*: Panjang 1080 m dan Diameter 2,2 m

7. *Surge Tank* (Tangki Peredam)



Gambar 2.17. *Surge tank*

Surge tank berfungsi untuk meredam pukulan air yang dapat menimbulkan tekanan balik bila debit air berubah secara mendadak. *Surge tank* juga berfungsi untuk menghilangkan gelembung-gelembung udara yang ada pada tekanan sebelum masuk ke dalam pipa pesat. Data *Surge Tank* : Tinggi 28 m, Diameter 8 m dan Elevasi dasar 631,1 mdpl.

8. *Valve Chamber* (bangunan Katup Utama)



Gambar 2.18. *Valve chamber*

Valve chamber ini dipasang antara ujung-ujung pipa pesat dengan sisi masuk turbin. Fungsi *valve chamber* untuk menutup aliran air yang masuk ke dalam turbin di saat turbin sedang dalam kondisi stop.

9. *Penstock* (Pipa Pesat)



Gambar 2.19. *Penstock*

Merupakan saluran yang berfungsi untuk mengalirkan air dari *surge tank* ke turbin. *Penstock* di atur dengan kemiringan sedemikian rupa, agar tekanan air dapat menghasilkan energi potensial yang disesuaikan dengan kekuatan turbin.

Data penstock : Elevasi awal 670,30 m dpl, Panjang 240 m, Elevasi akhir 581,30 m dpl, Kemiringan 70°

10. Power House



Gambar 2.20. Power house

11. Tail Race (Saluran Air Buang)



Gambar 2.21. Power house

Merupakan saluran akhir dari air PLTA dimana air yang mempunyai tekanan akan dialirkan keturbin, sehingga air akan memutar turbin. Sedangkan air yang tidak memiliki tekanan akan dialirkan drafttube dan selanjutnya akan di buang melalui tail race hingga kembali ke sungai Batang Agam.

B. Peralatan Utama PLTA Batang Agam

1. Turbin



Gambar 2.22. Turbin Francis

Turbin yang digunakan di PLTA Batang Agam ke tiga unit turbin *type Horizontal Shaft Francis* yaitu pada tiap unit 1, 2, dan 3 sama memiliki *Rated Speed* 750 rpm dan *Runaway Speed* 1330 rpm dengan Spesifikasi turbin :

Tabel 2.4. Spesifikasi turbin

Effective	Head	Output	Discharge
Maximum	98,7 m	3900 Kw	4,60 m ³ /s
Normal	90,8 m	3500 kW	4,49 m ³ /s
Minimum	89,0 m	3350 kW	4,40 m ³ /s

2. Generator



Gambar 2.23. Generator

Generator yang digunakan di PLTA Batang Agam AC Generator MEIDENSHA *type TC-AF NO OF PHASE 3 Frequency 50Hz* pada tiap unit 1, 2, dan 3 sama dengan Spesifikasi:

Tabel 2.5. Spesifikasi generator

UNIT	1	2	3
<i>Output</i>	4700 kVA	4700 kVA	4700 kVA
<i>Voltage</i>	6300 V	6300 V	6300 V
<i>Power Factor</i>	0,8	0,8	0,8
<i>Speed</i>	750 rpm	750 rpm	750 rpm
<i>Class Of Insulation</i>	B	B	B
<i>Current</i>	431 A	431 A	431 A
<i>Excitation Voltage</i>	105 V	105 V	105 V
<i>Field Current</i>	454 A	454 A	454 A
Tahun Pembuatan	1975	1975	1980

3. Transformator



Gambar 2.24. Transformator

Transformator yang digunakan PLTA Batang Agam Yaitu Schneider MGA dengan Spesifikasi :

Tabel 2.6. Spesifikasi transformator

Merk	: SCHNEIDER
Type	: MGA – 042
Daya	: 6500/ 6500 kVA
Tegangan	: 6300 / 21000 V
Frequency	: 50 Hz
Phase / Vektor Group	: 3 / YNd5
Tahun Pembuatan	: 2013
Tahun Operasi	: 2013

4. Governor

Governor adalah suatu alat yang berfungsi mengatur putaran turbin tetap konstan walaupun kondisi beban berbeda-beda. Governor terdiri dari motor pendulum, servo motor, dll. Governor terbagi menjadi tiga jenis yaitu: Governor digital, Governor mekanik dan Governor automatic. Governor yang digunakan di PLTA Batang Agam adalah governor automatic.

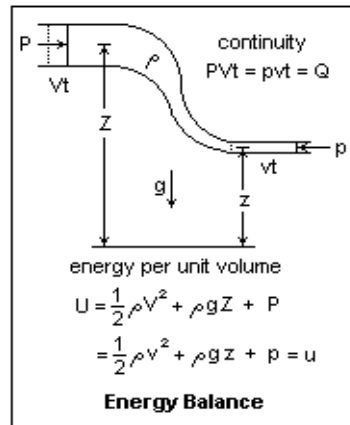


Gambar 2.25. Governor

2.3. Persamaan yang Mendukung Penelitian

2.3.6. Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli bermula dari suatu persamaan energi fluida *incompressible* dalam aliran *steady* yang menyatakan bahwa total yang berpartisipasi adalah tetap sepanjang satuan jarak.



Gambar 2.26. *Energy balance*

Pada aliran air dalam pipa diambil suatu selisih ketinggian 2 antara tinggi air atas dan air bawah maka menurut Bernoulli aliran tersebut memiliki persamaan energi, yaitu:

$W = \text{Energi potensial} + \text{Energi kinetik} + \text{Energi tekanan}$ yang besarnya konstan

$$W = m \cdot g \cdot z + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + p \cdot V = \text{konstan} \quad \dots(2.4)$$

Kemudian dari persamaan energi di atas dibagi m maka didapat persamaan energi spesifik:

$$\frac{W}{m} = \frac{m \cdot g \cdot z_1 + p_1 \cdot V_1 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2}{m} = \frac{m \cdot g \cdot z_2 + p_2 \cdot V_2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2}{m}$$

$$\frac{W}{m} = \frac{m \cdot g \cdot z_1}{m} + \frac{p_1 \cdot V_1}{m} + \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2}{m} = \frac{m \cdot g \cdot z_2}{m} + \frac{p_2 \cdot V_2}{m} + \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2}{m} \quad \dots(2.5)$$

Karena $p \cdot V = \text{konstan}$, sehingga $V_1 = V_2$ maka:

$$w = g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad \dots(2.6)$$

Kemudian dari persamaan energi spesifik dibagi g sehingga didapat persamaan ketinggian:

$$\frac{w}{g} = \frac{g \cdot z_1}{g} + \frac{p_1}{g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{g \cdot z_2}{g} + \frac{p_2}{g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad \dots(2.7)$$

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad \dots(2.8)$$

Syarat berlakunya hukum Bernoulli:

1. Alirannya *Steady*
2. Fluida *Incompressible*
3. *Non Viscous*
4. Aliran fluida searah dengan kecepatan

Untuk hubungannya dengan turbin semakin tinggi (z) maka energi potensial yang dihasilkan semakin besar sehingga akan berpengaruh pada energi kinetik dalam menabrak sudu. Dengan bertambahnya energi kinetik yang menabrak sudu maka putaran yang dihasilkan akan semakin besar

2.3.7. Persamaan *Head* Efektif

Head efektif disini adalah tinggi air jatuh efektif (tinggi air jatuh bersih) suatu turbin air yang merupakan selisih dari *head* air atas dengan *head* air bawah. *Head* di sini adalah penjumlahan *head* tekanan, *head* kecepatan dan *head* elevasi. Persamaan *head* efektif diperoleh dari selisih persamaan ketinggian dalam persamaan Bernoulli.

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad \dots(2.9)$$

$$H = H_1 = H_2$$

Maka *head* efektif adalah selisih H_1 dengan H_2 :

$$H_{eff} = H_1 = H_2 \quad \dots(2.10)$$

$$H_{eff} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad \dots(2.11)$$

2.3.8. Persamaan Kecepatan Spesifik

Kecepatan spesifik turbin merupakan kecepatan turbin dimana dapat dihasilkan untuk setiap tinggi air jatuh (H). Dengan diketahuinya kecepatan spesifik maka perencanaan dan pemilihan jenis turbin menjadi lebih mudah. Dan juga dapat digunakan untuk mengetahui tingkat kavitasi pada turbin dengan cara menghubungkan kecepatan spesifik dengan koefisien kavitasi.

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{(H)^{5/4}} \quad \dots(2.12)$$

2.3.9. Persamaan Koefisien Kavitasi

Koefisien kavitasi adalah suatu nilai yang menunjukkan bahwa apakah suatu turbin memasuki daerah bahaya kavitasi atau daerah aman kavitasi. Sehingga nantinya bisa dibandingkan dengan kecepatan spesifik untuk mengetahui tingkat kavitasi. Koefisien kavitasi dinotasikan dengan bilangan Thoma (σ). Berikut persamaan koefisien kavitasi seperti persamaan:

$$\sigma = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H} \quad \dots(2.13)$$

Keterangan:

σ = Bilangan Thoma

H_{atm} = tekanan atmosfer (m H₂O); tergantung dari lokasi atau ketinggian turbin dari permukaan air laut

H_v = tekanan uap air (m H₂O); tergantung dari temperatur rata-rata air pada turbin

H_s = tinggi isap (m H₂O); jarak vertikal dari permukaan air bawah sampai titik dimana tekanannya minimum (pada roda Francis berada pada dasar roda)

H = tinggi jatuh efektif (m)



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Pengambilan Data

Pengambilan data untuk kepentingan penelitian dilakukan 3 hari yaitu pada tanggal 28-30 Juni 2021 di PT. PLN (Persero) Unit Pembangkitan (UPK) Bukittinggi, PLTA Batang Agam. Studi pustaka dilakukan di PLTA Batang Agam dengan mengambil data dari buku manual terkait, data yang ada *Control Room*, serta silabus yang berkaitan dengan penelitian.

3.2. Data Penelitian

Agar terlaksananya penelitian dengan baik untuk menghitung tingkat kavitasi turbin Francis unit 3 PLTA Batang Agam dibutuhkan data berikut:

1. Debit air permukaan waduk / kolam tando (Q_1)
2. Debit air masuk turbin (Q_2)
3. Tekanan permukaan air waduk (p_1)
4. Tekanan pada *draft tube* (p_2)
5. Elevasi permukaan air waduk (z_1)
6. Elevasi air keluar turbin (z_2)
7. Elevasi *tail race*
8. Diameter permukaan air waduk (D_1)
9. Diameter *outlet* turbin (D_2)
10. Putaran turbin (n)
11. Daya Generator (P_1)

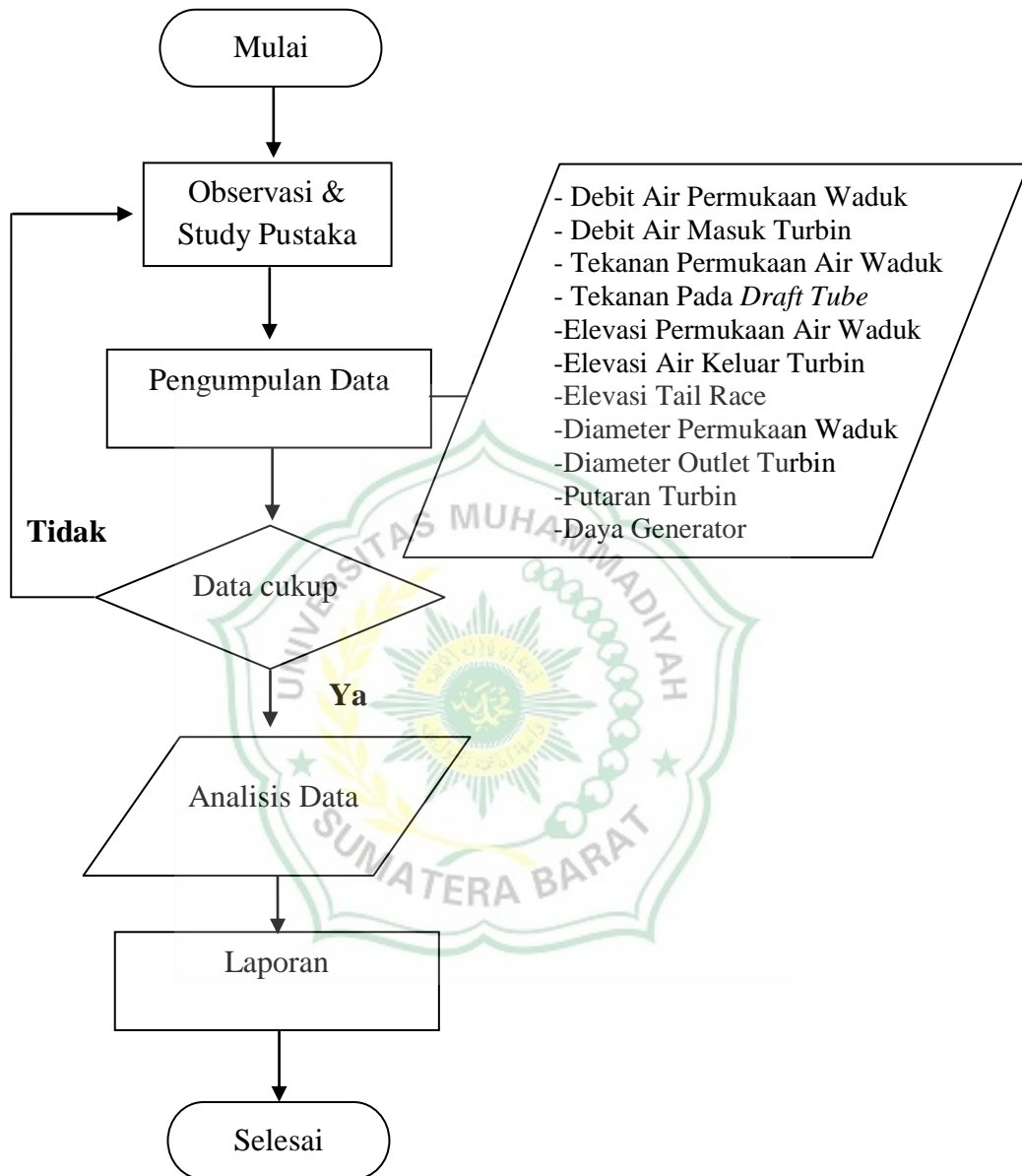
3.3. Metode Analisis Data

Metode pengolahan data yang digunakan dalam penelitian ini ialah metode analisis perhitungan dengan menggunakan persamaan-persamaan yang bersumber dari pustaka, adapun persamaan yang digunakan ialah:

1. Persamaan Bernoulli
2. *Head* Efektif (H_{eff})

3. Kecepatan Spesifik (n_s)
4. Koefisien Kavitasasi/Angka Thoma (σ)

3.4. Diagram Alir



BAB IV DATA DAN ANALISIS

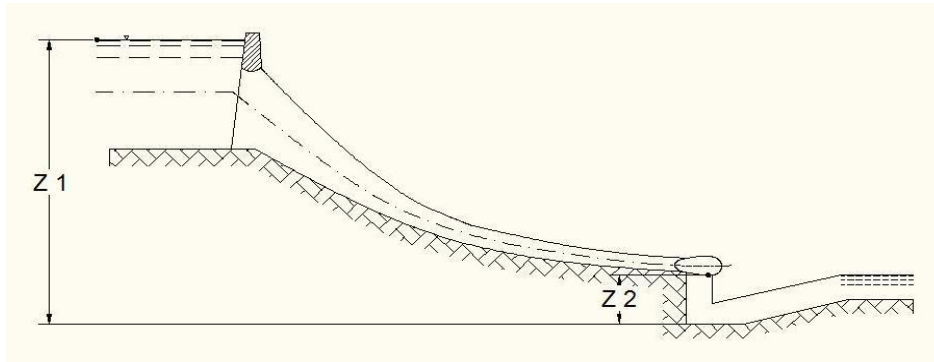
4.1. Data yang Diperoleh dan Contoh Perhitungan

Berdasarkan data yang telah di peroleh dari PLTA Batang Agam maka akan di lakukan analisis perhitungan *head* efektif, kecepatan spesifik turbin dan koefisien kavitasi

4.1.1. *Head* Efektif (H_{eff})

Tabel 4.1. Data hasil observasi di PLTA Batang Agam

Data	Nilai
Masa jenis air (ρ_{air})	997,1 kg/m ³
Percepatan grafitasi (g)	9,81 m/s
Luas permukaan Waduk (A_1)	45000 m ²
Diameter <i>inlet draft tube</i> (D_2)	810 mm (0.81 m)
Debit permukaan air waduk (Q_1)	0 m ³ /s
Debit air masuk turbin (Q_2)	
700 kW	0.9 m ³ /s
1800 kW	2.4 m ³ /s
2000 kW	2.7 m ³ /s
2300 kW	3.1 m ³ /s
2500 kW	3.4 m ³ /s
2800 kW	3.7 m ³ /s
3000 kW	4.1 m ³ /s
3500 kW	4.81 m ³ /s
Tekanan permukaan air waduk (p_1)	0 N/m ²
Tekanan pada <i>draft tube</i> (p_2)	-0,4 kg/cm ² (-4000 N/m ²)
Elevasi permukaan air waduk (z_1)	683.00 Mdpl
Elevasi sensor tekanan <i>draft tube</i> (z_2)	582.70 Mdpl



Gambar 4.1. Skema elevasi permukaan waduk dan elevasi *tail race*

Dari data D_2 di peroleh data luas penampang draft tube

$$(A_2) = 0,25 \pi D_2^2 = 0,25 \times 3,14 \times (0,81\text{m})^2 = 0,5150 \text{ m}^2$$

Untuk bisa menghitung *head* efektif maka di perlukan data kecepatan awal dan kecepatan akhir. Maka dari data di atas kita memperoleh kecepatan tersebut.

Perhitungan kecepatan :

$$v_1 = \left(\frac{Q_1}{A_1} \right) = \left(\frac{0 \text{ m}^3/\text{s}}{45000 \text{ m}^2} \right) = 0 \text{ m/s}$$

$$v_2 \text{ untuk beban } 700 \text{ kW} : v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{0,9 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5150 \text{ m}^2} \right) = 1,7476 \text{ m/s}$$

$$v_2 \text{ untuk beban } 1800 \text{ kW} : v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{2,4 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5150 \text{ m}^2} \right) = 4,660 \text{ m/s}$$

$$v_2 \text{ untuk beban } 2000 \text{ kW} : v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{2,7 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5150 \text{ m}^2} \right) = 5,2427 \text{ m/s}$$

$$v_2 \text{ untuk beban } 2300 \text{ kW} : v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{3,1 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5150 \text{ m}^2} \right) = 6,0194 \text{ m/s}$$

$$v_2 \text{ untuk beban } 2500 \text{ kW} : v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{3,4 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5150 \text{ m}^2} \right) = 6,6019 \text{ m/s}$$

$$v_2 \text{ untuk beban 2800 kW : } v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{3,7 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5150 \text{ m}^2} \right) = 7,1845 \text{ m/s}$$

$$v_2 \text{ untuk beban 3000 kW : } v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{4,1 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5150 \text{ m}^2} \right) = 7,9611 \text{ m/s}$$

$$v_2 \text{ untuk beban 3500 kW : } v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{4,81 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5150 \text{ m}^2} \right) = 9,3398 \text{ m/s}$$

Perhitungan *head* efektif :

1. Perhitungan *Head* efektif beban 700 kW

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{997,1 \times 9,81} \right) + \left(\frac{0^2 - 1,7476^2}{2 \times 9,81} \right) + (683,00 - 582,70)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{4000}{9781,551} \right) + \left(\frac{0 - 3,054}{19,620} \right) + (100,30)$$

$$H_{eff} = (0,4089) + (-0,1557) + (100,30)$$

$$H_{eff} = 100,55 \text{ m}$$

2. Perhitungan *Head* efektif beban 1800 kW

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{997,1 \times 9,81} \right) + \left(\frac{0^2 - 4,6602^2}{2 \times 9,81} \right) + (683,00 - 582,70)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{4000}{9781,551} \right) + \left(\frac{0 - 21,7175}{19,620} \right) + (100,30)$$

$$H_{eff} = (0,4089) + (-1,1069) + (100,30)$$

$$H_{eff} = 99,602 \text{ m}$$

3. Perhitungan *Head* efektif beban 2000 kW

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{997,1 \times 9,81} \right) + \left(\frac{0^2 - 5,2427^2}{2 \times 9,81} \right) + (683,00 - 582,70)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{4000}{9781,551} \right) + \left(\frac{0 - 27,4859}{19,620} \right) + (100,30)$$

$$H_{eff} = (0,4089) + (-1,4009) + (100,30)$$

$$H_{eff} = 99,31 \text{ m}$$

4. Perhitungan *Head* efektif beban 2300 kW

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{997,1 \times 9,81} \right) + \left(\frac{0^2 - 6,0194^2}{2 \times 9,81} \right) + (683,00 - 582,70)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{4000}{9781,551} \right) + \left(\frac{0 - 36,2332}{19,620} \right) + (100,30)$$

$$H_{eff} = (0,4089) + (-1,8467) + (100,30)$$

$$H_{eff} = 98,86 \text{ m}$$

5. Perhitungan *Head* efektif beban 2500 kW

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{997,1 \times 9,81} \right) + \left(\frac{0^2 - 6,6019^2}{2 \times 9,81} \right) + (683,00 - 582,70)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{4000}{9781,551} \right) + \left(\frac{0 - 43,5850}{19,620} \right) + (100,30)$$

$$H_{eff} = (0,4089) + (-2,2214) + (100,30)$$

$$H_{eff} = 98,4875 \text{ m}$$

6. Perhitungan *Head* efektif beban 2800 kW

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{997,1 \times 9,81} \right) + \left(\frac{0^2 - 7,1845^2}{2 \times 9,81} \right) + (683,00 - 582,70)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{4000}{9781,551} \right) + \left(\frac{0 - 51,6170}{19,620} \right) + (100,30)$$

$$H_{eff} = (0,4089) + (-2,6308) + (100,30)$$

$$H_{eff} = 98,08 \text{ m}$$

7. Perhitungan *Head* efektif beban 3000 kW

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{997,1 \times 9,81} \right) + \left(\frac{0^2 - 7,9611^2}{2 \times 9,81} \right) + (683,00 - 582,70)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{4000}{9781,551} \right) + \left(\frac{0 - 63,3797}{19,620} \right) + (100,30)$$

$$H_{eff} = (0,4089) + (-3,2303) + (100,30)$$

$$H_{eff} = 97,48 \text{ m}$$

8. Perhitungan *Head* efektif beban 3500 kW

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{997,1 \times 9,81} \right) + \left(\frac{0^2 - 9,3398^2}{2 \times 9,81} \right) + (683,00 - 582,70)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{4000}{9781,551} \right) + \left(\frac{0 - 87,2319}{19,620} \right) + (100,30)$$

$$H_{eff} = (0,4089) + (-4,4461) + (100,30)$$

$$H_{eff} = 96,26 \text{ m}$$

4.1.2. Kecepatan Spesifik Turbin

Tabel 4.2. Data untuk perhitungan kecepatan spesifik

Putaran nominal turbin (n)	750 rpm
Daya turbin (p_t)	700 kW
	1800 kW
	2000 kW
	2300 kW
	2500 kW
	2800 kW
	3000 kW
	3500 kW
$Head$ efektif (H_{eff})	100,5 m
	99,6 m
	99,31 m
	98,86 m
	98,49 m
	98,08 m
	97,48 m
	96,26 m

Perhitungan Kecepatan Spesifik Turbin :

1. Beban 700 kW

$$n_s = \frac{n \sqrt{p_t}}{(H_{eff})^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750 \sqrt{700}}{(100,55)^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750 \times 26,547}{318,403}$$

$$n_s = 62,318 \text{ rpm}$$

2. Beban 1800 kW

$$n_s = \frac{n\sqrt{p_t}}{(H_{eff})^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750\sqrt{1800}}{(99,60)^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750 \times 42,426}{314,655}$$

$$n_s = 101,126 \text{ rpm}$$

3. Beban 2000 kW

$$n_s = \frac{n\sqrt{p_t}}{(H_{eff})^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750\sqrt{2000}}{(99,308)^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750 \times 44,7213}{313,494}$$

$$n_s = 106,990 \text{ rpm}$$

4. Beban 2300 kW

$$n_s = \frac{n\sqrt{p_t}}{(H_{eff})^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750\sqrt{2300}}{(98,86)^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750 \times 47,958}{311,727}$$

$$n_s = 115,385 \text{ rpm}$$

5. Beban 2500 kW

$$n_s = \frac{n\sqrt{p_t}}{(H_{eff})^{5/4}}$$
$$n_s = \frac{750\sqrt{2500}}{(98,49)^{5/4}}$$
$$n_s = \frac{37.500}{314,655}$$
$$n_s = 120,886 \text{ rpm}$$

6. Beban 2800 kW

$$n_s = \frac{n\sqrt{p_t}}{(H_{eff})^{5/4}}$$
$$n_s = \frac{750\sqrt{2800}}{(98,08)^{5/4}}$$
$$n_s = \frac{750 \times 52,915}{314,655}$$
$$n_s = 101,126 \text{ rpm}$$

7. Beban 3000 kW

$$n_s = \frac{n\sqrt{p_t}}{(H_{eff})^{5/4}}$$
$$n_s = \frac{750\sqrt{3000}}{(97,48)^{5/4}}$$
$$n_s = \frac{750 \times 54,77}{306,298}$$
$$n_s = 134,115 \text{ rpm}$$

8. Beban 3500 kW

$$n_s = \frac{n\sqrt{P_t}}{(H_{eff})^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750\sqrt{3500}}{(96,26)^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{750 \times 59,160}{301,513}$$

$$n_s = 147,158 \text{ rpm}$$

4.1.3. Koefisien Kavitas

Tabel 4.3. Data untuk perhitungan koefisien kavitas

Data	Nilai	Keterangan
Tekanan atmosfer (H_{atm})	9,62 m	Tabel hubungan antara tinggi di atas permukaan laut dan tekanan atmosfer (tinggi turbin dari permukaan laut 581,30 Mdpl)
Tekanan uap air di sisi runner (H_v)	0,32 m	Tabel hubungan antara suhu air dan tekanan uap (suhu air 25°C)
Tinggi hisap (H_s)	-1,4 m	$H_s =$ tinggi turbin – tinggi tailrace (581,30 – 582,70)
Head efektif (H_{eff})	100,55 m 99,60 m 99,31 m 98,86 m 98,49 m 98,08 m 97,48 m 96,26 m	Hasil perhitungan di atas

Perhitungan Koefisien Kavitas :

$$\sigma = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H_{eff}}$$

1. Beban 700 kW

$$\sigma = \frac{9,62 - 0,32 - (-1,4)}{100,55} = 0,106414$$

2. Beban 1800 kW

$$\sigma = \frac{9,62 - 0,32 - (-1,4)}{99,602} = 0,107429$$

3. Beban 2000 kW

$$\sigma = \frac{9,62 - 0,32 - (-1,4)}{99,31} = 0,107747$$

4. Beban 2300 kW

$$\sigma = \frac{9,62 - 0,32 - (-1,4)}{98,86} = 0,108233$$

5. Beban 2500 kW

$$\sigma = \frac{9,62 - 0,32 - (-1,4)}{98,49} = 0,108643$$

6. Beban 2800 kW

$$\sigma = \frac{9,62 - 0,32 - (-1,4)}{98,08} = 0,109094$$

7. Beban 3000 kW

$$\sigma = \frac{9,62 - 0,32 - (-1,4)}{97,48} = 0,109768$$

8. Beban 3500 kW

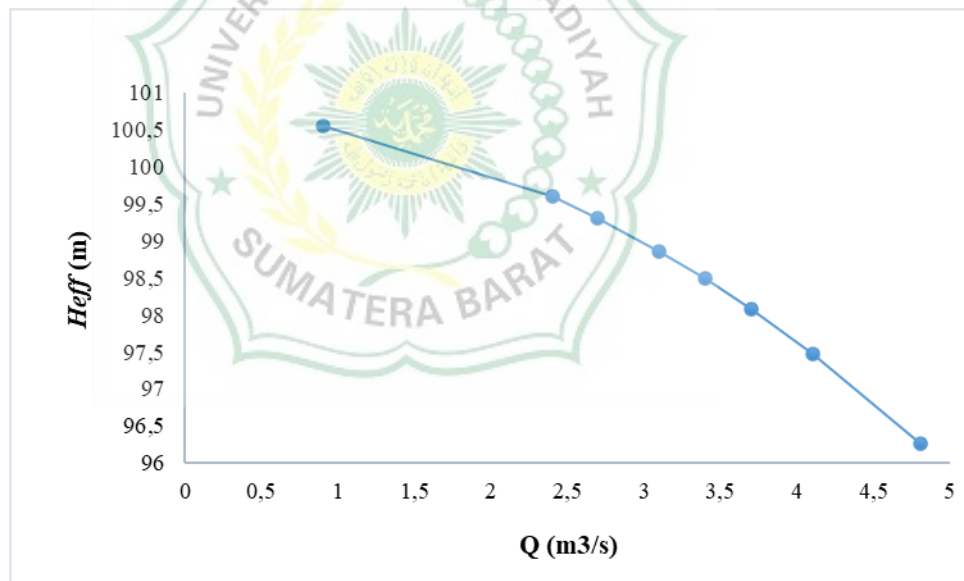
$$\sigma = \frac{9,62 - 0,32 - (-1,4)}{96,26} = 0,111157$$

4.2. Data Hasil Perhitungan dan Analisa

4.2.1. Perbandingan Debit Air Masuk Turbin dan *Head* Efektif

Tabel 4.4. Data perbandingan debit air masuk turbin dan *head* efektif

No.	Q (m ³ /s)	H_{eff} (m)
1	0,9	100,55
2	2,4	99,60
3	2,7	99,31
4	3,1	98,86
5	3,4	98,49
6	3,7	98,08
7	4,1	97,48
8	4,8	96,26



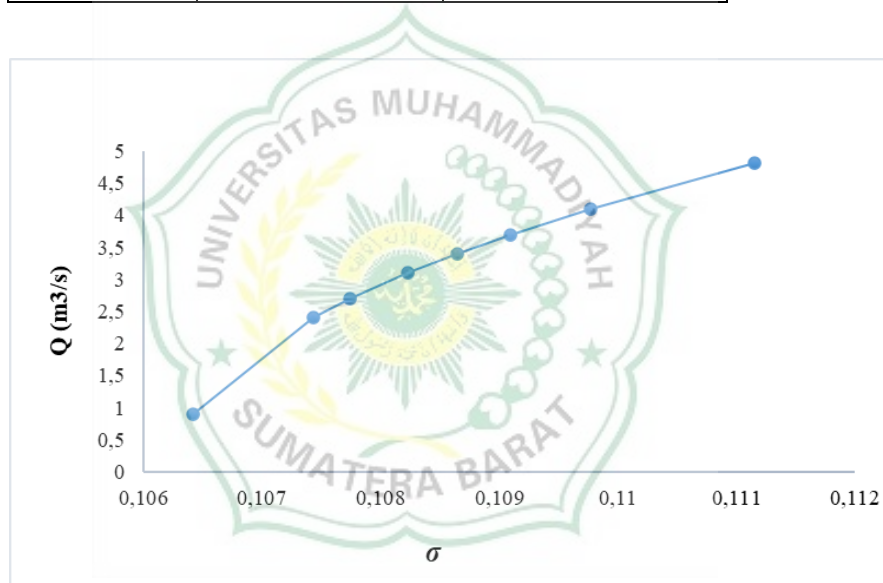
Gambar 4.2. Grafik perbandingan debit air masuk turbin dan *head* efektif

Berdasarkan Gambar 4.2. dapat diketahui *head* efektif menurun jika debit naik dan berlaku sebaliknya. *Head* efektif tertinggi berada di 100,55 m dengan debit pada 0,9 m³/s. Sedangkan *head* efektif terendah berada pada 96,26 m dengan debit sebesar 4,8 m³/s.

4.2.2. Perbandingan Koefisien Kavitasasi dan Debit Air Masuk Turbin

Tabel 4.5. Data perbandingan koefisien dan debit air masuk turbin

No.	σ	Q (m ³ /s)
1	0,106414	0,9
2	0,107429	2,4
3	0,107745	2,7
4	0,108233	3,1
5	0,108643	3,4
6	0,109094	3,7
7	0,109768	4,1
8	0,111157	4,8



Gambar 4.3. Grafik perbandingan koefisien kavitasasi dan debit air masuk turbin

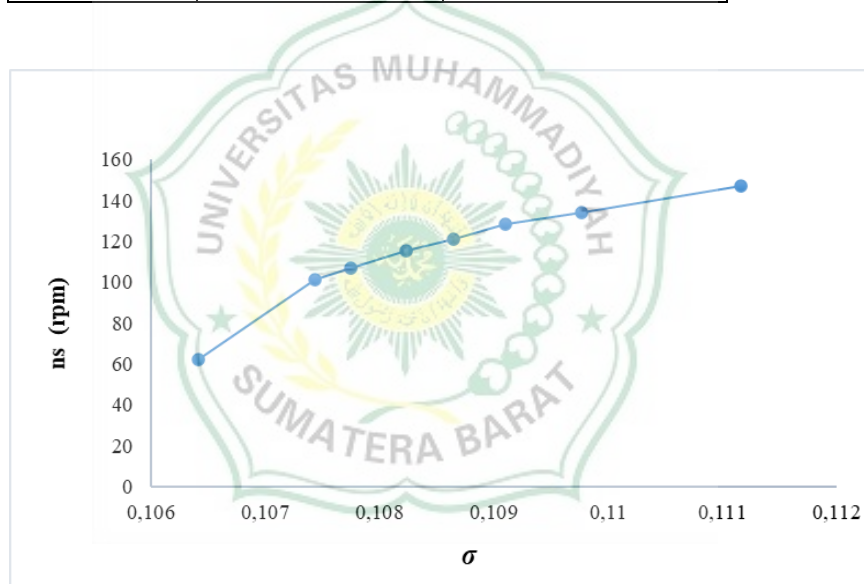
Berdasarkan Gambar 4.3. dapat diketahui koefisien kavitasasi meningkat saat debit naik dan berlaku sebaliknya. Koefisien kavitasasi terbesar ditunjukkan oleh nilai 0,111157 dengan debit air masuk turbin 4,8 m³/s. Sedangkan koefisien kavitasasi terkecil pada 0,106414 dengan debit sebesar 0,9 m³/s.

Koefisien kavitasasi yang yang tinggi menandakan tingkat kavitasasi kecil, maksudnya kemungkinan terjadinya kavitasasi semakin rendah. Sebaliknya koefisien kavitasasi yang tinggi menandakan tingkat kavitasasi besar, maksudnya kemungkinan terjadinya kavitasasi semakin tinggi.

4.2.3. Perbandingan Koefisien Kavitasi dan Kecepatan Spesifik

Tabel 4.6. Data perbandingan koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik

No.	σ	n_s (rpm)
1	0,106414	62,318
2	0,107429	101,126
3	0,107745	106,990
4	0,108233	115,385
5	0,108643	120,866
6	0,109094	128,578
7	0,109768	134,115
8	0,111157	147,158



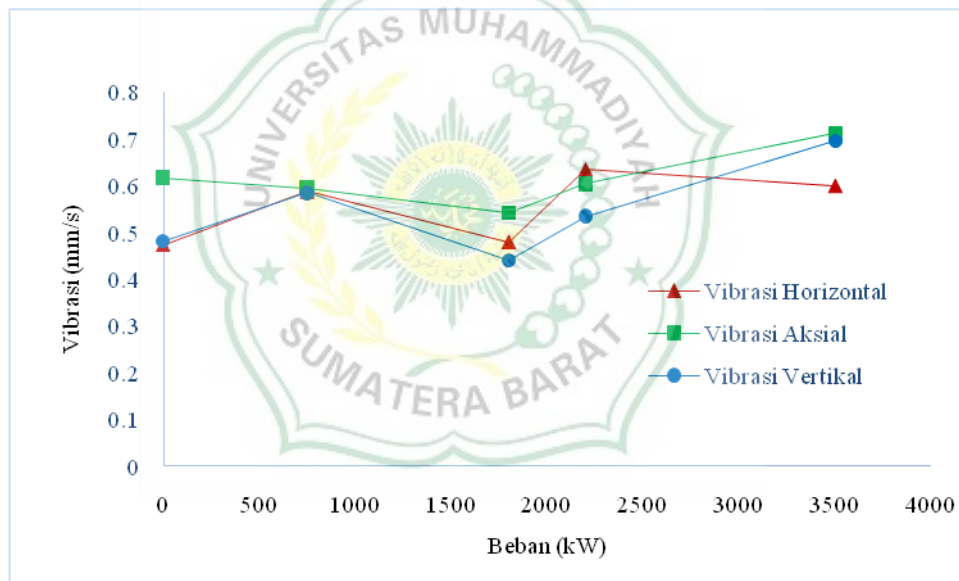
Gambar 4.4. Grafik perbandingan koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik

Pada Gambar 4.4. dapat dilihat kecepatan spesifik berbanding lurus dengan koefisien kavitasi. Koefisien kavitasi terbesar berada di nilai 0,111157 dengan kecepatan spesifik sebesar 147,158 rpm. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil dengan nilai 0,106414 dengan kecepatan spesifik 62,318 rpm. Kesimpulan yang didapatkan adalah tingginya tingkat kavitasi dipengaruhi oleh koefisien kavitasi yang kecil, sehingga kemungkinan memasuki bahaya kavitasi lebih besar dan berlaku sebaliknya.

Berdasarkan grafik di atas didapatkan hasil bahwa dalam pengoperasiannya PLTA Batang Agam unit 3 hampir memasuki daerah bahaya kavitas sehingga kemungkinan mengalami kavitas. Hal ini dibuktikan dengan turbin generator yang juga mengalami vibrasi akibat adanya kavitas turbin.

Tabel 4.7. Data hasil pengukuran vibrasi

Beban (kW)	Velocity Horizontal (mm/s rms)	Velocity Vertikal (mm/s rms)	Velocity Aksial (mm/s rms)
0	0,474	0,483	0,618
750	0,588	0,568	0,596
1800	0,480	0,442	0,543
2200	0,635	0,536	0,605
3500	0,474	0,697	0,713



Gambar 4.5. Grafik data hasil pengukuran vibrasi

Untuk mencegah terjadinya kavitas yang lebih besar dimana nantinya akan mengakibatkan turbin mengalami kerusakan atau meningkatnya vibrasi turbin generator diperlukan pola pengoperasian yang disesuaikan dengan batas-batas teoritis, yaitu pengoperasian turbin pada kondisi:

1. Tidak boleh kurang dari 700 kW (di bawah beban minimumnya).

2. Pengaturan debit air masuk turbin, elevasi waduk dan elevasi *tail race*) yang aman kavitasi (perlu dianalisa lebih lanjut).



BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa yang telah dilakukan pada BAB IV maka dapat disimpulkan:

1. Nilai *head* efektif berbanding terbalik dengan debit air yang masuk ke dalam turbin. *Head* efektif tertinggi berada di 100,55 m dengan debit pada 0,9 m³/s. Sedangkan *head* efektif terendah berada pada 96,26 m dengan debit sebesar 4,8 m³/s.
2. Koefisien kavitasi yang didapatkan berbanding lurus dengan debit air masuk turbin. Koefisien kavitasi terbesar ditunjukkan oleh nilai 0,111157 dengan debit air masuk turbin 4,8 m³/s. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil pada 0,106414 dengan debit sebesar 0,9 m³/s.
3. Koefisien kavitasi yang didapatkan berbanding lurus dengan kecepatan spesifik. Koefisien kavitasi terbesar berada di nilai 0,111157 dengan kecepatan spesifik sebesar 147,158 rpm. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil dengan nilai 0,106414 dengan kecepatan spesifik 62,318 rpm.
4. Turbin unit 3 PLTA Batang Agam telah mengalami kavitasi berdasarkan analisa yang ditunjukkan oleh nilai koefisien kavitasi serta kecepatan spesifiknya.
5. Tingkat kavitasi kecil atau masih dalam daerah aman kavitasi sehingga tidak mengakibatkan kerusakan yang besar terhadap *runner* dan turbin.

5.2. Saran

Pada skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu dibutuhkan saran agar penelitian selanjutnya dapat menjadi lebih baik. Beberapa hal yang dapat disarankan adalah sebagai berikut:

1. Meminimalisir terjadinya kavitasi yang besar sehingga nantinya dapat berakibat kerusakan pada *runner* dan turbin maka diperlukan pola pengoperasian yang disesuaikan dengan batas-batas teoritis, yaitu pengoperasian turbin pada kondisi:

- a. Tidak dioperasikan dibawah beban minimum (tidak kurang dari 700 kW)
 - b. Pengaturan pada debit air masuk turbin, elevasi waduk dan elevasi *tail race* (pembukaan pintu *tail race*) yang aman kavitasi (perlu dianalisa lebih lanjut).
2. Sebaiknya tidak hanya berpatok kepada kavitasi untuk tingginya tingkat vibrasi karna masih terdapat faktor penyebab lain

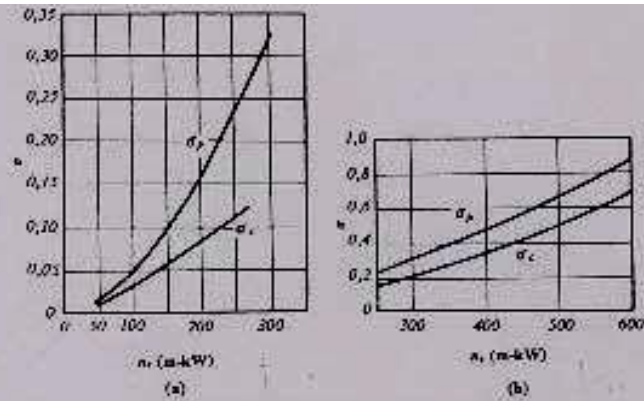


DAFTAR PUSTAKA

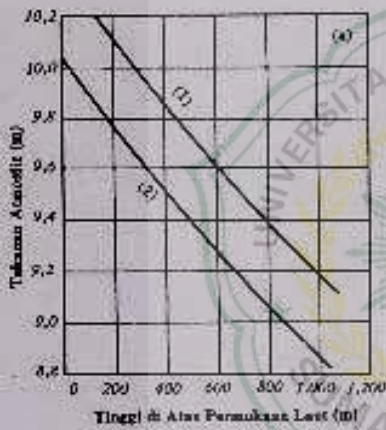
- Arifin, M. (2017). *Analisa Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasi pada Turbin Francis di PT PJB Unit Pembangkitan Brantas Unit PLTA Sutami*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aryanto, F., Mara, M., & Nuarsa, M. (2013). Pengaruh kecepatan angin dan variasi jumlah sudu terhadap unjuk kerja turbin angin poros horizontal. *Dinamika Teknik Mesin: Jurnal Keilmuan dan Terapan Teknik Mesin*, 3(1).
- Ashari, O. R. (2019). *Pengaruh Aspek Rasio Diameter Pipa Hantar Dengan Diameter Tabung Kompresi Terhadap Unjuk Kerja Pompa Hidram Pada Sumur Artesis*. Universitas Panca Marga Probolinggo.
- Biantoro, T. (2016). *Analisa Kavitasi Yang Terjadi Pada Turbin Francis Di PLTA Pb Soedirman*. Universitas Gadjah Mada.
- Chisnagara, & Mohamad, A. (2020). *TA: Pengujian Performa Sistem Plt Pico Hydro Yang Menggunakan Turbin Kaplan Poros Horizontal*. Institut Teknologi Nasional Bandung.
- Dewanto, H. P., Himawanto, D. A., & Cahyono, S. I. (2018). Pembuatan dan pengujian turbin propeller dalam pengembangan teknologi pembangkit listrik tenaga air piko hidro (PLTA-PH) dengan variasi debit aliran. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 12(2), 54-62.
- Irawan, H., & Syamsuri, S. (2018). Analisis Performansi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air Jenis Turbin Pelton Dengan Variasi Buka-an Katup Dan Beban Lampu Menggunakan Inverter. *JHP17: Jurnal Hasil Penelitian*, 3(01).
- Kusuma, D. D. (2011). Karakteristik unjuk Kerja Turbin Francis pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Terhadap Perubahan Kapasitas Aliran.
- Laksmiana, S. C., & Akbar, A. (2018). Pengaruh Sudut Pengarah Aliran pada Turbin Air Crossflow tingkat Dua Terhadap Putaran dan Daya. *REM (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 3(1), 35-39.
- Mashuri, M. (2011). *Pengaruh Variasi Head Terhadap Tingkat Kavitasi Pada Turbin Francis Poros Horizontal*. Universitas Brawijaya.
- Rakhasiwi, W. G. (2020). *Analisis Pengaruh Beban Operasi Terhadap Tingkat Kavitasi Turbin Francis Vertikal Di Pt Pln (Persero) Unit Pengendalian Pembangkitan Bengkulu, Unit Iii Plta Musi*. 021008 Universitas Tridianti.
- Sudradjat, A., Bintoro, C., & Widiantoro, H. (2010). *Substitusi Material Komposit Pada Runner Turbin Francis (Composite Material Substitution on Runner Francis Turbine)*. Paper presented at the Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar.



Hubungan antara kecepatan spesifik (n_s) dan koefisien kavitasi (σ)



Gbr. 41 Hubungan antara σ dan n_s untuk:
(a) Turbin Francis
(b) Turbin Kaplan



Gbr. 42(a)
Hubungan antara
Tinggi di atas Per-
mukaan Laut dan
Tekanan Atmosfir.

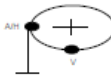
Gbr. 42(b)
Hubungan antara
Suhu Air dan Te-
kanan Uap.

Tinggi (m)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000
Tekanan Atmosfir (m Kolom Air)	(1) 10,33	10,21	10,10	9,95	9,85	9,72	9,62	9,50	9,39	9,28	9,17
	(2) 10,01	9,89	9,78	9,63	9,53	9,40	9,30	9,18	9,07	8,96	8,85

(1) Tekanan atmosfer standar pada 0°C
(2) Nilai yang minus 0,32m terhadap tekanan uap dengan suhu air 25°C

Suhu Air (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35
Tekanan Uap (m Kolom Air)	0,06	0,09	0,13	0,17	0,24	0,32	0,43	0,57

Data pengukuran vibrasi

PREDICTIVE MAINTENANCE							No. Form :																
HASIL PENGUKURAN PERFORMANCE TEST UNIT 3 PLTA BATANG AGAM SETELAH MO							Tanggal :																
10 MARET 2021							No. Unit :																
VIBRASI SEBELUM MO							No. Asam :																
No	OUTPUT	WAKTUDURASI	LOKASI PENGUKURAN	VIBRATION CHECK			STANDARD	BATASAN VIBRASI (Standard ISO 10818-5)															
				H	V	A																	
				Velocity (mm/s rms)	Velocity (mm/s rms)	Velocity (mm/s rms)																	
1	0% 0 KW	16:45 WIB	ADG	0.289	0.14	0.277	<table border="1" style="font-size: x-small; width: 100%;"> <tr> <th colspan="3">At measurement location 1, 2, 3 and 4</th> </tr> <tr> <th>Zone boundary</th> <th>Peak-to-peak displacement μm</th> <th>R.m.s. velocity mm/s</th> </tr> <tr> <td>AB</td> <td>30</td> <td>1.6</td> </tr> <tr> <td>B/C</td> <td>50</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>CD</td> <td>80</td> <td>4.0</td> </tr> </table>	At measurement location 1, 2, 3 and 4			Zone boundary	Peak-to-peak displacement μm	R.m.s. velocity mm/s	AB	30	1.6	B/C	50	2.5	CD	80	4.0	Velocity : < 1.8 mm/s rms : Normal (new machine conditions) 1.8 < V < 2.5 mm/s rms : Warning (unlimited long-term operation allowable) 2.5 < V < 4 mm/s rms : Warning (short-term operation allowable) > 4 mm/s rms : Extreme (vibration causes damage)
At measurement location 1, 2, 3 and 4																							
Zone boundary	Peak-to-peak displacement μm	R.m.s. velocity mm/s																					
AB	30	1.6																					
B/C	50	2.5																					
CD	80	4.0																					
2	25% 750 KW	13:55 WIB	ADG	0.281	0.145	0.286	Displacement : < 30 μm rms : Normal (new machine conditions) 30 < D < 50 μm rms : Warning (unlimited long-term operation allowable) 50 < D < 80 μm rms : Warning (short-term operation allowable) > 80 μm rms : Extreme (vibration causes damage)																
			ADG	0.658	0.655	0.656																	
3	50% 1500 KW	14:25 WIB	ADG	0.225	0.164	0.188																	
			ADG	0.48	0.442	0.643																	
4	75% 2250 KW	14:52 WIB	ADG	0.254	0.181	0.213																	
			ADG	0.835	0.835	0.805																	
5	100% 3000 KW	15:20 WIB	ADG	0.344	0.188	0.384																	
			ADG	0.8	0.887	0.713																	
<p style="font-size: x-small;">NOTE: Vibration levels of hydroelectric machines are strongly influenced by the vibration of the rotating shafts (face roller and the operating pit driver or upper under pulsed conditions).</p>																							
<p style="font-size: x-small;">Catatan:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Mengetahui, Supervisor Pemeliharaan Prediktif</p> <p>M. Adrian Kusuma</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>Petugas pelaksana :</p> <p>1. Devi chandra</p> <p>2. Rahmad Akbar M</p> <p>3. M. Yamin</p> </div> </div>																							

Tabel massa jenis air

Temperatur (t°C)	Berat Jenis	Temperatur (t°C)	Berat Jenis
20	0,9982	30	0,9957
21	0,9980	31	0,9954
22	0,9978	32	0,9951
23	0,9976	33	0,9947
24	0,9973	34	0,9944
25	0,9971	35	0,9941
26	0,9968	36	0,9937
27	0,9965	37	0,9934
27,5	0,9964	38	0,9930
28	0,9963	39	0,9926
29	0,9960	40	0,9922

TABLE A.1

Conversion Factors

Area (A)	
$1 \text{ mm}^2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	$1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in.}^2$
$1 \text{ cm}^2 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.1550 \text{ in.}^2$	$1 \text{ in.}^2 = 6.4516 \text{ cm}^2 = 6.4516 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
$1 \text{ m}^2 = 10.7639 \text{ ft}^2$	$1 \text{ ft}^2 = 0.092903 \text{ m}^2$
Conductivity (k)	
$1 \text{ W/m-K} = 1 \text{ J/s-m-K}$	
$= 0.577789 \text{ Btu/h-ft-}^\circ\text{R}$	$1 \text{ Btu/h-ft-R} = 1.730735 \text{ W/m-K}$
Density (ρ)	
$1 \text{ kg/m}^3 = 0.06242797 \text{ lbm/ft}^3$	$1 \text{ lbm/ft}^3 = 16.01846 \text{ kg/m}^3$
$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$	
$1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/L}$	
Energy (E, U)	
$1 \text{ J} = 1 \text{ N-m} = 1 \text{ kg-m}^2/\text{s}^2$	
$1 \text{ J} = 0.737562 \text{ lbf-ft}$	$1 \text{ lbf-ft} = 1.355818 \text{ J}$
$1 \text{ cal (Int.)} = 4.18681 \text{ J}$	$= 1.28507 \times 10^{-3} \text{ Btu}$
	$1 \text{ Btu (Int.)} = 1.055056 \text{ kJ}$
$1 \text{ erg} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ J}$	$= 778.1693 \text{ lbf-ft}$
$1 \text{ eV} = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$	
Force (F)	
$1 \text{ N} = 0.224809 \text{ lbf}$	$1 \text{ lbf} = 4.448222 \text{ N}$
$1 \text{ kp} = 9.80665 \text{ N (1 kgf)}$	
Gravitation	
$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$	$g = 32.17405 \text{ ft/s}^2$
Heat capacity (C_p, C_v, C), specific entropy (s)	
$1 \text{ kJ/kg-K} = 0.238846 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{R}$	$1 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kg-K}$
Heat flux (per unit area)	
$1 \text{ W/m}^2 = 0.316998 \text{ Btu/h-ft}^2$	$1 \text{ Btu/h-ft}^2 = 3.15459 \text{ W/m}^2$

TABLE A.1 (continued)
Conversion Factors

Heat-transfer coefficient (<i>h</i>)	
1 W/m ² -K = 0.176 11 Btu/h-ft ² -°R	1 Btu/h-ft ² -°R = 5.67826 W/m ² -K
Length (<i>L</i>)	
1 mm = 0.001 m = 0.1 cm	1 ft = 12 in.
1 cm = 0.01 m = 10 mm = 0.3970 in.	1 in. = 2.54 cm = 0.0254 m
1 m = 3.28084 ft = 39.370 in.	1 ft = 0.3048 m
1 km = 0.621 371 mi	1 mi = 1.609344 km
1 mi = 1609.3 m (US statute)	1 yd = 0.9144 m
Mass (<i>m</i>)	
1 kg = 2.204 623 lbm	1 lbm = 0.453 592 kg
1 tonne = 1000 kg	1 slug = 14.5939 kg
1 grain = 6.47989 × 10 ⁻⁵ kg	1 ton = 2000 lbm
Moment (torque, <i>T</i>)	
1 N-m = 0.737 562 lbf-ft	1 lbf-ft = 1.355 818 N-m
Momentum (<i>mV</i>)	
1 kg-m/s = 7.232 94 lbf-ft/s = 0.224809 lbf-s	1 lbf-ft/s = 0.138 256 kg-m/s
Power (<i>Q</i>, <i>W</i>)	
1 W = 1 J/s = 1 N-m/s = 0.737 562 lbf-ft/s	1 lbf-ft/s = 1.355 818 W = 4.626 24 Btu/h
1 kW = 3412.14 Btu/h	1 Btu/s = 1.055 056 kW
1 hp (metric) = 0.735 499 kW	1 hp (UK) = 0.7457 kW = 550 lbf-ft/s = 2544.43 Btu/h
1 ton of refrigeration = 3.516 85 kW	1 ton of refrigeration = 12 000 Btu/h
Pressure (<i>P</i>)	
1 Pa = 1 N/m ² = 1 kg/m-s ²	1 lbf/in. ² = 6.894 757 kPa
1 bar = 1.0 × 10 ⁵ Pa = 100 kPa	1 atm = 14.695 94 lbf/in. ² = 29.921 in. Hg [32°F] = 33.899 5 ft H ₂ O [4°C]
1 atm = 101.325 kPa = 1.01325 bar = 760 mm Hg [0°C] = 10.332 56 m H ₂ O [4°C]	
1 torr = 1 mm Hg [0°C]	1 in. Hg [0°C] = 0.49115 lbf/in. ²
1 mm Hg [0°C] = 0.133 322 kPa	1 in. H ₂ O [4°C] = 0.036126 lbf/in. ²
1 m H ₂ O [4°C] = 9.806 38 kPa	
Specific energy (<i>e</i>, <i>u</i>)	
1 kJ/kg = 0.42992 Btu/lbm = 334.55 lbf-ft/lbm	1 Btu/lbm = 2.326 kJ/kg 1 lbf-ft/lbm = 2.98907 × 10 ⁻³ kJ/kg = 1.28507 × 10 ⁻³ Btu/lbm

TABLE A.1 (continued)
Conversion Factors

Specific kinetic energy ($\frac{1}{2} V^2$)	
1 m ² /s ² = 0.001 kJ/kg	1 ft ² /s ² = 3.9941 × 10 ⁻⁵ Btu/lbm
1 kJ/kg = 1000 m ² /s ²	1 Btu/lbm = 25037 ft ² /s ²
Specific potential energy (Zg)	
1 m-g _{sat} = 9.80665 × 10 ⁻³ kJ/kg = 4.21607 × 10 ⁻³ Btu/lbm	1 ft-g _{sat} = 1.0 lbf-ft/lbm = 0.001285 Btu/lbm = 0.002989 kJ/kg
Specific volume (v)	
1 cm ³ /g = 0.001 m ³ /kg	
1 cm ³ /g = 1 L/kg	
1 m ³ /kg = 16.01846 ft ³ /lbm	1 ft ³ /lbm = 0.062 428 m ³ /kg
Temperature (T)	
1 K = 1°C = 1.8 R = 1.8 F	1 R = (5/9) K
TC = TK - 273.15	TF = TR - 459.67
= (TF - 32)/1.8	= 1.8 TC + 32
TK = TR/1.8	TR = 1.8 TK
Universal Gas Constant	
$\bar{R} = N_0 k = 8.31451$ kJ/kmol-K	$\bar{R} = 1.98589$ Btu/lbmol-R
= 1.98589 kcal/kmol-K	= 1545.36 lbf-ft/lbmol-R
= 82.0578 atm-L/kmol-K	= 0.73024 atm-ft ³ /lbmol-R
	= 10.7317 (lbf/in. ²)-ft ³ /lbmol-R
Velocity (V)	
1 m/s = 3.6 km/h	1 ft/s = 0.681818 mi/h
= 3.28084 ft/s	= 0.3048 m/s
= 2.23694 mi/h	= 1.09728 km/h
1 km/h = 0.27778 m/s	1 mi/h = 1.46667 ft/s
= 0.91134 ft/s	= 0.44704 m/s
= 0.62137 mi/h	= 1.609344 km/h
Volume (V)	
1 m ³ = 35.3147 ft ³	1 ft ³ = 2.831 685 × 10 ⁻² m ³
1 L = 1 dm ³ = 0.001 m ³	1 in. ³ = 1.6387 × 10 ⁻⁵ m ³
1 Gal (US) = 3.785 412 L	1 Gal (UK) = 4.546 090 L
= 3.785 412 × 10 ⁻³ m ³	1 Gal (US) = 231.00 in. ³