



**ANALISIS PENGARUH DEBIT AIR TERHADAP KAVITASI
RUNNER FRANCIS TURBINE UNIT 1 DI PLTA
WAMPU 3 X 15 MW**

**Disusun dan Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan Ujian Akhir Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Pembangunan Panca Budi
Medan**

SKRIPSI

OLEH

**NAMA : MUHAMMAD SAYUTI
NPM : 2024210041
PROGRAM STUDI : TEKNIK ELEKTRO
PEMINATAN : TEKNIK ENERGI LISTRIK**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN PANCA BUDI
MEDAN
2022**

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

JUDUL

: ANALISIS PENGARUH DEBIT AIR TERHADAP KAVITASI RUNNER FRANCIS TURBINE UNIT 1 DI PLTA WAMPU 3 X 15 MW

NAMA : MUHAMMAD SAYUTI
N.P.M : 2024210041
FAKULTAS : SAINS & TEKNOLOGI
PROGRAM STUDI : Teknik Elektro
TANGGAL KELULUSAN : 12 Desember 2022



DEKAN

KETUA PROGRAM STUDI



Hamdani, ST., MT.

Siti Anisah, S.T., M.T.

DISETUJUI
KOMISI PEMBIMBING

PEMBIMBING I

PEMBIMBING II



Dr Rahmani, ST., MT.

Siti Anisah, S.T., M.T.

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini Saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam skripsi ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Medan, 30 Agustus 2022



Muhammad Sayuti
2024210041

YAYASAN PROF. DR. H. KADIRUN YAHYA

SURAT PERNYATAAN PUBLIKASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Sayuti
NPM : 2024210041
Fakultas : Sains dan Teknologi
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : **Analisis Pengaruh Debit Air Terhadap Kavitas Runner Francis Turbine Unit 1 di PLTA Wampu 3 X 15 MW.**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Skripsi ini merupakan hasil karya tulis Saya sendiri dan bukan merupakan hasil karya orang lain.
2. Memberikan izin hak bebas dan Royalti Non Eksklusif kepada Universitas Pembangunan Panca Budi untuk menyimpan, mengalih-media / formatkan, mengelola, mendistribusikan dan mempublikasikan karya skripsi melalui internet atau media lain bagi kepentingan akademis.

Pernyataan ini Saya buat dengan penuh tanggung jawab dan Saya bersedia menerima konsekuensi apapun sesuai dengan aturan yang berlaku apabila dikemudian hari diketahui bahwa pernyataan ini tidak benar.

Medan, 30 Agustus 2022

yang membuat pernyataan



Muhammad Sayuti
2024210041

Analisis Pengaruh Debit Air Terhadap Kavitas Runner Francis Turbine Unit 1 di PLTA Wampu 3 X 15 MW

Muhammad Sayuti *

Rahmaniar **

Siti Anisah **

**Program Studi Teknik Eelektro
Universitas Pembangunan Panca Budi**

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kavitas berdasarkan hubungan antara koefisien kavitas dengan debit air dan mengetahui pengaruh tingkat kavitas terhadap unjuk kerja Francis Turbine Runner.

Penelitian ini dilakukan pada PT. Wampu Electric Power dengan menganalisis debit air terhadap kavitas Runner Francis Turbine Unit 1 di PLTA Wampu 3 X 15 MW. Data primer dalam penelitian ini diperoleh melalui spesifikasi lengkap turbin Francis (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 penulis.

Berdasarkan hasil penelitian dapat diperoleh bahwa Head Efektif (H_{eff}) pada PLTA Wampu 3 x 15 MW berbanding terbalik dengan debit air yang masuk kedalam turbine runner dimana Head Efektif (H_{eff}) tertinggi 169,627 m dan debit air turbine runner (Q_2) sebesar 9,11 m³ /s. Sedangkan Head Efektif (H_{eff}) terendah 169,427 m dan debit air turbine runner (Q_2) sebesar 4,09 m³ /s. Koefisien Kavitas (σ) pada PLTA Wampu 3 x 15 MW akan berbanding lurus dengan debit air yang masuk kedalam turbine runner (Q_2) dimana koefisien kavitas (σ) terbesar 0,075607783 dan debit air turbine runner (Q_2) sebesar 4,09 m³ /s. Sedangkan koefisien kavitas (σ) terendah 0,075518638 dan debit air turbine runner (Q_2) sebesar 9,11 m³ /s.

Kata kunci : Kavitas, Pembangkit Listrik Tenaga Air, Turbin Francis

***Analysis of the Effect of Water Discharge on Cavitation of Runner
Francis Turbine Unit 1 at HEPP Wampu 3 X 15 MW***

Muhammad Sayuti *

Rahmaniar **

Siti Anisah **

***Electrical Engineering Study Program
Universitas Pembangunan Panca Budi***

ABSTRACT

This study aims to determine the level of cavitation based on the relationship between the cavitation coefficient and water discharge and to determine the effect of cavitation level on the performance of the Francis Turbine Runner.

This research was conducted at PT. Wampu Electric Power by analyzing the water discharge against the cavitation of Runner Francis Turbine Unit 1 at the Wampu 3 X 15 MW hydropower plant. The primary data in this study were obtained through complete specifications of the Francis turbine (working drawings), maximum head, turbine inlet water flow, water temperature, and minimum pressure at the inlet side of the turbine suction pipe, as well as field surveys conducted by the author.

Based on the results of the study, it can be found that the Effective Head (Heff) at the Wampu 3 x 15 MW hydropower plant is inversely proportional to the water discharge entering the turbine runner where the highest Effective Head (Heff) is 169.627 m and the turbine runner water discharge (Q2) is 9.11 m³ /s. Meanwhile, the lowest effective head (Heff) is 169.427 m and the turbine runner water discharge (Q2) is 4.09 m³/s. The cavitation coefficient () at the Wampu 3 x 15 MW hydropower plant will be directly proportional to the water flow entering the turbine runner (Q2) where the cavitation coefficient () is 0.075607783 and the turbine runner water discharge (Q2) is 4.09 m³ / s. While the lowest cavitation coefficient () is 0.075518638 and the turbine runner water discharge (Q2) is 9.11 m³ /s.

Keywords : Cavitation, Hydroelectric Power Plant, Francis . Turbine

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kehadirat Allah S.W.T yang telah memberikan rahmat, taufik dan hidayah-Nya ini, serta shalawat beriring salam disampaikan kepada junjungan besar Nabi Muhammad S.A.W. sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul **“Analisis Pengaruh Debit Air Terhadap Kavitasi Runner Francis Turbine Unit 1 di PLTA Wampu 3 X 15 MW”** sebagai salah satu syarat yang harus diselesaikan untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan Sarjana Strata Satu (S1) di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi.

Peneliti mengetahui bahwa suksesnya pengerjaan Skripsi adalah berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini peneliti ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada yang telah membantu peneliti dalam menyelesaikan Skripsi ini, yaitu :

1. Bapak Dr. H. Isa Indrawan, S.E.,M.M, selaku Rektor Universitas Pembangunan Panca Budi.
2. Bapak Hamdani, S.T.,M.T, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Pembangunan Panca Budi.
3. Ibu Dr. Rahmانيar, S.T.,M.T, selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, arahan serta saran yang diberikan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
4. Ibu Siti Anisah, S.T.,M.T, selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro serta dosen pembimbing skripsi yang telah membantu dan memberi arahan kepada penulis agar skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
5. Ibu Hj.Zuraidah Tharo, S.T.,M.T, selaku dosen penguji yang telah memberi pengujian dan pengetahuan serta membuat penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan tambahan dan masukan yang bermanfaat.

6. Bapak Muhammad Erpandi, S.T.,M.T.,MKKK selaku dosen penguji yang telah memberi pengujian dan pengetahuan serta membuat penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan tambahan dan masukan yang bermanfaat.
7. Seluruh staff pengajar pada prodi Teknik Elektro Universitas Pembangunan Panca Budi atas seluruh ilmu pengetahuan serta bantuannya kepada penulis.
8. Mr. Jeong Hak Hee Selaku President Director PT. Wampu Electric Power yang telah memberikan izin dan dukungan terhadap penulis dalam proses pembuatan Skripsi.
9. Mr. Kim Dohyung Selaku Technical Director PT. Wampu Electric Power yang telah memberikan izin dan dukungan terhadap penulis dalam proses pembuatan Skripsi.
10. Mr. Kwon Doo Woo Selaku General Manager PT. Wampu Electric Power yang telah memberikan izin dan dukungan terhadap penulis dalam proses pembuatan Skripsi.
11. Bapak Andri Sitanggang, S.T, selaku Manager Operasional PT. Wampu Electric Power yang telah memberikan waktu dan kesempatan kepada penulis dalam hal perizinan dan pengambilan data.
12. Bapak Jepri Erdianto Sinaga, S.T, selaku Supervisor Engineering dari PT. Wampu Electric Power yang telah memberikan waktu dan kesempatan kepada penulis dalam hal perizinan dan pengambilan data.
13. Ibu Yayang Malahayati S.Tr.Gz yang merupakan Istri dari penulis atas seluruh dukungan dan bantuannya dalam penyelesaian Skripsi penulis.
14. Kedua orang tua penulis yang selalu mendukung dan memberi dukungan serta doa, semangat serta nasihat kepada penulis agar dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini dengan tepat waktu.
15. Seluruh teman dan rekan pada kelas Reguler-2B LE II J/S atas seluruh waktu dan pertukaran ilmu dan informasinya selama ini.
16. Serta semua yang telah memberikan semangat dalam menyelesaikan Skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini jauh dari kata sempurna, oleh karena itu, penulis berharap agar ada kritik dan saran yang bertujuan untuk menyempurnakan dan memperkaya kajian skripsi ini, akhir kata penulis mengucapkan terima kasih dan semoga Skripsi ini bermanfaat bagi pembaca.

Medan, 30 Agustus 2022

Penulis

Muhammad Sayuti

2024210041

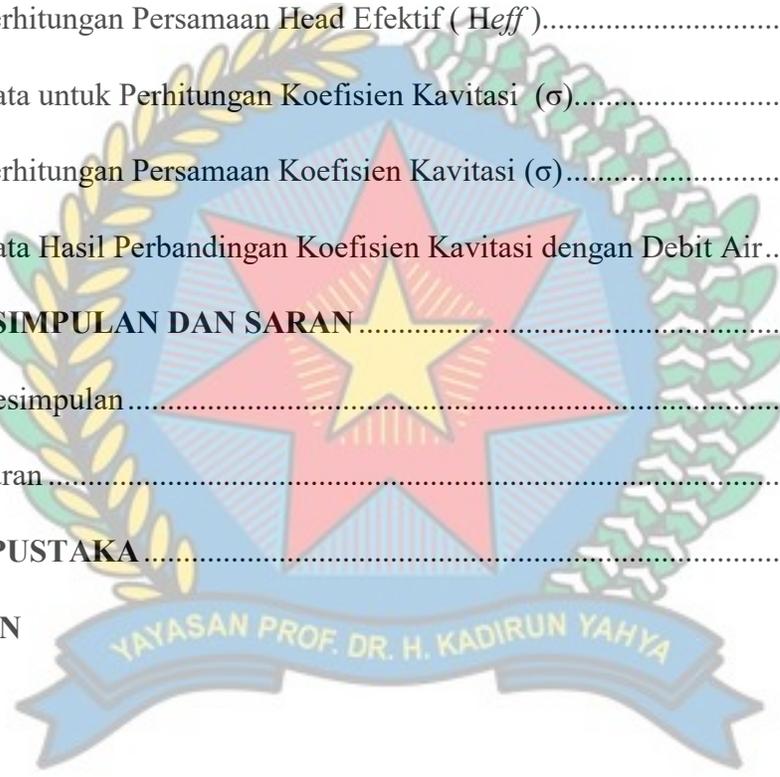


DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Tujuan	5
1.3 Perumusan Masalah	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat	6
1.6 Sistematika Penilaian.....	6
BAB 2 DASAR TEORI	8
2.1 Teori Dasar Hidrolika.....	8
2.2.1 Persamaan Kontinuitas.....	9
2.2.2 Persamaan Euler.....	10
2.1.3 Persamaan Bernoulli	10
2.2 Turbin Air	11
2.2.1 Sejarah Turbin Air.....	11
2.2.2 Prinsip Kerja Turbin Air	14
2.2.3 Klasifikasi Turbin Air	15

2.3 Turbin Francis.....	18
2.3.1 Pengetahuan Umum Tentang Turbin Francis	18
2.3.2 Prinsip Kerja Turbin Francis.....	19
2.3.3 Komponen Utama Turbin Francis.....	20
2.4 Kavitasi.....	22
2.4.1 Pengertian Kavitasi	22
2.4.2 Akibat Kavitasi.....	23
2.4.3 Pencegahan Kavitasi	24
2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Air	25
2.5.1 Perubahan Energi di PLTA.....	26
2.5.2 Peralatan Utama PLTA Wampu.....	29
2.6 Persamaan Yang Mendukung Penelitian	55
2.6.1 Persamaan Bernoulli	55
2.6.2 Persamaan Head Efektif (H_{eff}).....	56
2.6.3 Persamaan Koefisien Kavitasi (σ).....	57
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	59
3.1 Metodologi.....	59
3.1.1 Studi Literatur	59
3.1.2 <i>Flowchart</i>	59
3.1.3 Metode Pengambilan Data	60
3.1.4 Prosedur Penelitian.....	60

BAB 4 HASIL PENELITIAN	62
4.1 Data Untuk Perhitungan Head Efektif (<i>Heff</i>)	62
4.2 Perhitungan Persamaan Head Efektif (<i>Heff</i>).....	63
4.3 Data untuk Perhitungan Koefisien Kavitasi (σ).....	64
4.4 Perhitungan Persamaan Koefisien Kavitasi (σ).....	64
4.5 Data Hasil Perbandingan Koefisien Kavitasi dengan Debit Air.....	65
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data Bendungan PLTA Wampu.....	30
Tabel 2.2	Data Waduk PLTA Wampu	32
Tabel 2.3	Data Saluran Pelimpah PLTA Wampu	33
Tabel 2.4	Data Pintu Air Intake PLTA Wampu	35
Tabel 2.5	Data Head Tank PLTA Wampu	37
Tabel 2.6	Data Pipa Pesat PLTA Wampu	39
Tabel 2.7	Data <i>Francis Turbine</i> PLTA Wampu.....	40
Tabel 2.8	Data <i>Main Inlet Valve</i> PLTA Wampu.....	46
Tabel 2.9	Data <i>Hydraulic Governor</i> PLTA Wampu	48
Tabel 2.10	Data Generator PLTA Wampu.....	50
Tabel 2.11	Data Excitation Transformer PLTA Wampu	52
Tabel 2.12	Data Step Up Transformator PLTA Wampu.....	54
Tabel 4.1	Data Hasil Observasi Head Efektif (H_{eff}).....	62
Tabel 4.2	Data Untuk Perhitungan Koefisien Kavitasasi (σ)	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Skematik dari Instalasi Turbin Reaksi	9
Gambar 2.2 Volume kontrol pada aliran satu arah satu dimensi.....	10
Gambar 2.3 Turbin Air Poros Vertikal.....	14
Gambar 2.4 Bagian-bagian Turbin Francis	20
Gambar 2.5 Kavitasi Turbin Runner PLTA Wampu.....	24
Gambar 2.6 Bendungan PLTA Wampu	29
Gambar 2.7 <i>Technical Drawing</i> PLTA Wampu.....	30
Gambar 2.8 Sungai Waduk PLTA Wampu.....	31
Gambar 2.9 Waduk PLTA Wampu	31
Gambar 2.10 Saluran Pelimpah PLTA Wampu	32
Gambar 2.11 <i>Technical Drawing</i> Saluran Pelimpah PLTA Wampu	33
Gambar 2.12 <i>Intake Gate</i> PLTA Wampu.....	34
Gambar 2.13 <i>Technical Drawing Intake Gate</i> PLTA Wampu.....	34
Gambar 2.14 <i>VED</i> PLTA Wampu.....	35
Gambar 2.15 <i>Technical Drawing VED</i> PLTA Wampu.....	36
Gambar 2.16 Headtank PLTA Wampu	36
Gambar 2.17 <i>Technical Drawing</i> Headtank PLTA Wampu	37
Gambar 2.18 Pipa Pesat PLTA Wampu	38
Gambar 2.19 <i>Technical Drawing</i> Pipa Pesat PLTA Wampu	38
Gambar 2.20 <i>Francis Turbine</i> PLTA Wampu	40

Gambar 2.21 <i>Technical Drawing Francis Turbine</i> PLTA Wampu.....	40
Gambar 2.22 <i>Francis Turbine Runner</i>	42
Gambar 2.23 <i>Technical Drawing Fancis Turbine Runner</i>	42
Gambar 2.24 <i>Spiral Case</i> PLTA Wampu.....	43
Gambar 2.25 <i>Technical Drawing Spiral Case</i> PLTA Wampu.....	43
Gambar 2.26 <i>Guide Vane</i> PLTA Wampu.....	44
Gambar 2.27 <i>Technical Drawing Guide Vane</i> PLTA Wampu.....	44
Gambar 2.28 <i>Main Inlet Valve</i> PLTA Wampu.....	45
Gambar 2.29 <i>Technical Drawing Main Inlet Valve</i> PLTA Wampu.....	45
Gambar 2.30 <i>Hydraulic Governor</i> PLTA Wampu.....	47
Gambar 2.31 <i>Technical Drawing Hydraulic Governor</i> PLTA Wampu.....	47
Gambar 2.32 <i>Generator</i> PLTA Wampu.....	49
Gambar 2.33 <i>Technical Drawing Generator</i> PLTA Wampu.....	49
Gambar 2.34 <i>Exciter Transformer</i> PLTA Wampu.....	51
Gambar 2.35 <i>Technical Drawing Exciter Transformer</i> PLTA Wampu	52
Gambar 2.36 <i>Step Up Transformator</i> PLTA Wampu	53
Gambar 2.37 <i>Technical Drawing SUT</i> PLTA Wampu	53
Gambar 4.1 <i>Grafik Perbandingan Koefisien Kavitasi Dengan Debit Air</i>	67

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Berdasarkan letak geografis Indonesia, yang mana merupakan negara dengan sumber daya alam yang sangat melimpah serta meliputi banyak wilayah perairan, misal: danau, sungai, waduk maka sangat bermanfaat untuk dijadikan sumber energi listrik dengan menggunakan air sebagai basis energinya yakni pembangkit listrik tenaga air (PLTA).

Menurut fakta di lapangan bahwasanya ada beberapa pembangkit listrik tenaga air (PLTA) di Indonesia yang hasil outputnya tidak maksimal akibat dari pengoperasian pembangkit untuk memproduksi energi listrik yang terus-menerus. Kemudian karena pengoperasian yang berlangsung terus-menerus maka akan terjadi penurunan kualitas dari perangkat utama dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dalam hal ini Turbine Runner selaku perangkat penggerak yang disebabkan oleh adanya beberapa faktor, yaitu debit air yang berubah-ubah, dan tingkat kavitasi pada turbin air.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Moh. Zaenal Arifin (2017) dengan judul Analisa Unjuk Kerja Dan Tingkat Kavitasi Pada Turbin Francis Di PT PJB Unit Pembangkitan Brantas Unit PLTA Sutami. Dengan hasil perhitungan dan analisa pada turbin Francis ini, didapatkan head efektif tertinggi sebesar 96,10043868 m, daya hidrolik tertinggi sebesar 29034,88821 kW, efisiensi turbin tertinggi sebesar 82,86866649%, kecepatan spesifik tertinggi sebesar 142,02335 rpm, dan koefisien

kavitasi terendah sebesar 0,159510198. Sehingga batasan pengoperasian pada turbin Francis agar mencapai efisiensi maksimum dapat diketahui.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Wistra Galih Rakha (2020) dengan judul Analisis Pengaruh Beban Operasi Terhadap Tingkat Kavitas Turbin Francis Vertikal Di PT PLN (Persero) Unit Pengendalian Pembangkitan Bengkulu Unit III PLTA Musi. Dengan hasil erdasarkan penelitian ini diperoleh nilai tingkat kavitas pada setiap beban operasi. Tingkat kavitas yang paling besar pada penelitian ini yaitu sebesar 1,429 pada beban operasi 70 MW, sedangkan tingkat kavitas terkecil sebesar 1,385 pada beban 28 MW. Berdasarkan data yang diperoleh kenaikan tingkat kavitas pada beban 50 MW menuju 60 MW sebesar 0,397%, sedangkan kenaikan tingkat kavitas dari beban 60 MW menuju 70 MW adalah sebesar 0,675%. Nilai tingkat kavitas yang terjadi pada tiap beban diketahui bahwa tingkat kavitas terbesar terjadi pada beban 70 MW. Sebaiknya pengoperasian di beban terbesar di hindari untuk menghindari resiko tingkat kavitas 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.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Salomo P T Sinaga (2016) dengan judul Pengaruh Bukaannya Sudu Pengarah pada Tingkat Kavitas di Sisi Masuk Pipa Isap Turbin Francis Vertikal Unit 4 PLTA Tangga P.T. Inalum Power Plant. Berdasarkan penelitian ini diperoleh nilai tingkat kavitas pada setiap GVO (*Guide Vane Opening*). Tingkat kavitas terbesar pada penelitian ini yaitu sebesar 0.96867 pada GVO (*Guide Vane Opening*) sebesar 195 mm, sedangkan tingkat kavitas terkecil

yaitu sebesar 0.81005 pada GVO (*Guide Vane Opening*) sebesar 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 (*Guide Vane Opening*) yang terbaik untuk menghindari kavitasi di Sisi Masuk Pipa Isap Turbin Francis Vertikal Unit 4 PLTA Tangga P.T. Inalum Power Plant yaitu sebesar 102 mm karena memiliki tingkat kavitasi terkecil, sedangkan besar GVO (*Guide Vane Opening*) yang dihindari dan paling rentan terkena kavitasi yaitu sebesar 195 mm karena memiliki tingkat kavitasi terbesar.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Dorit Bayu Islam Nuswantoro (2021) dengan judul Pengaruh Variasi Bukaannya Guide vane terhadap Tingkat Kavitasi pada Turbin Francis Poros Horizontal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar bukaannya guide vane akan membuat tingkat kavitasi yang terjadi pada turbin air juga semakin meningkat. Pada saat bukaannya guide vane 12 mm tercatat tingkat kavitasi tertinggi adalah 0,164 yang terjadi ketika putaran poros turbin sebesar 1800 rpm.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Rizki Hamdani Putra (2021) yang berjudul Analisis Tingkat Kavitasi Turbin Francis di PLTA Batang Agam *Analysis of Francis Turbine Cavitation Rate at Batang Agam Hydroelectric Power Plant*. Dengan hasil penelitian menunjukkan bahwa head efektif berbanding terbalik dengan debit air yang masuk ke turbin. Head efektif tertinggi pada 100,55 m dengan debit 0,9 m³/s. Sedangkan head efektif terendah berada pada 96,26 m dengan debit 4,8 m³/s.

Koefisien kavitasi yang diperoleh berbanding lurus dengan aliran air yang masuk ke turbin. Koefisien kavitasi terbesar ditunjukkan oleh nilai 0,111157 dengan debit sebesar $4,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil adalah 0,106414 dengan debit $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Koefisien kavitasi yang diperoleh berbanding lurus dengan kecepatan spesifik. Koefisien kavitasi terbesar adalah 0,111157 dengan kecepatan spesifik 147.158 rpm. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil dengan nilai 0.106414 dengan kecepatan spesifik 62.318 rpm. Unit turbin 3 PLTA Batang Agam mengalami kavitasi berdasarkan analisis yang ditunjukkan dengan nilai koefisien kavitasi dan kecepatan spesifiknya.

Menurut fakta di lapangan pada saat PLTA Wampu beroperasi di beban tertentu menyebabkan tingkat vibrasi tinggi, salah satu indikasi vibrasi pada turbin generator terjadinya kavitasi. Kavitasi adalah gelembung-gelembung air yang menyebabkan pengikisan, suara bising dan getaran pada komponen turbin. Maka dari itu, untuk memperbaikinya diperlukan Analisa perhitungan dan perencanaan yang handal agar bisa meningkatkan performa dan menghasilkan output sesuai kapasitas dari pembangkit itu sendiri. Sehingga bisa dijadikan referensi untuk perhitungan unjuk kerja kedepannya dan ketersediaan energi listrik bisa meningkat serta memenuhi kebutuhan energi listrik Indonesia. Pada penelitian ini diambil permasalahan yang terjadi di PT. Wampu Electric Power sebagai PLTA untuk dianalisa permasalahan pada kavitasi akibat pengaruh debit air yang terjadi pada Francis Turbine Runner Unit 1 disana.

1.2 Tujuan

Tujuan skripsi ini yaitu :

1. Mengetahui tingkat kavitasi berdasarkan hubungan antara koefisien kavitasi dengan debit air.
2. Mengetahui pengaruh tingkat kavitasi terhadap unjuk kerja *Francis Turbine Runner*.

1.3 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada skripsi ini mencakup beberapa poin sebagai berikut :

1. Bagaimana tingkat kavitasi pada *Francis Turbine Runner* berdasarkan hubungan antara koefisien kavitasi dengan debit air ?
2. Bagaimana pengaruh tingkat kavitasi terhadap unjuk kerja *Francis Turbine Runner* ?

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada skripsi ini mencakup beberapa poin sebagai berikut :

1. Unjuk kerja *Francis Turbine* unit 1 akan menggunakan beban operasi sebesar $15 \text{ MW} \pm 8\%$.
2. Air diasumsikan berada pada suhu 20°C .
3. Luas permukaan waduk (*AI*) diasumsikan ∞ (tak hingga).
4. Periode waktu yang digunakan adalah saat pembebanan puncak pukul 18.00 WIB.

1.5 Manfaat

Manfaat pada skripsi ini mencakup beberapa poin sebagai berikut :

1. Dapat memberi pemahaman kepada penulis mengenai studi analisis terhadap kinerja dari Francis Turbine Runner
2. Dapat memberi referensi untuk predictive maintenance kepada perusahaan yakni PT. Wampu Electric Power.
3. Dapat mengetahui tingkat kavitasi terhadap *Francis Turbine Runner*.
4. Dapat menjadi referensi bagi kajian studi terhadap perangkat PLTA dalam hal ini *Francis Turbine Runner*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan terbagi menjadi lima bab yakni sebagai berikut :

BAB 1. PENDAHULUAN

Pada bab ini memaparkan latar belakang masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

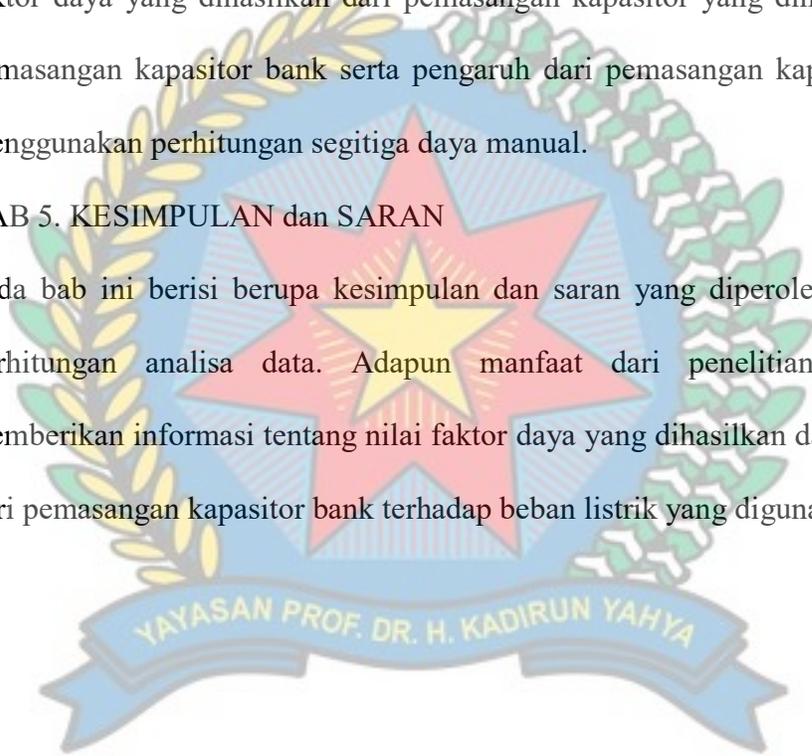
Pada bab ini memaparkan waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, metode penelitian yang digunakan, serta pelaksanaan dan pengamatan penelitian.

BAB 4. HASIL PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan mengenai analisa data untuk menghitung besarnya faktor daya yang dihasilkan dari pemasangan kapasitor yang dihasilkan dari pemasangan kapasitor bank serta pengaruh dari pemasangan kapasitor bank menggunakan perhitungan segitiga daya manual.

BAB 5. KESIMPULAN dan SARAN

Pada bab ini berisi berupa kesimpulan dan saran yang diperoleh dari hasil perhitungan analisa data. Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu memberikan informasi tentang nilai faktor daya yang dihasilkan dan pengaruh dari pemasangan kapasitor bank terhadap beban listrik yang digunakan.



BAB 2

DASAR TEORI

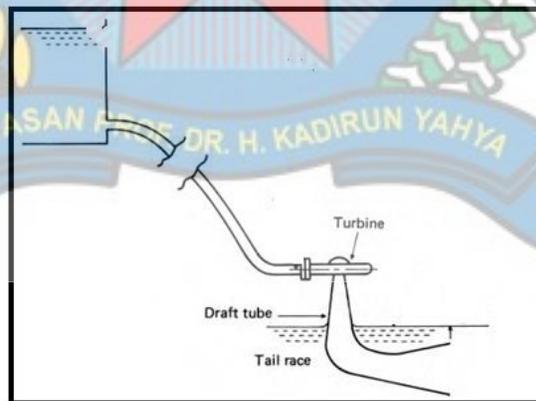
2.1 Teori Dasar Hidrolika

Kata hidrolika berasal dari bahasa Yunani yaitu *hydraulikos* yang merupakan penggabungan dari kata *hydro* berarti air dan *aulos* berarti pipa. Kata Hidrolika merupakan suatu topik ilmu terapan dan keteknikan yang menjurus sifat-sifat pada mekanis fluida yang mempelajari mengenai perilaku aliran air secara mikro ataupun makro. Mekanika fluida menjelaskan dasar-dasar mengenai teori hidrolika yang terfokuskan pada rekayasa sifat fluida. Dalam hal tenaga pada fluida hidrolika dapat digunakan untuk pembangkit, kontrol dan perpindahan tenaga dengan menggunakan fluida yang dimampatkan. Topik bahasan mengenai hidrolika membentang banyak aspek sains dan disiplin keteknikan yang mencakup konsep-konsep aliran tertutup (Pipa), pompa, perancangan bendungan, turbin tenaga air, pengukuran aliran, hitungan dinamika fluida serta perilaku pada aliran saluran terbuka misalnya sungai dan selokan.

Energi yang dapat digunakan untuk memutar roda turbin menggunakan air yang mengalir. Energi sering disebut sebagai energi air atau tenaga air. Pada umumnya pusat-pusat tenaga air tersebut dibangun pada sungai-sungai dan pegunungan-pegunungan. Terdapat dua golongan yang membedakan pusat tenaga air yaitu pusat tenaga air tekanan tinggi dan pusat tenaga air tenaga rendah. Pada mulanya air ditampung di sebuah wadah (*reservoir*) yang besar di daerah yang cukup tinggi dengan menggunakan pipa. Kemudian air yang ditampung dialirkan ke rumah

pusat tenaga (powerhouse) yang dibangun di bawah bendungan. Didalam rumah tersebut sudah dipasang sebuah piranti yang dapat mengubah energi aliran menjadi energi mekanik dan pada akhirnya diubah menjadi energi listrik. Piranti yang dimaksud pada rumah pusat tenaga (powerhouse) adalah turbin yang merupakan inti dari sebuah pembangkit listrik. Dari selisih antara tinggi permukaan air diatas (TPA) dan tinggi permukaan air dibawah (TPB) dapat tinggi jatuh (H) (Robert J, 2002).

Dengan menggunakan rumus ada, dapat diketahui kecepatan aliran mekanika fluida menjadi dasar hidrolika, head pada turbin dan kerugian-kerugian head (head losses). Rumus rumus mekanika fluida tersebut yaitu seperti berikut ini.



Gambar 2.1 Diagram Skematik Dari Instalasi Turbin Reaksi

Sumber : Prayatno, Wibowo 2017

Dengan menggunakan

2.1.1 Persamaan Kontinuitas

Sebelum membahas mengenai persamaan gerak, terlebih dahulu akan dibahas mengenai analisis volume suatu aliran diantara dua titik. Volume tersebut yang dimaksud setiap satuan waktu disebut debit air. Robert J (2002) Mengemukakan bahwa “ Debit air dapat diartikan hal yang dapat menentukan dalam setiap siklus

turbin air, oleh karena itu debit aliran air yang tersedia dapat mempengaruhi sumber daya yang dihasilkan oleh turbin.

2.1.2 Persamaan Euler

Frank (1986) Meneliti bahwa “satu aliran, satu dimensi, satu arah dalam keadaan tunak (steady). Volume kontrol dengan bentuk silinder, dengan penampang lintang yang tegak lurus pada aliran DA dan panjang DS, mempunyai berat = W ”. Berikut ini gambar menunjukkan persamaan euler.



Gambar 2.2. Volume kontrol pada aliran satu arah satu dimensi

Sumber : Prayatno, Wibowo, 2017

2.1.3 Persamaan Bernoulli

Kaidah dari kata energi menyatakan bahwa suatu bentuk energi akan dapat diubah menjadi energi lain. Arus pada air yang mengalir mengandung energi tersebut dapat dirubah bentuknya misalnya perubahan dari sebuah energi potensial (tekanan) kedalam bentuk energi kinetis (kecepatan) atau sebaliknya. Arti selanjutnya kaidah dari kekekalan energi adalah arus air dalam alirannya apabila dilewatkan melalui turbin air, maka energi yang ada pada air akan diubah menjadi bentuk energi lain.

Energi yang dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan sebuah usaha. Energi yang tidak dapat diciptakan maupun yang tidak dapat dihilangkan tapi hanya dapat diubah. Begitu juga pada air yang mengalir dari ketinggian tertentu, dimana aliran tersebut mengandung sebuah energi yang dapat digunakan untuk memutar sebuah roda turbin (Robert J, 2002).

2.2 Turbin Air

2.2.1 Sejarah Turbin Air

Jan Andrej Segner mengembangkan turbin air reaksi pada pertengahan tahun 1700. Turbin ini mempunyai sumbu horizontal dan merupakan salah satu awal mula perkembangan turbin air modern. Turbin ini mempunyai mesin sederhana yang masih diproduksi pada sekarang untuk pembangkit tenaga listrik skala kecil. Segner bekerja sama dengan euler dalam membuat teori matematis awal untuk desain turbin.

Pada tahun 1820, Jean Victor Poncelet mengembangkan sebuah mesin turbin aliran kedalam. Pada tahun 1826, Benoit furneyon mengembangkan sebuah turbin aliran keluar. Turbin ini dilaim sangat efisien (80%) yang mampu mengalirkan air melalui sebuah saluran dengan sudut lengkung satu dimensi. Saluran keluaran air juga mempunyai sebuah lengkungan pengarah. Pada tahun 1844, Uriah A Boyden mengembangkan sebuah turbin aliran keluar yang dapat meningkatkan performa dari mesin turbin Furneyon yang bentuk sudutnya serupa dengan mesin turbin Francis. Pada tahun 1849, James B. Francis meningkatkan efisiensi mesin turbin reaksi aliran kedalam hingga lebih dari 90%. Dalam mengembangkan metode engineering untuk desain turbin air, James B. Francis memberikan test yang memuaskan.

Turbin Francis dinamakan sesuai dengan nama pengembangnya, yang merupakan mesin turbin air modern pertama. Di dunia saat ini turbin jenis ini masih digunakan secara luas. Turbin air aliran kedalam memiliki susunan mekanis lebih baik dan semua turbin reaksi modern yang menggunakan desain saat ini. Putaran massa air terus berputar sehingga putaran semakin cepat, air berusaha meningkatkan kecepatan untuk dapat meningkatkan energi.

Energi yang dihasilkan akan dibangkitkan pada sudu memanfaatkan berat jatuh air dan pusarannya. Tekanan pada air berukuran nol sampai air keluar menuju sirip turbin dan menghasilkan energi. Sekitar tahun 1890, bantalan fluida modern ditemukan hingga tahun 2002, bantalan fluida tersebut terlihat memiliki manfaat selama 1300 tahun lebih. Pada umumnya sekarang bantalan fluida digunakan untuk pusaran turbin air yang memiliki bobot yang berat.

Sekitar tahun 1913, Viktor Kaplan mengembangkan sebuah turbin Kaplan, turbin ini berjenis mesin baling-baling. Ini merupakan hasil wujud evolusi dari mesin turbin Francis. Akan tetapi, turbin Kaplan dikembangkan dengan menggunakan kemampuan sumber air yang memiliki head kecil.

Pada umumnya semua jenis turbin air hingga akhir abad 19 (termasuk kincir air) merupakan hasil reaksi mesin reaksi. Tekanan air sangat berperan pada mesin dan menghasilkan energi. Sebuah turbin reaksi memerlukan air yang penuh dalam suatu proses transfer energi. Pada tahun 1866, seorang pembuat gilingan di California, Samuel Knight menciptakan sebuah mesin yang dapat mengerjakan tuntas sebuah konsep yang berbeda jauh dari pendahulunya. Ia terinspirasi dari sebuah sistem jet dengan tekanan tinggi yang dapat digunakan pada lapangan pengeboran emas

hidrolik, Knight menciptakan ceruk kincir dapat menangkap energi pada semburan jet, yang dikeluarkan dari energi kinetik pada air dengan sumber air yang cukup tinggi (ratusan kaki) yang dialirkan pada sebuah pipa saluran. Turbin ini disebut turbin Impulse atau turbin tangensial. Aliran air pada pipa mendorong ceruk disekitar kincir turbin pada kecepatan maksimum dan air jatuh keluar sudu dengan kecepatan tinggi.

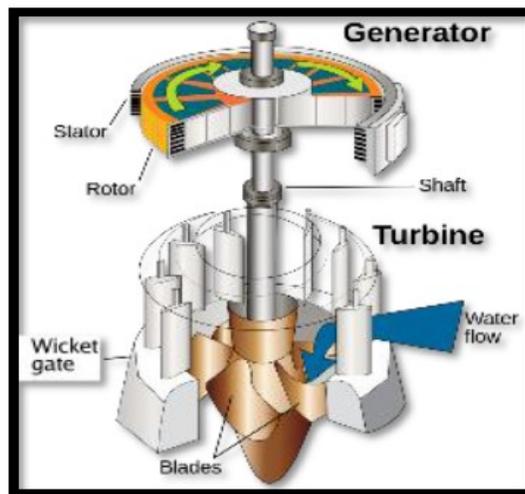
Pada tahun 1879, Lester Pelton, melakukan sebuah uji coba dengan kincir Knight, yang dikembangkan melalui desain ceruk ganda yang dapat membuang air mengarah ke samping, beberapa energi yang telah hilang pada kincir Knight yang membuang sebagian air kembali menuju kincir. Sekitar tahun 1895, William Doble mengembangkan penemuan milik Pelton sebuah ceruk berbentuk setengah silinder yang menjadi ceruk berbentuk bulat memanjang, yang didalamnya sudah termasuk potongan yang dapat memungkinkan semburan guna membersihkan masukan pada ceruk.

Turbin jenis ini merupakan bentuk modern dari turbin pendahulunya yaitu Pelton yang saat ini memberikan efisiensi hingga 92%. Pelton telah memprakarsai sebuah desain yang efektif, kemudian Doble mengambil alih perusahaan Pelton dan tidak menggantinya menjadi Doble karena Pelton sudah banyak dikenal secara luas. Turgo dan turbin aliran silang merupakan desain turbin Impulse selanjtnya.

Dalam suatu pembangkit listrik turbin air ini dapat berfungsi untuk mengubah energi potensial yang dimiliki air menjadi energi kinetik. Selanjtnya energi kinetik ini akan dirubah menjadi energi elektrik melalui generator. Hal ini menyebabkan setiap pembahasan tentang turbin hidrolik akan mengikutsertakan generator sebagai pembangkit listrik (Prayatno, 2007).

2.2.2 Prinsip Kerja Turbin Air

Secara umum prinsip kerja dari turbin air ini adalah aliran air di dalam pipa pesat yang mengandung energi kemudian diarahkan ke roda turbin melalui nozzle kemudian energi yang ada pada roda turbin di ubah bentuknya menjadi energi mekanik berupa putaran. Putaran roda turbin inilah yang dimanfaatkan untuk menggerakkan suatu beban, salah satu contohnya adalah untuk menggerakkan generator pembangkit listrik. Konstruksi dasar dari urbin air terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Rotor adalah bagian bagian dari turbin yang berputar (rotating) seperti roda turbin (runner), poros, kopleng, roda gaya, sedangkan stator adalah bagian bagian dari turbin yang diam (statis) seperti saluran masuk (pipa pesat), rumah siput (spiral case), sudu tetap (stay vane), sudu pengarah (guide vane), pipa isap, saluran buang dan lain lain. Adapun contoh turbin air dapat kita lihat pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Turbin Air Poros Vertikal
 Sumber : Prayatno, Wibowo, 2007

Dari gambar turbin air poros vertikal tersebut dilihat komponen utama, yaitu

- a. Sudu tetap (nozzle), yang berfungsi untuk mengalirkan aliran fluida kerja (air) masuk menuju sudu gerak.
- b. Sudu gerak, sudu gerak ini diaplikasikan pada sekeliling roda turbin, yang mana fungsinya untuk menerima tekanan dari kecepatan fluida kerja air masuk dan keluar sudu.
- c. Rotor (roda turbin), suatu tempat pada kedudukan sudu gerak, yang berfungsi untuk meneruskan momen putar yang diterima dari sudu gerak menuju poros yang mengantarkan putaran daya ke generator.
- d. Poros, yang berfungsi untuk mentransmisikan tenaga atau daya bersama-sama dengan menggunakan putaran roda turbin dan juga dapat berfungsi sebagai pendukung suatu momen gerak putar.
- e. Stator (rumah turbin), berfungsi untuk pengamanan atau melindungi dari proses kerja turbin dan juga untuk mendukung konstruksi turbin secara menyeluruh.
- f. Generator listrik, berfungsi untuk mengubah tenaga mekanis menjadi tenaga listrik dari poros turbin.

2.2.3 Klasifikasi Turbin Air

Ramesh (2007) mengkategori pengelompokan pada Turbin air dalam enam pembagian, yaitu :

1. Berdasarkan kuantitas air dan head yang tersedia. Berdasarkan pembagian ini turbin terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

- a. Turbin impuls, digunakan pada permukaan head tinggi dan kuantitas aliran yang cukup rendah.
 - b. Turbin reaksi, yang dipakai pada head rendah dan kuantitas aliran yang cukup tinggi. Selain itu diaplikasikan juga pada head sedang dan kuantitas aliran sedang, serta head dan kuantitas aliran rendah.
2. Berdasarkan nama penemunya. Berdasarkan pembagian pada jenis turbin air ini dibagi menjadi dua jenis yaitu:
- a. Turbin Pelton, ditemukan oleh Lester Allen Pelton dari California, Amerika. Turbin jenis ini tergolong jenis turbin impuls yang digunakan pada head yang cukup tinggi dan discharge yang rendah.
 - b. Turbin Francis, ditemukan oleh James Bichens Francis. Turbin jenis ini tergolong jenis turbin reaksi untuk head tinggi sedang ke rendah sedang dan rendah sedang ke discharge tinggi sedang.
3. Berdasarkan pada aksi air sudu yang bergerak. Berdasarkan jenis ini turbin dibagi menjadi dua jenis, yaitu:
- a. Turbin Impulse, yang tergolong dalam jenis turbin ini yaitu turbin Pelton.
 - b. Turbin Reaksi, yang tergolong dalam jenis turbin ini yaitu turbin Francis, turbin Kaplan dan Propeller.
4. Berdasarkan arah aliran air ke runner. Berdasarkan pembagian jenis turbin ini dibagi menjadi empat, yaitu:
- a. Turbin aliran tangensial, yang tergolong dalam jenis turbin ini yaitu turbin Pelton. Pada turbin ini, air menuju runner menghantam secara tangensial sesuai dengan jejak rotasinya.

- b. Turbin aliran radial.
 - c. Turbin aliran aksial, yang termasuk dalam jenis turbin ini yaitu turbin Kaplan.
Air mengalir secara paralel pada turbin ini, searah dengan sumbu pada poros turbin. Pada jenis turbin kaplan ini dapat diatur runner blades dan dapat dirotasi pada sekitar titik pusat pada runner boss yang tetap. Jika runner blades dari poros turbin aliran aksial bersifat tetap dan tidak dapat diatur, maka turbin ini disebut sebagai turbin Propeller.
 - d. Turbin aliran campuran (radial dan aksial), yang tergolong dalam jenis turbin ini yaitu turbin Francis. Pada jenis turbin ini, air yang masuk ke sudu secara radial dan keluar secara aksial, sejajar dengan poros turbin.
5. Berdasarkan posisi poros turbin. Berdasarkan jenis turbin ini dibagi menjadi dua, yaitu:
- a. Turbin vertikal, yang mempunyai poros vertikal
 - b. Turbin horizontal, yang mempunyai poros horizontal.
6. Berdasarkan kecepatan spesifik. Berdasarkan penggolongan turbin ini dibagi dua jenis, yaitu:
- a. Turbin dengan kecepatan aliran spesifik rendah, yang dapat bekerja pada head cukup tinggi dan discharge cukup rendah.
 - b. Turbin dengan kecepatan aliran spesifik tinggi, yang bekerja pada head cukup rendah dan discharge cukup tinggi.

2.3 Turbin Francis

2.3.1 Pengetahuan Umum Tentang Turbin Francis

Turbin Francis pertama kali dikembangkan oleh James B. Francis. Pada tahun 1848 ia menciptakan sebuah desain turbin dapat membuktikan dengan efisiensi sampai dengan 90%. Dia menerapkan ilmu science dengan menggunakan metode pengujian untuk menghasilkan mesin turbin dengan tingkat efisiensi yang cukup besar, kemudian ia juga dapat membuktikan dengan grafik dan perhitungan matematika.

Turbin Francis adalah salah satu jenis turbin air (hidraulik) yang paling sering digunakan sampai sekarang. Turbin ini beroperasi dalam headrange antara 10 sampai beberapa ratus meter dan fungsi utamanya adalah dalam memproduksi tenaga listrik. Memiliki vane antara 9 atau lebih, dimana air akan mengenai vane-vane tersebut dan mengelilinginya hingga dapat menyebabkannya berputar.

Turbin Francis bekerja dengan menggunakan proses tekanan lebih. Pada waktu air masuk ke roda jalan, sebagian dari energi tinggi jatuh telah bekerja di dalam sudu pengarah (runner) dan diubah sebagai kecepatan arus masuk, kemudian sisa energi tinggi jatuh dimanfaatkan di dalam sudu jalan. Adanya pipa isap memungkinkan energi tinggi jatuh bekerja di sudu jalan dengan semaksimal mungkin. Turbin ini termasuk turbin reaksi aliran yang mengkombinasikan konsep aliran radial dan axial. Termasuk dalam turbin reaksi yang berarti kerja fluida dalam hal ini air mengubah tekanan dan bergerak memasuki turbin dan memberikan energi.

Inlet dari turbin Francis berbentuk spiral (rumah keong) yang menyebabkan air bergerak tangensial memasuki daun baling-baling runner (penggerak turbin),

aliran radial ini mengenai runner dan menyebabkan runner ini berputar. Turbin Francis terbagi dua yaitu turbin Francis dengan posisi poros vertical atau horizontal (Prayatno, 2007).

2.3.2 Prinsip Kerja Turbin Francis

Turbin Francis merupakan salah satu turbin reaksi, yang artinya fluida bekerja dengan mengubah tekanan bersamaan dengan gerak pada turbin tersebut, yang menciptakan sebuah energi. Inletnya berbentuk spiral. Guide vane membawa air secara tangensial menuju runner. Aliran radial ini bekerja pada runner vanes, menyebabkan runner berputar. *Guide vane (wicked gate)* dapat disesuaikan untuk memberikan operasi turbin yang efisien untuk berbagai kondisi aliran air.

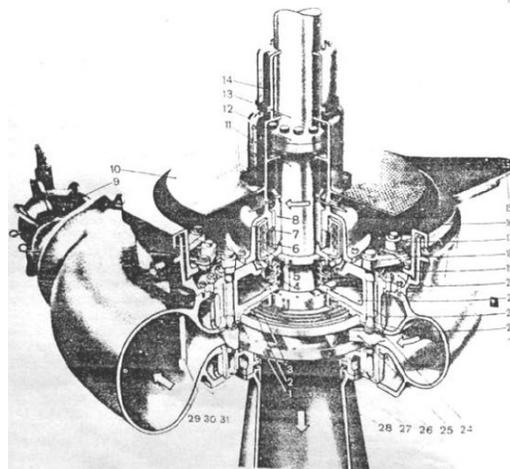
Air pertama kali memasuki pipa pesat (*penstock*) lalu mengalir ke *spiral case* dan mengelilingi *stay vane* sehingga air dapat mengalir ke dalam runner dengan kecepatan merata. Sebelum memasuki runner, air melewati *guide vane* yang berfungsi untuk mengarahkan air atau mengubah sudut masuk air sehingga bisa diatur debit air yang masuk ke turbin. Guide vane dapat disesuaikan untuk memberikan derajat adaptabilitas untuk bermacam-macam variasi pada kecepatan aliran air dan beban dari turbin. Air mengalir secara radial tangensial menumbuk runner. Runner dilengkapi dengan vane berbentuk kurva yang akan ditabrak oleh air. Setelah melewati runner, air keluar dari runner ke pipa isap secara aksial.

Turbin Francis bekerja dengan memakai proses tekanan lebih. Pada waktu air masuk ke roda jalan sebagai energi tinggi jatuh (*head drop*) yang menyimpan energi potensial, sebagian dari energi potensial telah bekerja di dalam sudu pengarah diubah

sebagai energi kinetik, maka kecepatan air melewati sudu pengarah menjadi lebih cepat sehingga bisa memutar sudu jalan. Dari putaran sudu jalan tersebut nantinya akan merubah energi kinetik tadi menjadi energi mekanik sehingga menghasilkan daya. Sisa energi tinggi jatuh yang telah bekerja di dalam sudu jalan akan dimanfaatkan dengan adanya pipa pesat yang memungkinkan energi tinggi jatuh bekerja di dalam sudu jalan dengan semaksimal mungkin.

Terdapat tekanan yang cukup rendah pada bagian sisi sebelah luar roda jalan (kurang dari 1 atm) dan kecepatan pada aliran yang cukup tinggi. Sedangkan pada pipa isap kecepatan aliran air akan berkurang dan tekanannya akan kembali naik sehingga aliran air dapat dialirkan keluar melewati saluran air di bawah dengan keadaan tekanan yang ada disekitarnya. Pada turbin ini pipa pesat mempunyai fungsi merubah energi kecepatan menjadi energi tekanan.

2.3.3 Komponen Utama Turbin Francis



Gambar 2.4 Bagian-bagian Turbin Francis

Sumber : Prayatno, Wibowo, 2007

Keterangan:

1. Roda jalan
2. Cincin labirin
3. Cincin labirin kontra
4. Cincin zat arang
5. Pipa kuras
6. Pengumpul minyak yang berputar
7. Blok bantalan
8. Bantalan penghantar
9. Saluran air kompensator
10. Bordes pelayanan
11. Poros turbin
12. Kopling
13. Poros hantar
14. Tabung penutup poros
15. Titik tangkap servomotor
16. Cincin pengatur
17. Tuas
18. Batang penggerak
19. Cincin hantaran
20. Roda penghantar
21. Tutup turbin
22. Tabung blok bantalan atas
23. Cincin penutup roda bantalan tengah
24. Cincin penutup roda pengarah
25. Daun sudu pengarah
26. Tutup turbin bawah atau cincin roda pengarah
27. Saluran udara pipa isap
28. Pipa isap
29. Rumah Keong
30. Sudu penyangga
31. Cincin sudu penyangga

Penjelasan gambar 2.4 di atas yaitu sebagai berikut. Air masuk ke turbin melewati rumah keong (29) yang sudah diperkuat dengan menggunakan sudu-sudu penyangga (30). Di sebelah kanan adalah sudu pengarah (25) atau yang biasa disebut

daun sudu pengarah. Posisi Bergeraknya sudu tersebut diatur melalui batang penggerak (18), tuas (17), dan cincin pengatur (16) sesuai dengan volume air yang akan masuk ke turbin. Untuk gerak menutupnya aliran air yang akan masuk ke turbin secara tiba-tiba, kontrolnya pada saat pengurangan beban pada generator, agar tekanan yang ada pada rumah keong dan pada pipa saluran tidak akan naik, maka dari itu untuk mencegah naiknya tekanan tersebut pelimpah/saluran air aliran kompensator (9) dapat terbuka pada waktu yang singkat. Pada prinsipnya cincin labirin (2 dan 3) dan juga cincin zat arang adalah untuk mencegah agar air jangan sampai masuk ke ruangan lain, terkecuali hanya masuk ke sudu pengarah dan sudu jalan; aliran air yang keluar pada sudu pengarah memiliki tekanan yang lebih. Poros roda jalan dengan rotor generator ditahan atau dipikul oleh bantalan tekan yang pada gambar yang tidak diperlihatkan. Bantalan (8) adalah sebagai bantalan penghantar radial (Prayatno, 2007).

2.4 Kavitasi

2.4.1 Pengertian Kavitasi

Kavitasi (*cavitation*) merupakan suatu gambaran dimana terjadinya perubahan secara cepat pada zat cair yang menuju pada terbentuknya rongga kecil yang berisi uap pada tempat dengan adanya tekanan yang relatif cukup rendah. Sebagian mendefinisikan kavitasi ialah fenomena berubahnya fase uap pada zat cair yang sedang mengalir, karena tekanannya dapat berkurang sampai dibawah tekanan pada uap jenuhnya. Pada saat mengalami tekanan yang cukup tinggi, rongga rongga ini disebut rongga kosong atau gelembung, dan dapat menyebabkan gelombang kejut

yang intens. Kavitas (*Cavitation*) ini menyebabkan terjadinya keausan yang signifikan pada beberapa konteks teknik. Akibat gelembung yang pecah didekat pada permukaan logam yang mengakibatkan tekanan siklus pada tumbukan berulang. Hal tersebut mengakibatkan kelelahan pada permukaan logam yang mengakibatkan keausan yang sering disebut kavitas. Misalnya dari jenis keausan untuk impeller pompa dan baling-baling.

Gelembung yang terbawa pada aliran fluida pada akhirnya akan berada pada daerah yang memiliki tekanan yang lebih besar tekanan pada cairan uap jenuh. Pada daerah tersebut gelembung akan pecah dan akan mengakibatkan shock pada dinding yang ada di dekatnya. Secara tiba-tiba cairan akan masuk pada ruangan yang terbentuk akibat pecahnya gelembung uap yang mengakibatkan terjadinya tumbukan.

2.4.2 Akibat Kavitas

Dengan tekanan yang begitu tinggi pada peristiwa kavitas akibat dari peristiwa tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menimbulkan suara berisik
2. Menimbulkan getaran yang dapat merusak instalasi turbin.
3. Menimbulkan pengikisan pada bagian dalam pipa-pipa
4. Menimbulkan pengikisan material pada bilah dan runner
5. Menimbulkan kerusakan pada badan bilah dan runner.
6. Mengurangi masa pakai dari perangkat atau material menjadi lebih cepat aus, berdampak kepada keandalan dan peningkatan biaya operasi dan pemeliharaan.

7. Menimbulkan penurunan efisiensi daya turbin.



Gambar 2.5 Kavitas *Turbine Runner* PLTA Wampu
Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022

2.4.3 Pencegahan Kavitas

Perlu diambil langkah-langkah guna mencegah terjadinya kavitas ini, maka perlu dikakukan sebagai berikut:

1. Menghindari bentuk-bentuk berupa tajam serta bergelombang di sepanjang saluran pada instalasi.
2. Pemasangan posisi instalasi yang tepat, yaitu posisi turbin sedemikian rupa agar sesuai pada perletakan antara posisi runner dengan draft tube.
3. Menggunakan material yang cukup kuat pada posisi dimana diprediksi kavitas akan terjadi.
4. Memperbaiki sistem konstruksi dan mengupayakan agar tidak terjadi bentuk-bentuk yang tajam atau belokan-belokan.
5. Penambahan udara (*air injection system*).
6. Perlu dilakukan pemeriksaan kualitas air secara berkala

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dapat diartikan sebagai salah satu sumber daya energi terbarukan tertua didunia dan sebagai sumber yang pertama dari energi mekanik. Ditemukan dalam sebuah tulisan Yunani dari 85 SM merupakan sumber referensi yang dikenal paling awal dan ada referensi pada teks romawi terdahulu. Untuk menggerakkan pabrik dan menggiling gandum digunakan roda sederhana yang dikenal di cina selama masa pada abad ke-1, dan pada awal milenium kedua teknologi secara luas dikenal diseluruh asia dan eropa (Breeze, 2014).

Pengubahan ini digunakan peralatan generator dan turbin, yang kemudian menghasilkan daya listrik yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P = g \times Q \times H \quad (2.1)$$

Keterangan:

P = Daya output (W)

H = Elevasi jatuh air efektif (m)

Q = Debit air (m³/s)

g = Konstanta percepatan gravitasi 9,82 m/s²

2.5.1 Perubahan Energi di PLTA

a. Energi Potensial

Energi potensial didasarkan pada perbedaan kedudukan dari permukaan tinggi jatuh atau ketinggian air. Berdasarkan fenomena ini maka tinggi jatuh air dapat berbeda-beda sehingga dibutuhkan sebuah turbin yang berbagai macam model dengan ketinggian yang berbeda-beda untuk merubah energi potensial air menjadi energi gerak. Energi potensial yang ada pada bendungan adalah

$$E = m \times h \times g \quad (2.2)$$

Keterangan:

m = massa air (kg)

h = ketinggian terjunan (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Sehingga daya yang dibangkitkan adalah

$$P = \rho \times Q \times g \times h \quad (2.3)$$

Keterangan:

P = daya (Watt)

Q = kapasitas aliran (m^3/s)

P = densitas air (kg/m^3)

b. Energi Kinetik

Energi yang ada pada air ini tidak hanya didasarkan pada pemanfaatan jatuhnya air (hydropower) akan tetapi juga dapat dihasilkan pada aliran datar di pipa pesat. Sumber energi yang terdapat pada pipa ini didasarkan pada energi kinetiknya.

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (2.4)$$

Keterangan:

v = kecepatan aliran air (m/s)

m = massa air (kg)

Sehingga daya yang dihasilkan adalah

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times Q \times v^2 \quad (2.5)$$

Dengan perumusan Q adalah $A \times v$ maka

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (2.6)$$

Keterangan:

A = luas penampang aliran air (m²)

c. Energi Mekanik

Energi mekanik merupakan sebuah energi yang diperoleh oleh suatu benda karena gerak dan kedudukannya. Energi mekanik terdiri atas energi potensial (EP) dan energi kinetik (EK) serta merupakan energi yang digunakan untuk menggerakkan poros antara sudu jalan dalam ruang turbin, energi mekanik dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$E_m = E_p + E_k \quad (2.7)$$

Keterangan :

E_p = Energi Potensial

E_k = Energi Kinetik

d. Energi Listrik

Terjadinya energi listrik merupakan hasil dari putaran poros pada turbin yang berputar melalui poros generator. Pada prinsipnya melalui peralatan generator bahwa suatu medan magnet yang berputar memotong konduktor/kumparan pada sebuah generator akan menimbulkan tegangan. Suatu konduktor yang berhubungan singkat (short circuit) dapat menghasilkan arus, sebuah pembangkit listrik yang menghasilkan energi listrik dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$P = \rho \times g \times Q \times H \times \eta \quad (2.8)$$

Keterangan :

P = daya yang dihasilkan (kW)

ρ = berat jenis air (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Q = debit aliran air (m^3/s)

H = tinggi jatuh, head (m)

η = efisiensi total

2.5.2 Peralatan Utama PLTA Wampu

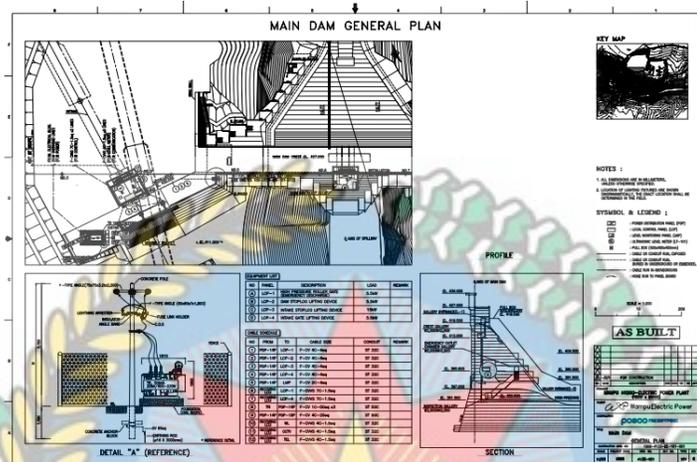
a. Bendungan (*Dam*)

Bendungan merupakan sebuah bangunan yang berfungsi sebagai peninggi permukaan air dan penyimpanan air pada musim hujan pada waktu air sungai mengalir pada jumlah besar yang melebihi kebutuhan, baik untuk keperluan irigasi maupun air minum industri atau yang lainnya (Sani,2008).



Gambar 2.6 Bendungan PLTA Wampu

Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.7 Technical Drawing Bendungan PLTA Wampu
Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

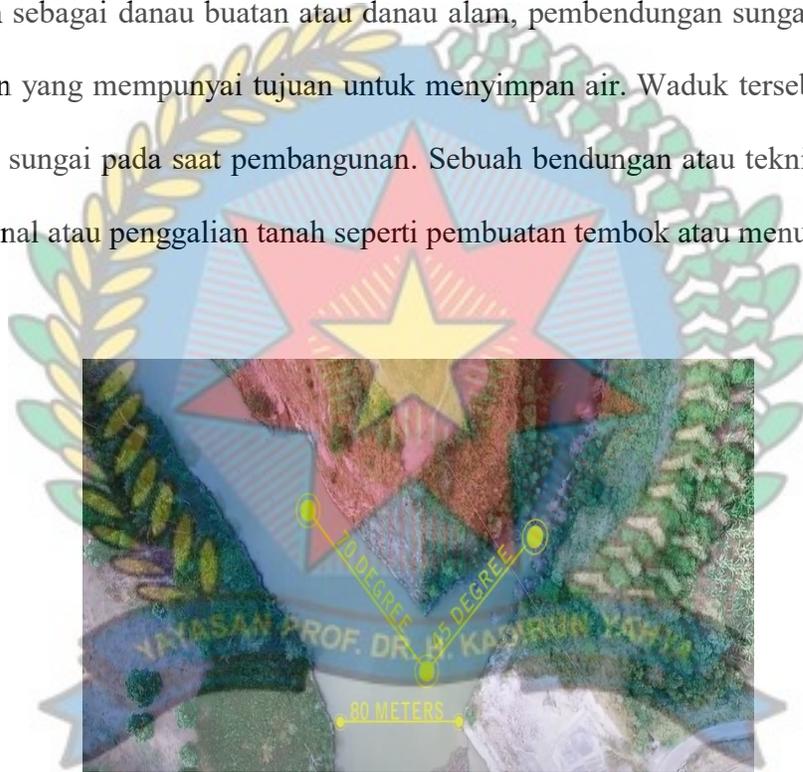
Tabel 2.1 Data Bendungan PLTA Wampu

Jenis Bendungan	Concrete Gravity Dam (C.G.D)
Lokasi	Rih Tengah, Kutabuluh
Ambang Bendungan	L 86m x W 64 m, H : 61 m
Elevasi Bendungan	427 m
Sungai	Lau Biang / Lau Mbelin

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

b. Waduk (*Reservoir*)

Waduk merupakan tempat atau wilayah untuk membendung air yang akan digunakan sebagai danau buatan atau danau alam, pembendungan sungai atau kolam penyimpanan yang mempunyai tujuan untuk menyimpan air. Waduk tersebut dibangun di lembah sungai pada saat pembangunan. Sebuah bendungan atau teknik konstruksi konvensional atau penggalian tanah seperti pembuatan tembok atau menuang beton.



Gambar 2.8 Sungai Waduk PLTA Wampu

Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.9 Waduk PLTA Wampu

Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022

Tabel 2.2 Data Waduk PLTA Wampu

Level Air Max	EL.425.43 m
Level Air <i>Overflow</i>	EL.422.96 m
Level Air Normal	EL.419.0 m
Luas Waduk	-

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

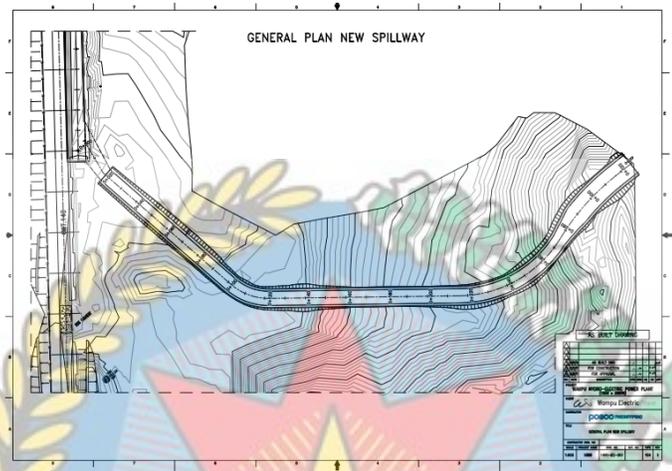
c. Saluran Pelimpah (*Water Spillway*)

Saluran pelimpah adalah konstruksi yang digunakan untuk menyuplai aliran yang terkendali dari tanggul atau bendungan ke daerah hilir, pada umumnya menjadi sungai yang dibendung. Saluran pelimpah membuang banjir sehingga air tidak merusak dan melebihi atau bahkan menghancurkan sebagian konstruksi pada waterway.



Gambar 2.10 Saluran Pelimpah PLTA Wampu

Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.11 *Technical Drawing Saluran Pelimpah PLTA Wampu*
Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

Tabel 2.3 *Data Saluran Pelimpah PLTA Wampu*

Jenis Saluran Pelimpah	<i>Flip Bucket</i>
Level Ketinggian Buangan Saluran	EL.419.42 m
Ukuran Saluran Pelimpah	15.25 m x 6.5 m x 2 EA
Jenis Gerbang Bukaan	-

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

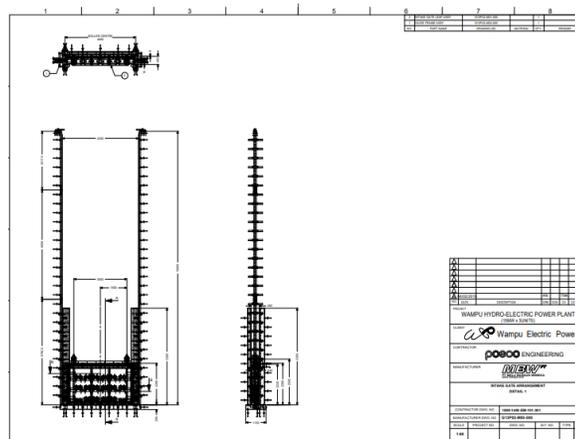
d. **Pintu Air Intake (*Intake Gate*)**

Pintu Air Intake merupakan gerbang bukaan air yang telah dibendung di waduk yang akan mengarahkan air dialirkan melalui jalur air ke turbin di rumah pembangkitan listrik (*Powerhouse*), pada intake gate juga terdapat sebuah perangkat bantu berupa mesin keruk pembersih (*trashrack cleaner*) yang berfungsi sebagai pengeruk dan pemilah sampah seperti : kayu, ranting, sampah plastic dll sebelum air memasuki pintu air intake .



Gambar 2.12 Intake Gate PLTA Wampu

Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.13 Technical Drawing Intake Gate PLTA Wampu

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

Tabel 2.4 Data Pintu Air Intake PLTA Wampu

Level <i>Intake</i>	EL.412.0 m
Ukuran <i>Intake Gate</i>	4.0 m x 4.0 m
Pengeruk Sampah <i>Intake</i>	10.2 m x 5.0 m

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

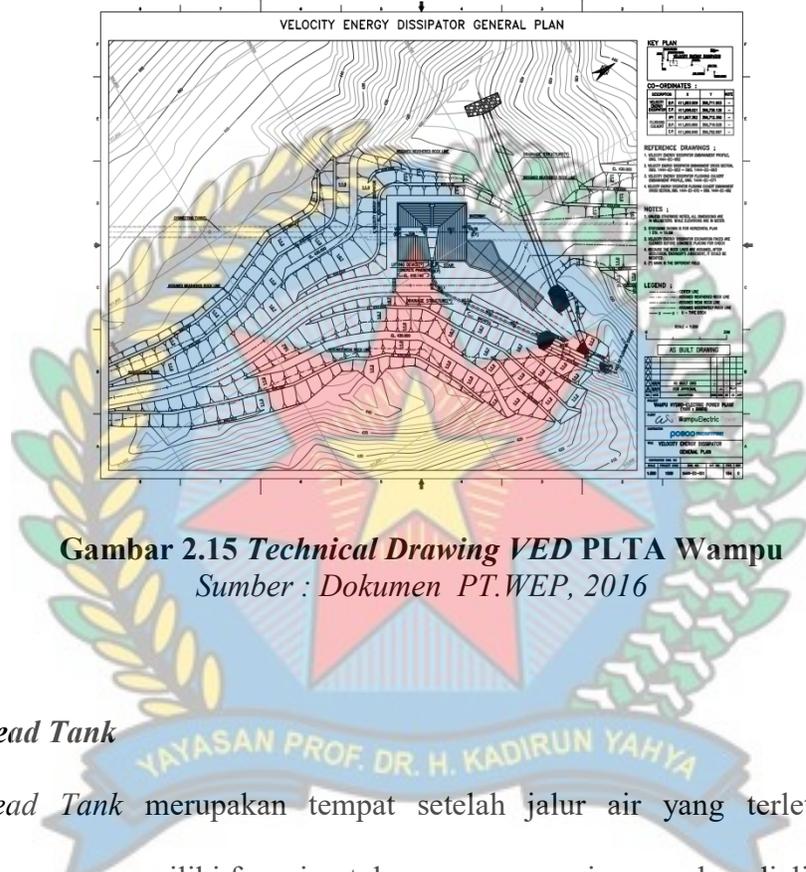
e. *Velocity Energy Disipator (VED)*

Velocity Energy Disipator adalah sebuah lokasi yang terletak sebelum air memasuki waterway dan memiliki fungsi sebagai penahan sedimen dalam air yang akan dialirkan menuju waterway hingga ke headtank.



Gambar 2.14 VED PLTA Wampu

Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.15 *Technical Drawing VED PLTA Wampu*
 Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

f. **Head Tank**

Head Tank merupakan tempat setelah jalur air yang terletak sebelum powerhouse yang memiliki fungsi untuk menampung air yang akan dialirkan melalui pipa pesat (penstock) menuju ke rumah siput (*spiral case*) sebelum dialirkan menuju ke turbin.



Gambar 2.16 *Head Tank PLTA Wampu*
 Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022

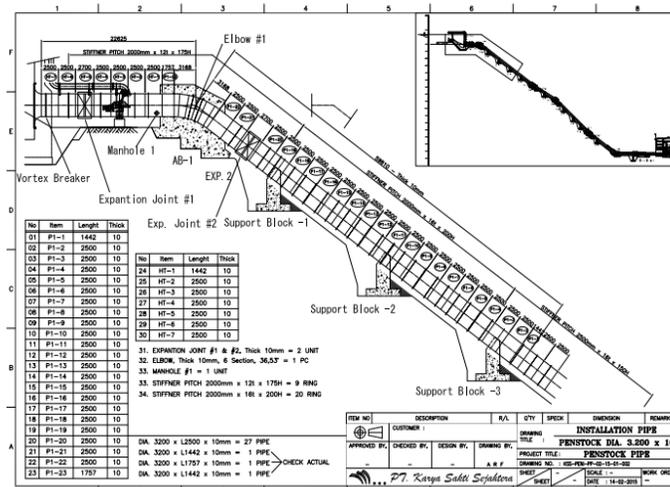
g. **Pipa Pesat (Penstock)**

Pipa Pesat adalah saluran atau terowongan yang menghubungkan bak penampung air menuju Katup Utama (*Main Inlet Valve*) sebelum kemudian akan dialirkan ke dalam turbin di gedung pembangkit listrik.



Gambar 2.18 Pipa Pesat PLTA Wampu

Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.19 *Technical Drawing* Pipa Pesat PLTA Wampu

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

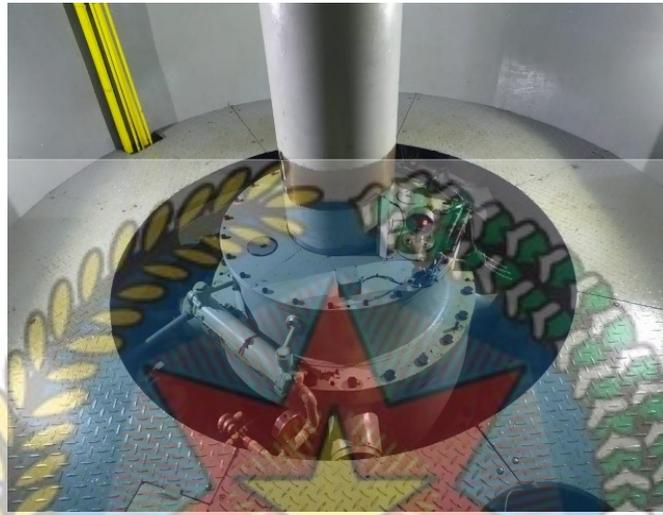
Tabel 2.6 Data Pipa Pesat PLTA Wampu

Jenis Saluran Pelimpah	<i>Flip Bucket</i>
Level Ketinggian Buangan Saluran	EL.419.42 m
Ukuran Saluran Pelimpah	15.25 m x 6.5 m x 2 EA
Jenis Gerbang Bukaan	-

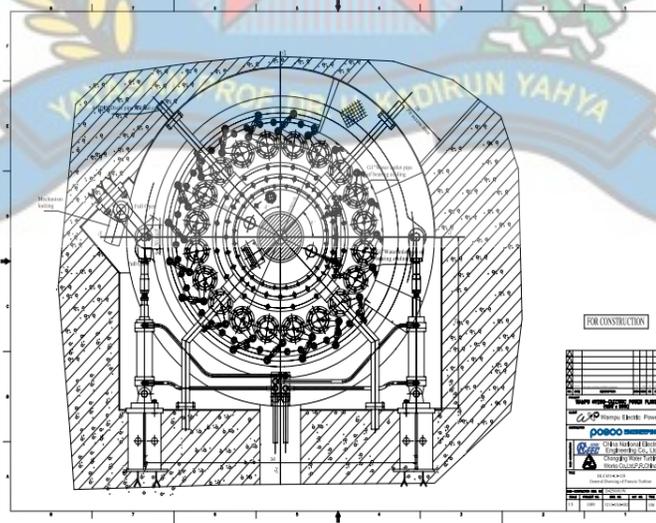
Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

h. Turbin Francis (*Francis Turbine*)

Turbin Francis (*Francis Turbine*) adalah salah satu jenis turbin yang dikelilingi dengan sudu pengarah yang berposisi sudu terbenam ke dalam air seluruhnya. Turbin Francis umumnya digunakan untuk pemanfaatan potensi pembebanan kelas menengah (<100 MW). Turbin Francis sudah bisa dibuat dengan kecepatan putar yang tinggi.



Gambar 2.20 Francis Turbine PLTA Wampu
 Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.21 Technical Drawing Francis Turbine PLTA Wampu
 Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

Tabel 2.7 Data Francis Turbine PLTA Wampu

<i>Hydro Turbine Model</i>	<i>Francis Turbine</i>
----------------------------	------------------------

<i>Hydro Turbine Serial Nr</i>	WAM18-01
<i>Year Manufactured</i>	2018
<i>Rated Speed</i>	600 rpm
<i>Net Head Turbine</i>	155,16 m
<i>Power Output</i>	16,08 MW
<i>Turbine Discharge</i>	11,26 m ³ /s
<i>Runner Diameter</i>	1093 mm
<i>Rotation Type</i>	<i>Clockwise</i>
<i>Rated Efficiency</i>	$\eta = 94,05\%$
<i>Runnaway Speed</i>	nP = 1060 r/Min

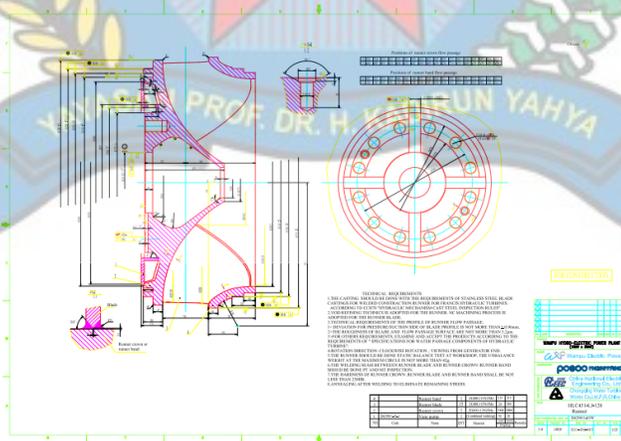
Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

i. Francis Turbine Runner

Merupakan bagian dari turbin Francis yang dapat berputar, terdiri dari sudu turbin dan poros yang berguna untuk merubah energi kinetik menjadi energi mekanik yang terdiri dari 20 bilah runner.



Gambar 2.22 Francis Turbine Runner
 Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.23 Technical Drawing Francis Turbine Runner
 Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

J. *Spiral Case*

Merupakan sebuah saluran yang berbentuk rumah siput dengan konstruksi penampang melintang lingkaran. Yang berfungsi sebagai menampung fluida yang terletak keluar guide vane dan memaksimalkan energi tekanan.



Gambar 2.24 Spiral Case PLTA Wampu
 Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

Gambar 2.25 Technical Drawing Spiral Case PLTA Wampu
 Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

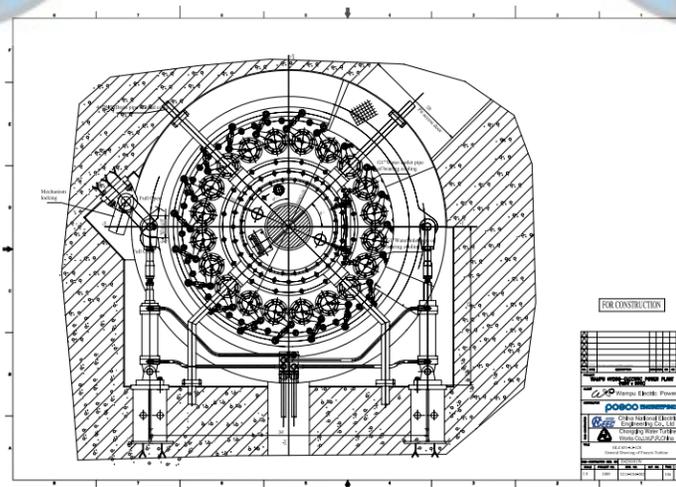
k. Guide Vane

Fungsi dari Guide vane ialah untuk mengatur arah aliran debit air yang masuk pada runner yang berguna sebagai pengatur daya turbin dan kecepatan. Sedangkan untuk mengatur (membuka dan menutup) guide vane dengan menggunakan servo

motor. Pada tiap unit terdapat 2 buah servo motor dan 20 buah guide vane yang dipasang pada setiap spiral case di sekeliling runner.



Gambar 2.26 *Guide Vane PLTA Wampu*
Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.27 *Technical Drawing Guide Vane PLTA Wampu*
Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

Tabel 2.8 Data Main Inlet Valve PLTA Wampu

<i>Nominal Size</i>	1800 mm
<i>Strenght Test Pressure</i>	3,3 Mpa
<i>Nominal Pressure</i>	2,2 Mpa
<i>Seal Test Pressure</i>	1,67 Mpa
<i>Static Head</i>	166,63 m
<i>Pressure Raise Head</i>	220 m
<i>Suitable Medium</i>	<i>Water</i>
<i>Medium Temperature</i>	$\leq 65^{\circ}\text{C}$
<i>Opening Time</i>	90-120 s
<i>Closing Time</i>	90-120 s
<i>Nominal Pressure</i>	16 Mpa
<i>Volume of Oil Tank</i>	700 L

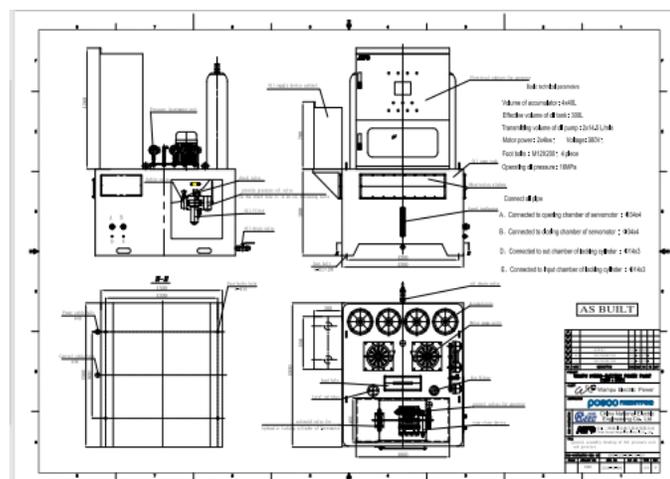
Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

m. *Hydraulic Governor*

Hydraulic Governor bekerja dengan tekanan oli untuk merasakan kecepatan engine secara mekanis dan mengontrol bahan bakar, menciptakan konsistensi kecepatan engine. Hydraulic Governor dapat digunakan untuk hampir semua jenis engine, serta aplikasi lain seperti turbin dan ban berjalan.



Gambar 2.30 *Hydraulic Governor PLTA Wampu*
Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.31 *Technical Drawing Hydraulic Governor PLTA Wampu*
Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

Tabel 2.9 Data *Hydraulic Governor* PLTA Wampu

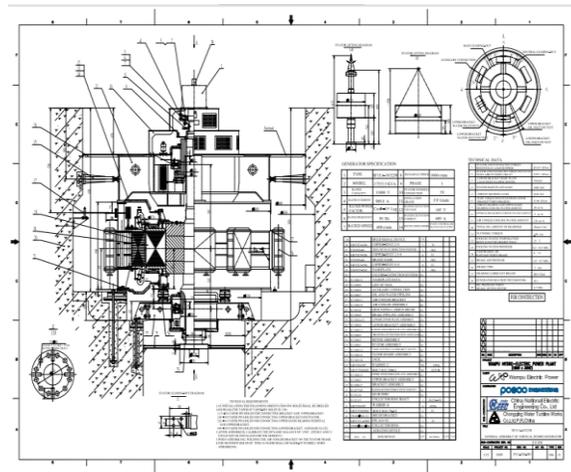
<i>Operation Power</i>	50000 N.M
<i>Max Working Pressure</i>	16 Mpa
<i>Accumulator Capacity</i>	4 x 40L
<i>Nitrogen Accumulator Pressure</i>	9 Mpa
<i>Max Capacity Oil Sump Tank</i>	600 L
<i>Normal Working Value of Oil</i>	300 L
<i>Motor</i>	1450 r/min, 4 kW, Qty : 2
<i>Pump Flow Rate</i>	14.5 L/min, Qty : 2

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

n. Generator

Generator merupakan sebuah alat yang dapat menghasilkan energi listrik dari sumber energi mekanik, pada umumnya menggunakan induksi elektromagnetik. Generator dihubungkan pada turbin melalui gigi-gigi putar sehingga ketika baling-baling turbin berputar maka generator juga ikut berputar. Generator selanjutnya merubah energi mekanik dari turbin menjadi energi elektrik. Generator di PLTA

bekerja seperti halnya generator pembangkit listrik lainnya. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tetapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada di dalam kabel lilitannya.



Tabel 2.10 Data Generator PLTA Wampu

<i>Operation Power</i>	50000 N.M
<i>Rated Voltage</i>	11000 V
<i>Rated Current</i>	909.8 A
<i>Rated Speed</i>	600 rpm
<i>Runaway Speed</i>	1060 rpm
<i>Rated Power Factor</i>	0.9
<i>Motor</i>	1450 r/min, 4 KW, Qty : 2
<i>Pump Flow Rate</i>	14.5 L/min, Qty : 2
<i>Rated Excitation Voltage</i>	145 V
<i>Rated Excitation Current</i>	489 A

<i>Rated Frequency</i>	50 Hz
<i>Insulation Level</i>	F
<i>Phase Number</i>	3
<i>Stator Winding Connection</i>	Y

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

o. Penguat Medan (Exciter)

Sistem eksitasi pada generator adalah sebuah sistem penyuplai tenaga listrik arus searah (DC) sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga suatu generator dapat menyuplai energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator yang bergantung pada besar kecilnya arus eksitasinya.



Gambar 2.34 Exciter Transformer PLTA Wampu

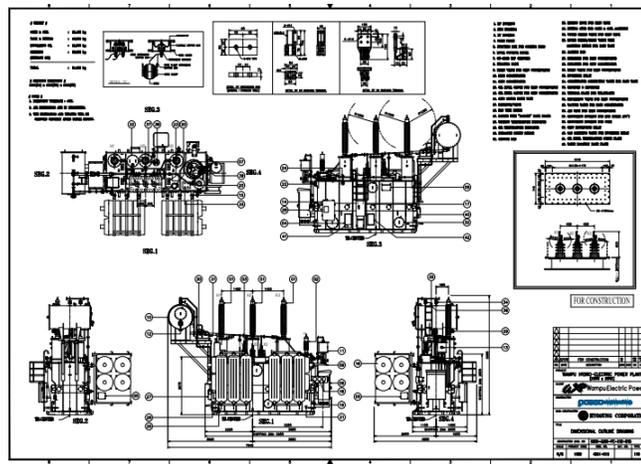
Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022

p. *Step Up Tranformator (SUT)*

Step Up Transformator merupakan sebuah trafo yang mempunyai fungsi untuk menaikkan tegangan dari tegangan primer menjadi tegangan sekunder. Walaupun tegangan dinaikan akan tetapi daya listrik dan frekuensinya akan tetap sama.



Gambar 2.36 Step Up Transformator PLTA Wampu
 Sumber : Dokumentasi Penulis, 2022



Gambar 2.37 Technical Drawing SUT PLTA Wampu
 Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

Tabel 2.12 Data Step Up Transformator PLTA Wampu

<i>Manufactured by</i>	Hyosung	
<i>Rated Voltage (kV)</i>	HV	LV
	150	11
<i>Rated Current (A)</i>	77	1049
<i>No Load Current (%I_H)</i>	0.7	
<i>Load Loss (kW)</i>	300	
<i>Sc Impedance (%)</i>	14	
<i>Total Loss (kW)</i>	370	
<i>Rated Capacity (kVA)</i>	200000	
<i>Cooling Mode</i>	Oil Circulation Cooling	
<i>Number of Phases</i>	3	
<i>Rated Frequency (Hz)</i>	50	
<i>Connection Group</i>	YND1	
<i>Grounding Mode</i>	Direct	

Sumber : Dokumen PT.WEP, 2016

2.6 Persamaan yang Mendukung Penelitian

2.6.1 Persamaan Bernoulli

Asal mula Persamaan Bernoulli ialah dari suatu persamaan energi fluida *incompressible* pada aliran *steady* yang menyatakan bahwa total yang per partisipasinya adalah tetap pada sepanjang satuan jarak.

$$W = m \cdot g \cdot z + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + p \cdot V = \text{konstan} \quad (2.9)$$

Dari persamaan energi diatas kemudian dibagi m maka didapat persamaan dari energi spesifik :

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

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

$$W = g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.10)$$

Dari persamaan spesifik kemudian dibagi g sehingga didapat persamaan pada ketinggian :

$$\frac{W}{g} = \frac{g \cdot z_1}{g} + \frac{\frac{p_1}{\rho}}{g} + \frac{\frac{v_1^2}{2}}{g} = \frac{g \cdot z_2}{g} + \frac{\frac{p_2}{\rho}}{g} + \frac{\frac{v_2^2}{2}}{g}$$

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.11)$$

Keterangan :

P = Tekanan (N/M²)

Z = Ketinggian (m)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

v = Kecepatan aliran (m/s)

Mengenai hubungannya dengan turbin yang semakin tinggi (z) maka energi potensial yang diciptakan semakin besar sehingga dapat berpengaruh pada sumber energi kinetik dalam menubruk sudu. Dengan bertambahnya sumber energi kinetik yang menabrak sudu sehingga putaran yang diciptakan akan semakin besar.

2.6.2 Persamaan Head Efektif (*Heff*)

Head efektif yang dimaksud adalah tinggi aliran air yang jatuh efektif (tinggi air jatuh bersih) suatu turbin air pada selisih dari head air atas dengan head air bawah. Head di sini yang dimaksud adalah penjumlahan, head kecepatan, head tekanan dan head elevasi. Persamaan head efektif bersumber dari selisih persamaan ketinggian dalam persamaan Bernoulli (2.13).

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Maka head efektif adalah selisih H₁ dan H₂

$$H_{eff} = H_1 - H_2$$

$$H_{eff} = \left(Z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (Z_1 - Z_2) \quad (2.12)$$

Keterangan :

H_{eff} = Head Efektif (m)

P_1 = Tekanan permukaan air waduk (N/m^2)

P_2 = Tekanan pada draft tube (N/m^2)

ρ = Massa jenis air (kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

V_1 = Kecepatan air di permukaan air waduk (m/s)

V_2 = Kecepatan air pada draft tube (m/s)

Z_1 = Elevasi permukaan air waduk (m)

Z_2 = Elevasi sensor air keluar dari turbin (m)

2.6.3 Persamaan Koefisien Kavitasasi (σ)

Koefisien kavitasasi disimbolkan dengan *thoma* (σ) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{Hb - Hs}{H}$$

(2.13)

dimana $H_b = H_{atm} - H_v$

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

(2.14)

Keterangan :

H_{atm} = Tekanan Atmosfer

H_v = Tekanan Uap Air

H_s = Tinggi Jarak Vertikal

H = Tinggi Jatuh Efektif



BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

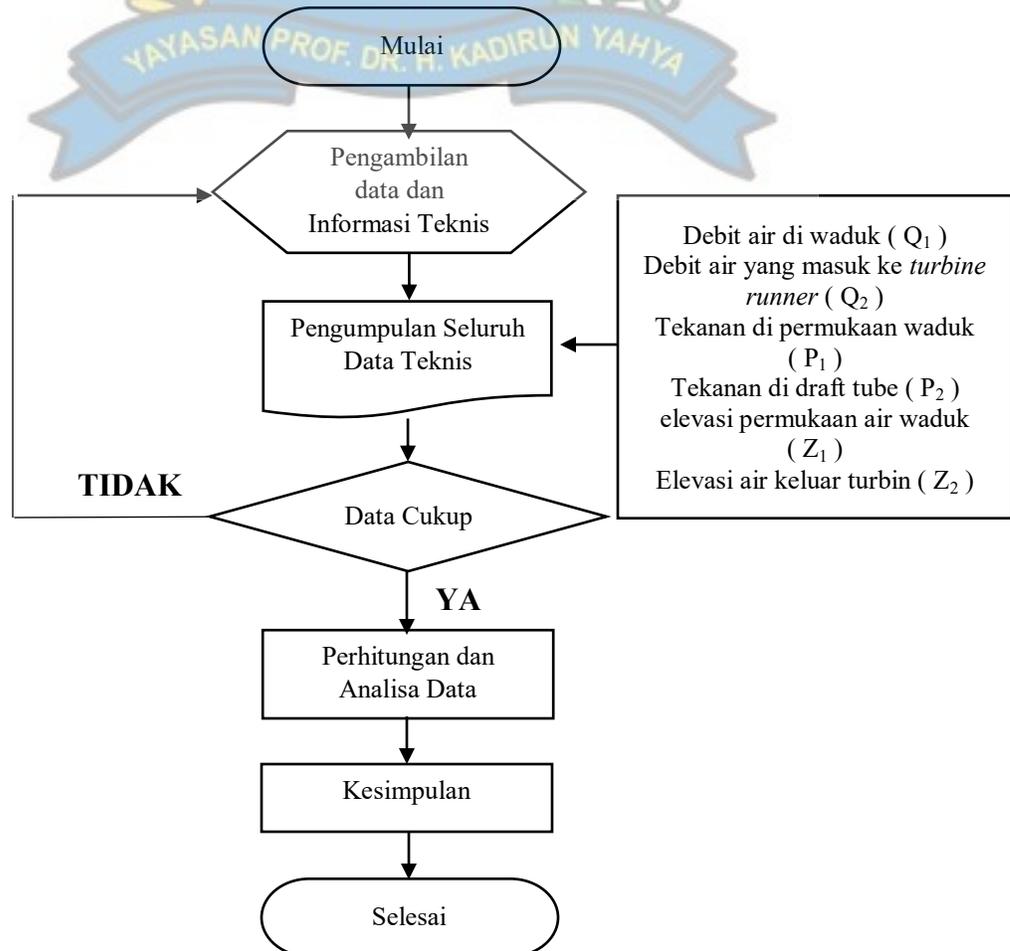
3.1 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun skripsi Analisis Pengaruh Debit Air Terhadap Kavitasi Runner Francis Turbine Unit 1 di PLTA WAMPU 3 X 15 MW adalah sebagai berikut :

3.1.1 Studi Literatur

Melakukan studi literatur dengan mempelajari manual book, informasi data operasional dan teknis tentang perangkat PLTA WAMPU 3 x 15 MW.

3.1.2 Flowchart



3.1.3 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

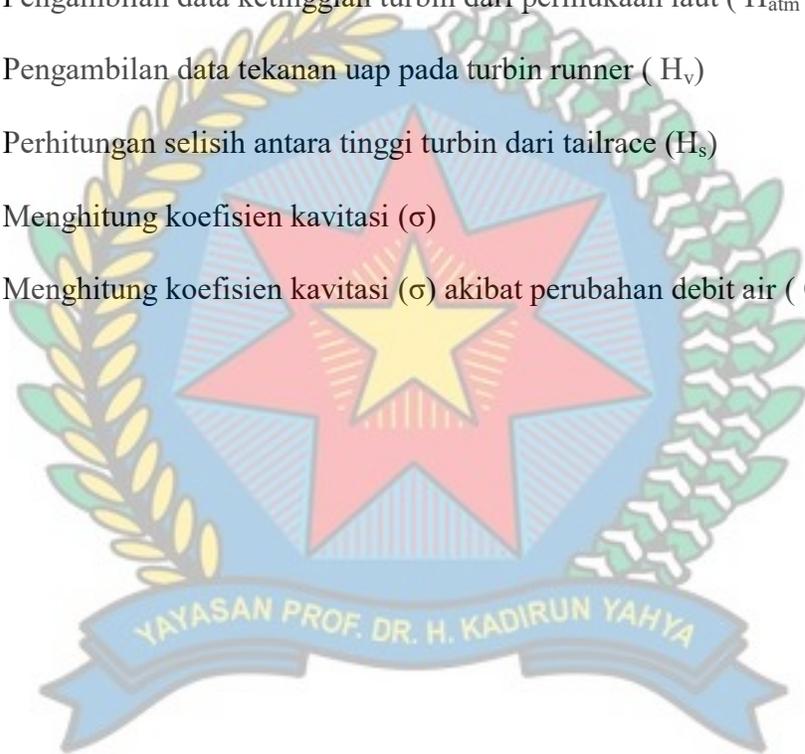
1. Data primer, merupakan data yang diperoleh dari PLTA Wampu seperti: spesifikasi lengkap turbin Francis (gambar kerja), head maksimum, debit air masuk turbin, suhu air, dan tekanan minimum di sisi masuk pipa isap turbin, serta survei lapangan yang dilakukan oleh penulis.
2. Data sekunder, merupakan data yang bersumber dari pustaka-pustaka yang mendukung penelitian.

3.1.4 Prosedur Penelitian

Prosedur yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pengambilan data dan informasi teknis terkait spesifikasi perangkat utama PLTA Wampu.
2. Pengambilan data debit air di waduk (Q_1)
3. Pengambilan data debit air yang masuk ke *turbine runner* (Q_2).
4. Pengambilan data tekanan di permukaan waduk (P_1)
5. Pengambilan data tekanan di draft tube (P_2).
6. Pengambilan data elevasi permukaan air waduk (Z_1)
7. Pengambilan data elevasi air keluar turbin (Z_2)
8. Perhitungan data luas penampang draft tube (A_2)
9. Perhitungan kecepatan air di permukaan waduk (V_1)

10. Perhitungan kecepatan air pada draft tube (V_2)
11. Menghitung head efektif (H_{eff})
12. Pengambilan data ketinggian turbin dari permukaan laut (H_{atm})
13. Pengambilan data tekanan uap pada turbin runner (H_v)
14. Perhitungan selisih antara tinggi turbin dari tailrace (H_s)
15. Menghitung koefisien kavitasi (σ)
16. Menghitung koefisien kavitasi (σ) akibat perubahan debit air (Q_2).



BAB 4

HASIL PENELITIAN

4.1 Data Untuk Perhitungan Head Efektif (H_{eff})

Berikut adalah tabel data yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan Head Efektif (H_{eff}) dengan pembebanan maksimum dari turbin francis unit 1 PLTA Wampu sebesar $P_{max} = \pm 15 \text{ MW} - \pm 16 \text{ MW}$ pada tanggal 01 Maret 2022 :

Tabel 4.1 Data Hasil Observasi Head Efektif (H_{eff})

Data	Nilai	Keterangan
ρ_{air}	998,23 kg/m ³	Dengan Suhu air $\pm 20^{\circ}\text{C}$
g	9,8 m/s ²	Standar Ketetapan Gravitasi
D_2	1.8 m	Data Teknik Perusahaan
A_1	$\infty \text{ m}^2$	Diasumsikan (Tidak Terukur)
A_2	2,54 m ²	Hasil Perhitungan $A_2 = \frac{1}{4} \pi D^2$
Q_1	40 m ³ /s	Laporan Operasional Harian
Q_2	10,44 m ³ /s	Laporan Operasional Harian
P_1	0 N/m ²	Diasumsikan di permukaan waduk
P_2	- 5000 N /m ²	Laporan Operasional Harian
Z_1	419,00 m	Laporan Operasional Harian
Z_2	249,23 m	Laporan Operasional Harian

Sumber : Penulis, 2022

4.2 Perhitungan Persamaan Head Efektif (H_{eff})

Contoh perhitungan untuk mencari kecepatan pada kecepatan air di permukaan waduk dan pada draft tube :

$$V_1 = \left(\frac{Q_1}{A_1} \right) = \left(\frac{40 \text{ m}^3/\text{s}}{\infty \text{ m}^2} \right) = 0 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{9,11 \text{ m}^3/\text{s}}{2,54 \text{ m}^2} \right) = 3,58 \text{ m/s}$$

Setelah didapat hasil perhitungan kecepatan pada contoh diatas maka dapat dicari head efektif (H_{eff}) pada tanggal 01 Maret 2022 dengan Debit air masuk ke turbin sebesar $Q_2 = 9,11 \text{ m}^3/\text{s}$ berikut adalah contoh perhitungan (Persamaan 2.12) :

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

$$H_{eff} = \left(\frac{0 \text{ N/M}^2 - (-5000 \text{ N/M}^2)}{998,23 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} \right) + \left(\frac{0^2 \text{ m/s} - (3,58^2 \text{ m/s})}{2 \cdot 9,8} \right)$$

$$+ (419 \text{ m} - 249,23 \text{ m})$$

$$H_{eff} = \left(\frac{5000 \text{ N/M}^2}{9782,654 \text{ N/M}^2} \right) + \left(- \frac{12,8164 \text{ m/s}}{19,6 \text{ m/s}^2} \right) + (169,77 \text{ m})$$

$$H_{eff} = (0,511 - 0,653 + 169,77) \text{ m}$$

$$H_{eff} = 169,627 \text{ m}$$

4.3 Data untuk Perhitungan Koefisien Kavitas (σ)

Berikut adalah tabel data yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan untuk koefisien kavitas dari turbin francis unit 1 PLTA Wampu pada tanggal 01 Maret 2022 berdasarkan data lanjutan dari head efektif yang telah didapat :

Tabel 4.2 Data Untuk Perhitungan Koefisien Kavitas (σ)

Data	Nilai	Keterangan
H_{atm}	10,10 m	Tabel hubungan ketetapan tinggi permukaan laut dan tekanan atmosfer ($H_{turbin} = 246,28$ m)
H_v	0,24 m	Tabel hubungan ketetapan antara suhu air dan tekanan uap
H_s	-2,95 m	Selisih antara tinggi turbin dan tinggi air pada tailrace ($H_s = H_{turbin} - H_{tailrace}$)
H_{eff}	169,627 m	Hasil perhitungan 4.2

Sumber : Penulis, 2022

4.4 Perhitungan Persamaan Koefisien Kavitas (σ)

Contoh perhitungan untuk mencari koefisien kavitas dengan menggunakan Persamaan (2.14) pada tanggal 01 Maret 2022 dengan hasil perhitungan 4.2 :

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

$$\sigma = \frac{10,10 \text{ m} - 0,24 \text{ m} - (-2,95) \text{ m}}{169,62 \text{ m}}$$

$$\sigma = \frac{12,81 \text{ m}}{169,627 \text{ m}} = 0,075518638$$

4.5 Data Hasil Perbandingan Koefisien Kavitasi dengan Debit Air

Berikut adalah data perhitungan koefisien kavitasi dan perbandingan antara debit air dan head efektif dengan beban daya 15MW \pm 8% pembebanan puncak (18.00 WIB) pada periode Maret 2022 :

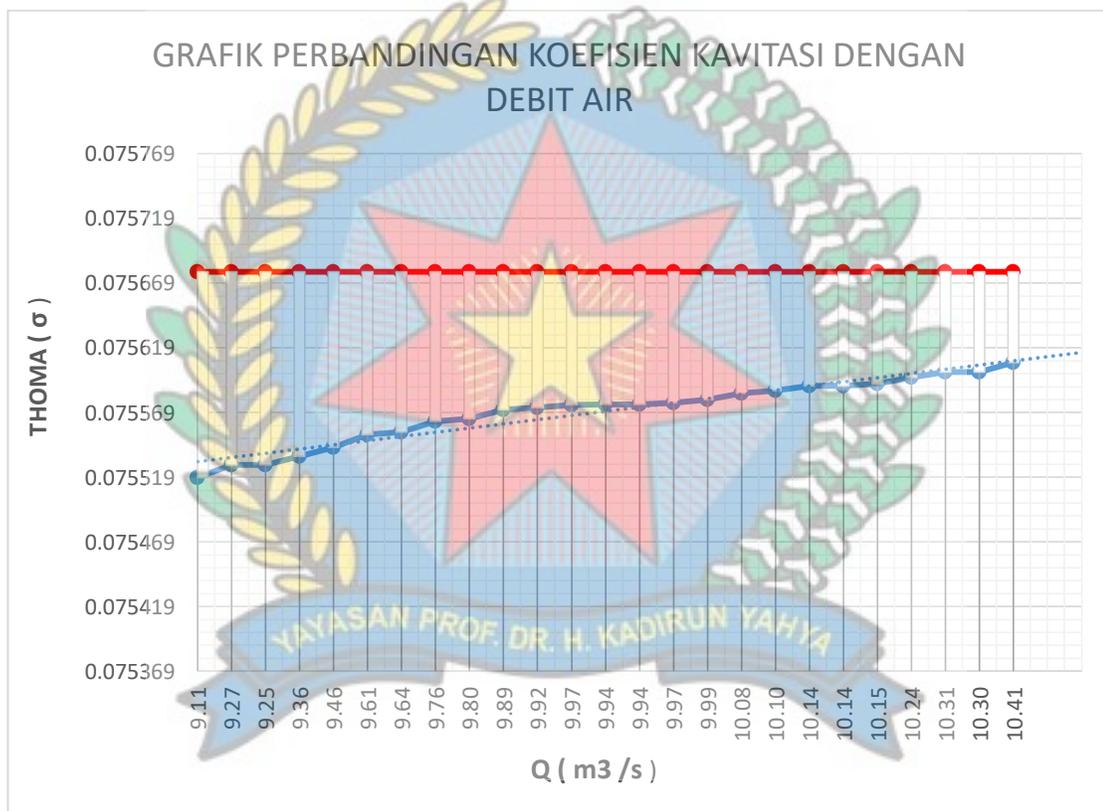
Tabel 4.3 Data perhitungan koefisien kavitasi dengan debit air

Periode	Q_2 (m ³ /s)	V_2 (m/s)	H_{eff} (m)	Load (MW)	σ
STANDAR	11,26 m ³ /s	4,43 m ³ /s	169,27 m	16,08 MW	0,075677911
01 Mar 2022	9,11 m ³ /s	3,58 m/s	169,627 m	15,05 MW	0,075518638
02 Mar 2022	10,24 m ³ /s	4,03 m/s	169,453 m	15,97 MW	0,075596183
03 Mar 2022	Unit Stop	Unit Stop	Unit Stop	0 MW	Unit Stop
04 Mar 2022	9,92 m ³ /s	3,90 m/s	169,505 m	15,97 MW	0,075572991
05 Mar 2022	Unit Stop	Unit Stop	Unit Stop	0 MW	Unit Stop
06 Mar 2022	Low Load	Low Load	Low Load	10,69 MW	Low Load
07 Mar 2022	10,31 m ³ /s	4,05 m/s	169,444 m	15,84 MW	0,075600198
08 Mar 2022	10,08 m ³ /s	3,96 m/s	169,481 m	16,24 MW	0,075583693
09 Mar 2022	9,80 m ³ /s	3,85 m/s	169,525 m	15,84 MW	0,075564076

10 Mar 2022	10,14 m ³ /s	3,99 m/s	169,468 m	16,24 MW	0,075589491
11 Mar 2022	9,94 m ³ /s	3,91 m/s	169,500 m	15,84 MW	0,075575221
12 Mar 2022	9,94 m ³ /s	3,91 m/s	169,500 m	15,84 MW	0,075575221
13 Mar 2022	Low Load	Low Load	Low Load	7,13 MW	Low Load
14 Mar 2022	9,76 m ³ /s	3,84 m/s	169,529 m	15,97 MW	0,075562293
15 Mar 2022	9,89 m ³ /s	3,89 m/s	169,509 m	15,84 MW	0,075571208
16 Mar 2022	9,97 m ³ /s	3,92 m/s	169,501 m	15,84 MW	0,075574775
17 Mar 2022	10,10 m ³ /s	3,97 m/s	169,476 m	16,10 MW	0,075585923
18 Mar 2022	9,97 m ³ /s	3,92 m/s	169,497 m	15,84 MW	0,075576558
19 Mar 2022	10,30 m ³ /s	4,05 m/s	169,444 m	15,84 MW	0,075600198
20 Mar 2022	10,41 m ³ /s	4,09 m/s	169,427 m	16,10 MW	0,075607783
21 Mar 2022	10,15 m ³ /s	4,00 m/s	169,464 m	16,10 MW	0,075591276
22 Mar 2022	10,14 m ³ /s	3,99 m/s	169,468 m	15,97 MW	0,075589491
23 Mar 2022	9,61 m ³ /s	3,78 m/s	169,552 m	15,31 MW	0,075552043
24 Mar 2022	9,36 m ³ /s	3,68 m/s	169,590 m	15,05 MW	0,075535114
25 Mar 2022	9,25 m ³ /s	3,64 m/s	169,605 m	15,05 MW	0,075528433
26 Mar 2022	Unit Stop	Unit Stop	Unit Stop	0 MW	Unit Stop
27 Mar 2022	9,64 m ³ /s	3,79 m/s	169,548 m	15,18 MW	0,075553825
28 Mar 2022	9,27 m ³ /s	3,64 m/s	169,605 m	15,05 MW	0,075528433
29 Mar 2022	9,46 m ³ /s	3,72 m/s	169,574 m	15,18 MW	0,075542241
30 Mar 2022	9,99 m ³ /s	3,93 m/s	169,492 m	15,84 MW	0,075578788

31 Mar 2022	Unit Stop	Unit Stop	Unit Stop	0 MW	Unit Stop
-------------	-----------	-----------	-----------	------	-----------

Sumber : Penulis, 2022



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Koefisien Kavitas Dengan Debit Air
 Sumber : Penulis, 2022

Berdasarkan informasi yang didapatkan pada gambar 4.1 diketahui bahwa pada saat debit air turbin (Q_2) mengalami peningkatan maka kemudian akan membuat koefisien kavitas (σ) daripada *turbine runner* juga ikut meningkat. Tentu hal ini juga berdasarkan informasi yang diperoleh dari data pada tabel 4.3 bahwa peningkatan debit air turbin (Q_2) akan mempengaruhi kecepatan dari air yang masuk kedalam *turbine runner* (V_2) dan akan memberikan pengurangan pada Head Efektif (H_{eff}).

Perlu diketahui bahwa semakin besar koefisien kavitasi (σ) maka kemungkinan bagi *francis turbin runner* untuk mengalami kavitasi akan semakin kecil dan sebaliknya koefisien kavitasi yang semakin kecil akan memperbesar kemungkinan bagi perangkat *turbine runner* untuk mengalami kavitasi (gambar 4.1).



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil perhitungan dan analisa yang telah didapatkan pada BAB 4 maka penulis mengambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Head Efektif (H_{eff}) pada PLTA Wampu 3 x 15 MW berbanding terbalik dengan debit air yang masuk kedalam *turbine runner* dimana Head Efektif (H_{eff}) tertinggi berada pada tanggal 01 Maret 2022 dengan nilai 169,627 m dan debit air yang masuk kedalam *turbine runner* (Q_2) sebesar 9,11 m³ /s. Sedangkan Head Efektif (H_{eff}) terendah berada pada tanggal 20 Maret 2022 dengan nilai 169,427 m dan debit air yang masuk kedalam *turbine runner* (Q_2) sebesar 4,09 m³ /s.
2. Koefisien Kavitasasi (σ) pada PLTA Wampu 3 x 15 MW akan berbanding lurus dengan debit air yang masuk kedalam *turbine runner* (Q_2) dimana koefisien kavitasasi (σ) terbesar ditunjukkan pada tanggal 20 Maret 2022 dengan nilai 0,075607783 dan debit air yang masuk kedalam *turbine runner* (Q_2) sebesar 4,09 m³ /s. Sedangkan koefisien kavitasasi (σ) terendah ditunjukkan pada tanggal 01 Maret 2022 dengan nilai 0,075518638 dan debit air yang masuk kedalam *turbine runner* (Q_2) sebesar 9,11 m³ /s.

3. Berdasarkan dari hasil analisa pada BAB 4 dimana koefisien kavitasi (σ) pada periode maret 2022 menunjukkan adanya peningkatan kavitasi namun masih berada dibawah standar yang berdasarkan diketahui dari spesifikasi teknis sebesar (σ) **0,075677911** dan debit air sebesar **4,43 m³ /s.** dalam hal ini perbandingan dengan koefisien kavitasi (σ) yang terbesar ditunjukkan pada tanggal 20 Maret 2022 dengan nilai 0,075607783 dengan debit air yang masuk kedalam *turbine runner* (Q_2) sebesar 4,09 m³ /s.

5.2 Saran

Dalam penelitian yang penulis uraikan masih terdapat banyak kekurangan dan akan dibutuhkan beberapa saran agar dapat menjadi penelitian yang lebih baik daripada sebelumnya berikut beberapa saran :

1. Terjadinya kavitasi tidak dapat dihindari namun dapat dilakukan upaya untuk mengurangi tingkat kavitasi pada *turbine runner* unit 1 PLTA Wampu 3 x 15 MW berupa pengaturan debit air yang masuk kedalam turbin sesuai dengan spesifikasi pabrikan untuk menambah masa pakai dari perangkat unit 1 PLTA Wampu dalam hal ini *turbine runner*.
2. Untuk dilakukan pemeliharaan berkala secara visual dan tindakan untuk menghindari terjadinya kerusakan lebih lanjut terhadap perangkat PLTA Wampu 3 x 15 MW.
3. Bagi penelitian selanjutnya agar diharapkan dapat menganalisis pengaruh dari variabel diluar penelitian ini seperti keterkaitan dengan *Main Inlet Valve (MIV)* dan *Hydraulic Governor*.

DAFTAR PUSTAKA

- Arief Muliawan, A. Y. (2016). Analisis Daya dan Efisiensi Turbin Air Kinetis Akibat Perubahan Putaran Runner. *Journal of Sainstek*, 1-9.
- Arifin, M. Z. (2017). *Analisa Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasi Pada Turbin Francis di PT PJB Unit Pembangkitan Brantas Unit PLTA Sutami*. Institut Teknologi Sepuluh November, Teknik Mesin Industri, Surabaya.
- Biantoro, T. (2016). *Analisa Kavitasi Yang Terjadi Pada Turbin Francis di PLTA PB Soedirman*. Universitas Gadjah Mada, Fakultas Teknik Mesin, Yogyakarta.
- Effendy, W. d. (2010). Aplikasi Response Getaran Untuk Menganalisis Fenomena Kavitasi Pada Instalasi Pompa Sentrifugal. *Jurnal Penelitian Sains dan Teknologi*, 11(2), 191-206.
- Kala, I. D. (2020). *Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro di Desa Batu Pataneteang Kabupaten Bantaeng*. Universitas Muhammadiyah Makassar, Fakultas Teknik Elektro, Makassar.
- Lukas, D. R. (2017, Maret 17). Studi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas. *Jurnal Teknik Elektro*, 17-23.
- Nugraha, E. P. (2020). *Deteksi Kavitasi Pada Pompa Peripheral Dengan Metode Spektrum Getaran*. Universitas Hasanuddin, Fakultas Teknik Mesin, Makassar.

Robert J., 2002. “Hidrolika Terapan: Aliran Pada Saluran Terbuka. Dan Pipa”, Andi.
Yogyakarta

Rajput, Ramesh. 2007. A Textbook of Hydraulic Machine (Fluid Mechanics and Hydraulic Machines – Part II) in SI Units. New Delhi: S. Chand & Company Ltd.

Sarayar, D. S. (2017). *Pengaruh Ketidakstabilan Debit Air dan Curah Hujan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Pejengkolan Terhadap Produktifitas Energi Listrik Yang Dihasilkan.* Universitas Negeri Semarang, Fakultas Teknik Elektro, Semarang.

Sinaga, S. P. (2016). *Pengaruh Bukaan Sudu Pengarah Terhadap Tingkat Kavitasi di Sisi Masuk Pipa Isap Turbin Francis Vertikal Unit 4 PLTA Tangga di P.T Inalum Power Plant.* Universitas Sumatera Utara, Fakultas Teknik Mesin, Medan.

Siwi, 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.* Universitas Tridiananti Malang, Fakultas Teknik Mesin, Malang.

Wibowo Prayatno.2007. Turbin air. EDISI, Ed. 2. Penerbitan, Yogyakarta : Graha ilmu.