

ANALISIS UNJUK KERJA DAN TINGKAT KAVITASI PADA
TURBIN KAPLAN DI PLTA BILI-BILI



SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan
Pendidikan diploma empat (D-4) Program Studi Teknik Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Ujung Pandang

SUCI IKA PRATIWI
442 18 049

PROGRAM STUDI D-4 TEKNIK PEMBANGKIT ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG
MAKASSAR
2022

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul **Analisis Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasasi pada Turbin Kaplan di PLTA Bili-Bili** oleh Suci Ika Pratiwi NIM 44218049 dinyatakan layak untuk diujikan.

Makassar, 19 September 2022

Pembimbing I,



Ir. Nur Hamzah, M.T. Ph.D.
NIP. 19631111 199303 1 002

Pembimbing II,

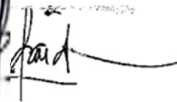


Ir. Andreas Pangkuang, M. T.
NIP. 19620828 198903 1 003

Mengetahui



Koordinator Program Studi D-4 Teknik
Pemanfaatan Energi,



Ir. Chandra Buana, M.T
NIP. 19650319 199103 1 003

HALAMAN PENERIMAAN

Pada hari Senin, 19 September 2022 Tim Penguji Ujian Skripsi telah menerima dengan baik hasil skripsi oleh mahasiswa: Suci Ika Pratiwi NIM 44218049 dengan Judul “**Analisis Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasi pada Turbin Kaplan di PLTA Bili-Bili**”.

Makassar, 19 September 2022

Tim Penguji Ujian Sidang Skripsi :

- | | | |
|--------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Ir. Suryanto, M. Sc.,Ph.D. | Ketua | (..... ) |
| 2. Ir. Herman Nauwir, M.T. | Sekretaris | (..... ) |
| 3. Prof. Ir. Muhammad Anshar, M.Si., Ph.D. | Anggota | (..... ) |
| 4. Ir. Lewi, M.T. | Anggota | (..... ) |
| 5. Ir. Andreas Pangkuang, M.T. | Pengarah | (..... ) |
| 6. Ir. Nur Hamzah, M.T. Ph.D. | Pengarah | (..... ) |

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah, serta inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini yang berjudul “Analisis Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasi pada Turbin Kaplan di PLTA Bili-Bili”. Tak lupa shalawat serta taslim kepada nabiullah Muhammad SAW yang memimpin umatnya dari alam kegelapan ke alam yang terang benderang.

Skripsi ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan Pendidikan Diploma IV pada Program Studi Teknik Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis telah mendapat banyak bimbingan, saran, dan bantuan dari berbagai pihak, oleh karenanya pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kepada Allah SWT yang telah memberikan kesehatan dan kesempatan serta keberkahannya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Kerja Praktik ini.
2. Orang tua dan teman-teman yang telah memberikan doa, dorongan serta semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Kerja Praktek ini.
3. Bapak Prof. Ir. Muhammad Anshar, M.Si., Ph.D., selaku Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang
4. Bapak Rusdi Nur, S.S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin yang telah memberi kesempatan untuk melakukan Praktek Kerja Lapangan.

5. Bapak Ir. Chandra Buana, M.T. selaku Ketua Program Studi D4 Teknik Pembangkit Energi.
6. Bapak Ir. Laode Musa, M.T, selaku wali kelas 4B Teknik Pembangkit Energi.
7. Bapak Ir. Nur Hamzah, M.T. Ph. D. selaku Dosen Pembimbing I dan Ir. Andareas Pangkuang, M. T. selaku Dosen Pembimbing II.
8. Segenap dosen Jurusan Teknik Mesin pada umumnya serta Program Studi Teknik Pembangkit Energi pada khususnya yang selama ± 4 Tahun memberikan ilmunya dengan penuh ikhlas dan penuh kerelaan hari.
9. Segenap Staff Pegawai dan Teknisi Program Studi Teknik Pembangkit Energi yang dengan penuh kesabaran telah membantu penulis.
10. Bapak Bahtiar selaku Manager ULPLTA Bili-Bili yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
11. Bapak Amiruddin selaku Supervisor Operasi yang telah memberikan ilmunya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
12. Seluruh operator ataupun karyawan ULPLTA Bili-Bili yang telah banyak membantu selama penyusunan Tugas Akhir ini.
13. Teman-teman Angkatan 2018 (“**The Immortal Engine**”) yang telah menjadi keluarga bagi penulis selama menempuh Pendidikan di Politeknik Negeri Ujung Pandang.
14. Rekan-rekan kelas 4B Teknik Pembangkit Energi yang telah berjuang bersama menyelesaikan Pendidikan selama 4 Tahun ini.

15. Himpunan Mahasiswa Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang yang menjadi rumah kedua penulis dan menjadi tempat bagi penulis dalam mengembangkan soft skill.

16. Semua pihak yang tidak sempat penulis sebutkan satu persatu yang telah berpartisipasi membantu penulis hingga selesainya Tugas Akhir ini.

Dengan kerendahan hati penulis mengucapkan mohon maaf apabila terdapat kesalahan dan kekurangan dalam isi Skripsi ini. Penulis menyadari bahwa pengetahuan dan pengalaman yang penulis miliki belum sempurna, sehingga diperlukannya masukan serta kritikan yang membangun agar dapat lebih baik kedepannya.



Makassar, 19 September 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'S. Haps.', is written over a horizontal line.

Penullis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PENERIMAAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR SIMBOL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
SURAT PERNYATAAN.....	xiv
RINGKASAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	3
2.1.1 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	3
2.2 Turbin Air.....	4
2.2.1 Pengertian Turbin Air	4
2.2.2 Klasifikasi Turbin Air	4
1. Turbin Impuls.....	5

2. Turbin Reaksi.....	6
2.3 Komponen Utama PLTA	8
2.3.1 Bendungan / Dam.....	8
2.3.2 Intake.....	9
2.3.3 Penstock (Pipa Pesat)	10
2.3.4 Turbin.....	11
2.3.5 Generator.....	12
2.4 Turbin yang digunakan untuk Tugas Akhir ini (Turbin Kaplan)	16
2.4.1 Pengertian Turbin Kaplan	16
2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Kaplan	17
2.5 Kavitasi.....	17
2.5.1 Pengertian Kavitasi	17
2.5.2 Akibat Kavitasi	18
2.5.3 Daerah Rawan Kavitasi	18
2.5.4 Pencegahan Kavitasi	19
2.6 Persamaan yang Mendukung Penelitian	20
2.6.1 Persamaan Head Efektif	20
2.6.2 Persamaan Daya Hidrolik	20
2.6.3 Persamaan Daya Turbin	21
2.6.4 Persamaan Efisiensi Turbin.....	22
2.6.5 Persamaan Kecepatan Spesifik	22
2.6.6 Persamaan Koefisien Kavitasi.....	23
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Metode Penelitian.....	25
3.1.1 Studi Literatur	25
3.1.2 Observasi.....	25

3.1.3	Perhitungan Data dan Analisis	26
3.1.4	Kesimpulan	26
3.1.5	Flowchart	26
3.2	Jadwal Pelaksanaan	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Contoh Perhitungan Turbin Unit 2.....	29
4.1.1	Head Efektif (H_{eff})	29
4.1.2	Daya Hidrolik (P_h).....	29
4.1.3	Daya Turbin (P_t).....	29
4.1.4	Efisiensi Turbin (η_t)	30
4.1.5	Kecepatan Spesifik Turbin (n_s).....	30
4.1.6	Koefisien Kavitas instalasi turbin (σ_{inst}).....	30
4.1.7	Koefisien Kavitas Operasi (σ_o).....	30
4.1.8	Koefisien Kritis Kavitas (σ_c)	31
4.2	Data Hasil Perhitungan dan Analisa.....	32
4.2.1	Perbandingan Daya Hidrolik terhadap Debit	32
4.2.2	Perbandingan Efisiensi Turbin terhadap Debit	33
4.2.3	Perbandingan Daya Turbin terhadap Debit.....	344
4.2.4	Perbandingan Koefisien Kavitas Instalasi Turbin terhadap.....	33
4.2.5	Perbandingan Koefisien Kavitas Instalasi Turbin, Koefisien Kavitas Operasi Dan Koefisien Kritis Kavitas.....	36
BAB V PENUTUP.....		37
5.1	Kesimpulan.....	37
5.2	Saran.....	37

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Gambar 2 . 1 Data Bendungan Bili-Bili.....	8
Gambar 2 . 2 Data Intake	10
Gambar 2 . 3 Spesifikasi Penstok.....	11
Gambar 2 . 4 Spesifikasi Turbin Air	12
Gambar 2 . 5 Spesifikasi Generator PLTA Bili-Bili.....	14



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Turbin Pelton.....	5
Gambar 2. 2 Turbin Francis	6
Gambar 2. 3 Turbin Kaplan	7
Gambar 2. 4 Bendungan Bili-Bili	9
Gambar 2. 5 Papan Elevasi di Samping Intake.....	10
Gambar 2. 6 Pipa Penstock.....	11
Gambar 2. 7 Rotor.....	13
Gambar 2. 8 Stator	14
Gambar 2. 9 Generator.....	15
Gambar 2. 10 Turbin Kaplan	16
Gambar 2. 11 Kerusakan Turbin Akibat Kavitas.....	18
Gambar 2. 12 Contoh Kerusakan Material Runner Akibat Kavitas.....	19
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian.....	27



DAFTAR SIMBOL

SIMBOL	SATUAN	KETERANGAN
Z_1	m	Elevasi Dam
Z_2	m	Elevasi Turbin
H_{eff}	m	Head Efektif
P_h	kW	Daya Hidrolik
ρ	Kg/m^3	Massa Jenis Air
g	m/s^2	Konstanta Percepatan Gravitasi
Q	m^3/s	Debit Air
P_t	kW	Daya Turbin
P_l	kW	Daya Generator
P	w	Daya
η_g	%	Efisiensi Generator
η_t	%	Efisiensi Turbin
n_s	rpm	Kecepatan Spesifik
n	rpm	Kecepatan Nominal
σ_{ins}	-	Koefisien Kavitasi Instalasi Turbin
σ_o	-	Koefisien Kavitasi Operasi
σ_c	-	Koefisien Kritis Kavitasi
$P_{atm} = H_{atm}$	N/m^2	Tekanan Atmosfir
P_r	N/m^2	Tekanan Statis Pada Sisi Outlet Runner
H_v	N/m^2	Tekanan Uap Air
H_s	N/m^2	Tinggi Isap Air
H	m	Elevasi Tinggi Jatuh Air

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Data Pengamatan (31 Desember 2007)	41
Lampiran 2 Tabel Hasil Analisis (31 Desember 2007).....	43
Lampiran 3 Tabel Data Pengamatan (31 Desember 2020)	45
Lampiran 4 Tabel Hasil Analisis (31 Desember 2020).....	47
Lampiran 5 Tabel Konversi	49
Lampiran 6 Outline Turbin Kaplan ULPLTA Bili-Bili.....	52
Lampiran 7 Hubungan Antara N_s dan Thoma	53
Lampiran 8 Surat Validasi Data.....	54
Lampiran 9 Dokumentasi Pengambilan Data	55



SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama Lengkap : Suci Ika Pratiwi
NIM : 442 18 049
Program Studi : D4 Teknik Pembangkit Energi
Tempat / Tgl. Lahir : Baraka, 16 Februari 1999
Alamat : BTP Blok A Perumahan Graha Tiga Putra

Dengan ini menyatakan :

- A. Tugas Akhir / Skripsi yang berjudul :
Analisis Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasi pada Turbin Kaplan di
PLTA Bili-Bili
- Adalah benar disusun / dibuat oleh saya sendiri dan jika dikemudian hari diketahui berdasarkan bukti-bukti yang kuat ternyata Tugas Akhir / Skripsi tersebut dibuatkan oleh orang lain atau diketahui bahwa Tugas Akhir / Skripsi tersebut merupakan plagiat/mencontek/menjiplak hasil karya ilmiah orang lain, maka dengan ini saya siap menerima segala yang ditimbulkan berupa pembatalan/pencabutan Gelar Akademik dan siap mengulang kembali dari awal.
- B. Bahwa seluruh dokumen (copy ijazah, copy transkrip nilai) dan lain-lain sebagai persyaratan sidang adalah asli milik saya pribadi dan dapat saya pertanggung jawabkan keasliannya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Makassar,

Hormat Saya,



(Suci Ika Pratiwi)

ANALISIS UNJUK KERJA DAN TINGKAT KAVITASI PADA TURBIN KAPLAN DI PLTA BILI-BILI

RINGKASAN

Kavitasi yaitu proses terbentuknya gelembung-gelembung air pada turbin karena tekanan air pada turbin turun menjadi tekanan uap jenuh yang menyebabkan getaran, pengikisan dan penurunan performansi. Fenomena kavitasi dapat diprediksi dan dihindari dengan menghitung nilai tingkat kavitasi yang berasal dari perbandingan angka Thoma aktual dan kritis. Tingkat kavitasi yang diteliti yaitu pada instalasi Turbin Kaplan. Tingkat kavitasi sebagai variabel terikat diteliti pengaruhnya dengan beban operasi sebagai variabel bebas. Besar beban operasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebesar 20 MW.

Dalam penelitian ini, berfokus pada kinerja turbin dengan melihat tingkat kavitasi yang di hasilkan selama pengoperasian. Metode yang digunakan pada penelitian adalah pengevaluasian yang dilakukan dengan dua cara yaitu mengumpulkan data dan melakukan analisis data. Data-data tersebut diperoleh dengan studi literatur sebagai pengambilan data untuk analisis dan untuk melengkapi data didapat dari observasi (wawancara) dengan operator ULPLTA Bili-Bili.

Berdasarkan hasil penelitian diketahui bahwa Turbin Unit 2 PLTA Bili-Bili mengalami kavitasi berdasarkan nilai σ_o dan σ_{inst} nilainya lebih besar dari pada nilai σ_c dan nilai σ_o lebih besar dari nilai σ_{inst} . Tingkat kavitasi kecil sehingga tidak mengakibatkan efisiensi turbin turun drastis. Hal ini dilihat dari efisiensi turbin yang masih dalam batas normal.

Kata Kunci : kavitasi, turbin kaplan

ANALYSIS OF PERFORMANCE AND CAVITATION LEVELS IN KAPLAN TURBINE AT BILI-BILI HEPP

SUMMARY

Cavitation is the process of forming water bubbles in the turbine because the water pressure in the turbine drops to saturated steam pressure which causes vibration, erosion and decreased performance. The cavitation phenomenon can be predicted and avoided by calculating the cavitation level values derived from the comparison of the actual and critical Thoma numbers. The level of cavitation studied was at the Kaplan Turbine installation. The effect of cavitation as the dependent variable is investigated with operating load as the independent variable. The operating load used in this study is 20 MW.

In this study, focusing on turbine performance by looking at the level of cavitation generated during operation. The method used in this research is evaluation which is carried out in two ways, namely collecting data and conducting data analysis. These data were obtained by means of a literature study as data collection for analysis and to complete the data obtained from observations (interviews) with Bili-Bili ULPLTA operators.

Based on the research results it is known that the Turbine Unit 2 of the Bili-Bili Hydropower Plant experiences cavitation based on the value of σ_o and σ_{inst} which is greater than the value of σ_c and the value of σ_o is greater than the value of σ_{inst} . The cavitation level is small so it doesn't cause the turbine efficiency to drop drastically. This can be seen from the efficiency of the turbine which is still within normal limits.

Keywords: cavitation, Kaplan turbine

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini listrik adalah kebutuhan yang sangat penting dan paling dibutuhkan untuk kehidupan manusia. Tingkat ketersediaan listrik juga menjadi salah satu indikator kemajuan suatu negara. Oleh karena itu PT PLN (Persero) secara tidak langsung dituntut untuk selalu menyediakan listrik yang berkualitas dan handal.

Kebutuhan energi listrik saat ini semakin besar. Hal ini dikarenakan beberapa faktor yaitu meningkatnya populasi penduduk Indonesia, semakin banyaknya peralatan yang membutuhkan energi listrik, dan menurunnya sumber energi listrik.

Fakta di lapangan menjelaskan bahwa saat kebutuhan listrik di penuhi pengoperasian akan berlangsung terus-menerus demi menjaga ketersediaan listrik lama-kelamaan akan menyebabkan penurunan unjuk kerja pada turbin tersebut. Sehingga hasil output daya yang tidak maksimal. Hal itu disebabkan beberapa faktor, yaitu debit air yang berubah-ubah, elevasi waduk yang berubah-ubah dan tingkat kavitasi pada turbin air. Maka dari itu, untuk menjaganya diperlukan perhitungan dan perencanaan yang handal agar diketahui unjuk kerja turbin sehingga dapat menjaga performa yang efektif dan menghasilkan output sesuai kapasitas dari pembangkit itu sendiri. (Siwi, 2020)

Terkait dengan fakta yang ada maka penulis akan mengangkat judul “Analisis Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasi pada Turbin Kaplan di PLTA Bili-BILI” dengan membahas permasalahan kavitasi jika sedang melakukan pengoperasian. Dengan itu fenomena kavitasi tersebut dapat diperkirakan dengan menghitung angka Thoma (σ) agar tidak mencapai batas angka kritis sesuai spesifikasi yang telah ditentukan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah yang diperoleh sebagai berikut:

1. Bagaimana unjuk kerja pada Turbin Kaplan di PLTA Bili-Bili?
2. Bagaimana tingkat kavitasi ditinjau dari hubungan antara kecepatan spesifik dengan koefisien kavitasi?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Dari permasalahan yang harus diselesaikan di atas, maka perlu adanya batasan masalah agar dalam melakukan analisis nantinya tidak melebar dan memudahkan dalam melakukan analisis. Batasan-batasan masalah tersebut yaitu :

1. Unjuk kerja turbin Unit 2 pada beban minimum operasi, yakni 20 MW.
2. Tingkat kavitasi berdasarkan hubungan antara koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui unjuk kerja turbin Kaplan.
2. Mengetahui tingkat kavitasi berdasarkan hubungan antara koefisien kavitasi instalasi turbin dengan kecepatan spesifik.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Dapat memberikan referensi unjuk kerja turbin Kaplan kepada perusahaan terutama di PLTA Bili-Bili.
2. Dapat mengetahui tingkat kavitasi pada turbin Kaplan di PLTA Bili-Bili.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) bekerja dengan cara merubah energi potensial (dari dam atau air terjun) menjadi energi mekanik (dengan bantuan turbin air) dan dari energi mekanik menjadi energi listrik (dengan bantuan generator). Namun, secara luas, pembangkit listrik tenaga air tidak hanya terbatas pada air dari sebuah waduk atau air terjun, melainkan juga meliputi pembangkit listrik yang menggunakan tenaga air dalam bentuk lain seperti tenaga ombak. (Alamsyah Fitrah, 2017)

2.1.1 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah suatu pembangkit yang memanfaatkan perubahan tenaga dari tenaga potensial air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi tenaga listrik. Pengubahan ini menggunakan peralatan turbin dan generator, yang kemudian daya listrik yang dihasilkan dapat dirumuskan sebagai berikut: (Arifin, 2017)

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.1)$$

Keterangan:

P = Daya output (W)

ρ = Massa jenis air

H = Elevasi jatuh air efektif (m)

g = Konstanta percepatan gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$

Q = Debit air (m^3/s)

Dari rumusan di atas maka hasil keluaran daya dari generator diperoleh dari hasil tinggi jatuh dan debit air. Sehingga faktor yang mempengaruhi daya pembangkitan tenaga air berada pada tinggi jatuh efektif air dan debit air yang besar. Pada umumnya, debit air yang besar juga membutuhkan penampung yang besar untuk penampungan air. Sehingga secara ekonomis tinggi jatuh air yang lebih tinggi akan menguntungkan. (Arifin, 2017)

Faktor-faktor pembangkitan listrik tenaga listrik di atas masih belum didasarkan pada faktor efisiensi dari setiap peralatan seperti efisiensi dari turbin dan generator. *Error* yang disebabkan oleh peralatan juga dapat mengurangi jumlah daya yang dihasilkan dari suatu pembangkit. (Arifin, 2017)

2.2 Turbin Air

2.2.1 Pengertian Turbin Air

Turbin air berfungsi untuk mengubah energi potensial menjadi energi mekanik. Air akan memukul sudu-sudu dari turbin sehingga turbin berputar. Perputaran turbin ini dihubungkan ke generator.

2.2.2 Klasifikasi Turbin Air

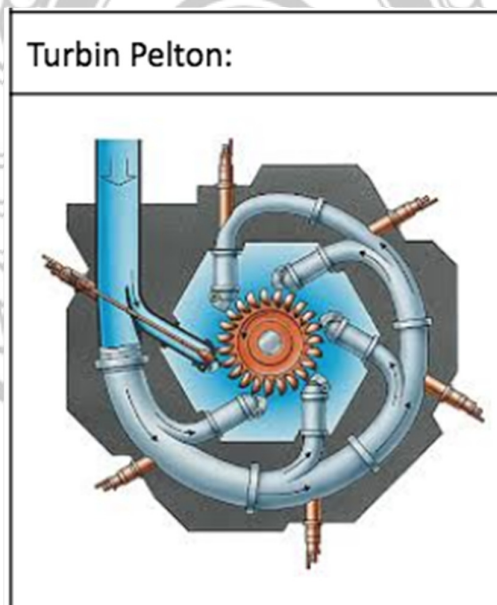
1. Turbin Impuls

Turbin ini dibuat sedemikian sehingga rotor (runner) bekerja karena aliran air, disini beda tinggi diubah menjadi kecepatan karena perbedaan tinggi. Yang khas dari turbin ini adalah turbin pelton.

a. Turbin Pelton

Turbin Pelton adalah turbin untuk tinggi terjun yang tinggi, yaitu diatas 300 meter. Teknik pengkonversian energi potensial air menjadi energi

mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses impuls sehingga turbin Pelton juga disebut turbin impuls. Untuk semua macam turbin air, ada katup yang mengatur banyaknya air yang akan dialirkan ke roda air. Dengan pengaturan ini, daya turbin dapat diatur. Di depan katup pengatur terdapat katup utama yang harus ditutup apabila turbin air dihentikan untuk melaksanakan pekerjaan pemeliharaan atau perbaikan pada turbin. Apabila terjadi gangguan listrik yang menyebabkan PMT generator trip, maka untuk mencegah turbin berputar terlalu cepat karena hilangnya beban generator yang diputar oleh turbin, katup pengatur air yang menuju ke turbin harus ditutup.



Gambar 2. 1 Turbin Pelton
(Sumber : <https://ilmuteknik.id/>)

2. Turbin Reaksi

Turbin jenis ini dibuat sedemikian sehingga rotor bekerja karena aliran air dengan tinggi terjun karena tekanan. Yang termasuk jenis ini adalah turbin francis, kaplan.

a. Turbin Francis

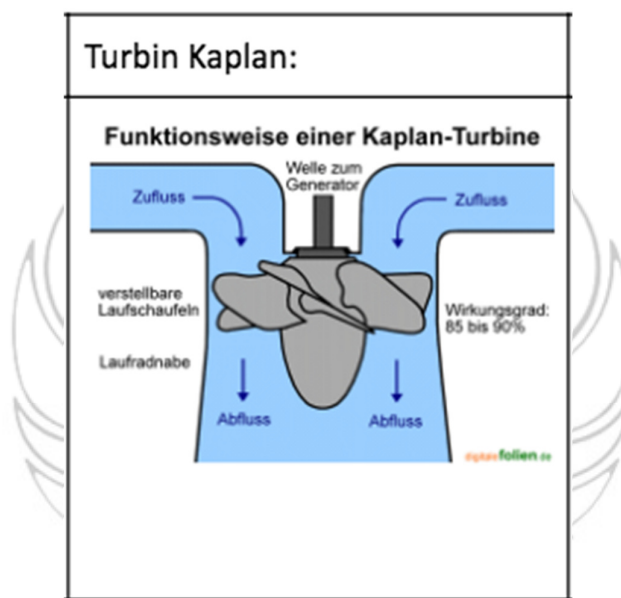
Turbin Francis paling banyak digunakan di Indonesia. Turbin ini digunakan untuk tinggi terjun sedang, yaitu antara 20-400 meter. Teknik pengkonversian energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses reaksi sehingga turbin Francis juga disebut turbin reaksi.



Gambar 2. 2 Turbin Francis
(Sumber : <https://ilmuteknik.id/>)

b. Turbin Kaplan

Turbin kaplan digunakan untuk tinggi terjun yang rendah, yaitu dibawah 20 meter. Teknik pengkonversian energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda turbin dilakukan melalui pemanfaatan kecepatan air. Roda air turbin kaplan menyerupai baling-baling dari kipas angin.



Gambar 2. 3 Turbin Kaplan
(Sumber : <https://ilmuteknik.id/>)

2.3 Komponen Utama PLTA

2.3.1 Bendungan / Dam

Bendungan berfungsi menaikkan permukaan air sungai untuk menciptakan tinggi jatuh air. Selain menyimpan air, bendungan juga dibangun dengan tujuan untuk menyimpan energi. Sumber air pusat listrik Bili-Bili berasal dari bendungan Bili-Bili yang dimana air pada aliran sungai jeneberang dibentuk hingga membentuk sebuah waduk penampungan air (*reservoir*) yang nantinya akan digunakan sebagai tenaga untuk memutar turbin. Bendungan ini dioperasikan oleh Dinas Pekerjaan Umum (PU) yang menetapkan kapasitas pemakaian air untuk keperluan pembangkitan energi listrik.

Gambar 2 . 1 Data Bendungan Bili-Bili

1.	<i>Dam Type</i>		<i>Concrete centre core rock fill type</i>
2.	<i>Height on Foundation</i>	<i>Main</i>	73 m
		<i>Right Wing</i>	52 m
		<i>Left Wing</i>	46 m
3.	<i>Length of Crest</i>	<i>Main</i>	750 m
		<i>Right Wing</i>	640 m
		<i>Left Wing</i>	420 m
4.	<i>Widht of Crest</i>	<i>Main</i>	10 m
		<i>Right Wing</i>	10 m
		<i>Left Wing</i>	10 m
5.	<i>Dam Volume</i>	<i>Main</i>	$2,76 \times 10^6$ m

		<i>Right Wing</i>	1,06 ×10 ⁶ m
		<i>Left Wing</i>	1,47×10 ⁶ m
6.	<i>Crest Elevation</i>		EL. 106,0 m

(Sumber : Jelita Rima Dewi, 2008)



Gambar 2. 4 Bendungan Bili-Bili

2.3.2 Intake

Intake berfungsi sebagai tempat mengalirkan air dari bendungan menuju pembangkit melalui pipa *penstock*. Konstruksi dari *intake* berada pada bagian kiri penampungan dari main dam untuk melepaskan air *reservoir*, dimana air ini dibutuhkan untuk irigasi, persediaan air untuk kota Makassar dan sekitarnya .

Gambar 2 . 2 Data Intake

1.	<i>Elevation</i>	<i>EL. 99.5 m (Normal Water Level)</i> <i>EL. 65 m (Low Water Level)</i>
2.	<i>Type</i>	<i>Inclined conduit</i>
3.	<i>Dimension</i>	<i>9.0 m wide × 47.0 m High</i>
4.	<i>Max. Discharger</i>	<i>44.8 m³/s</i>
5.	<i>Intake Gate</i>	<i>3.7 m wide × 5.2 m High</i>

(Sumber : Jelita Rima Dewi, 2008)



Gambar 2. 5 Papan Elevasi di Samping Intake

2.3.3 *Penstock* (Pipa Pesat)

Penstock adalah saluran yang digunakan untuk mengalirkan dan mengarahkan air dari *reservoir* ke rumah pembangkit. Secara mekanis, *penstock* berfungsi untuk mengubah energi potensial pada air menjadi energi kinetik. *Penstock* pusat listrik Bili-Bili bercabang untuk mengarahkan air dari air menuju turbin unit 1 dan unit 2.

Gambar 2 . 3 Spesifikasi Penstok

No.	Spesifikasi	Unit #1	Unit #2
1.	Jenis <i>Penstock</i>	<i>Welded Steel Penstock Embedded in Concrete</i>	
2.	Diameter	3.700 mm – 1.970 mm	3.700 mm – 2.810 mm
3.	Panjang	31.184 m <i>Bifurcation to inlet valve 1</i>	45. 830 m <i>Bulkhead end to inlet valve 2</i>
4.	Berat	65 ton	65 ton
5.	Material	SM 41 (Baja) dengan ketebalan 13-36 mm.	

(Sumber : Jelita Rima Dewi, 2008)



Gambar 2. 6 Pipa Penstock

2.3.4 Turbin

Turbin air berfungsi mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Air akan memukul sudut-sudut dari turbin sehingga turbin berputar. Jenis turbin air yang digunakan di ULPLTA Bili-Bili adalah *Vertical Shaft Kaplan Turbine*.

Gambar 2 . 4 Spesifikasi Turbin Air

No.	Item	Unit #1	Unit #2	
1.	<i>Type</i>	<i>Vertical shaft Kaplan turbine</i>		
2.	<i>Net Head</i>	<i>Maximum</i>	50.71 m	49.49 m
		<i>Normal</i>	47.21 m	48.01 m
		<i>Minimum</i>	22.13 m	22.43 m
3.	<i>Output</i>	<i>Maximum</i>	6.000 kW	14.100 kW
		<i>Normal</i>	5.600 kW	13.700 kW
		<i>Minimum</i>	980 kW	–
4.	<i>Discharge</i>	<i>Maximum</i>	12.8 m ³ /s	31.6 m ³ /s
		<i>Normal</i>	12.8 m ³ /s	–
		<i>Minimum</i>	6.1 m ³ /s	–
5.	<i>Rated Speed</i>	500 min ⁻¹	375 min ⁻¹	
6.	<i>Runaway Speed</i>	1280 min ⁻¹	970 min ⁻¹	
7.	<i>Water Thrust</i>	60 ton	125 ton	
8.	<i>Weight or Rotation Parts</i>	5.3 ton	10.2 ton	
9.	<i>Manufacture year</i>	2004	2004	

(Sumber : Jelita Rima Dewi, 2008)

2.3.5 Generator

Generator adalah suatu alat yang dapat membangkitkan energi listrik dari tenaga mekanik. Tenaga mekanik bisa berasal dari turbin yang menggunakan air jatuh sebagai penggerak utama.

Adapun generator yang digunakan pada ULPLTA Bili-Bili adalah *3-phas*, *alternating field, enclosed hood and cooled with self-powered ventilation through outlet duct and ordinary for unit 1 and unit 2.*

Bagian-bagian dari generator adalah sebagai berikut :

a. Rotor

Rotor adalah merupakan bagian yang berputar, dimana pada rotor terdapat kumparan yang berfungsi sebagai medan magnet. Bagian-bagian rotor terdiri atas *main shaft, rotor rim pole piece, rotor coil*, dan lain-lain.



Gambar 2. 7 Rotor

b. Stator

Stator merupakan bagian generator yang tidak berputar dan juga berfungsi sebagai *body* dari generator. Bagian-bagian stator terdiri atas *stator frame*, *stator core*, *stator coil*, dan lain-lain.



Gambar 2. 8 Stator

Adapun spesifikasi generator ULPLTA Bili-Bili adalah sebagai berikut.

Gambar 2 . 5 Spesifikasi Generator PLTA Bili-Bili

No.	Item	Unit #1	Unit #2
1.	Type	TAKL – Synchronous Vertical Shaft	
2.	Output	6.800 Kva/ 3 Phase	16.100 kVA/3 Phase
3.	Rated Voltage	6.600 V	6.600 V
4.	Rated Current	595 A	1408 A
5.	Rated Speed	500 Rpm	375 rpm
6.	Frequency	50 Hz	50 Hz
7.	Power Factor	0,85	0,85

8.	<i>Pole</i>	<i>12</i>	<i>16</i>
9.	<i>Insulation Class</i>	<i>F</i>	<i>F</i>
10.	<i>Excitation Voltage</i>	<i>65 V</i>	<i>115 V</i>
11.	<i>Cooling</i>	<i>1C21</i>	<i>1C21</i>
12.	<i>Field Ampere</i>	<i>620 A</i>	<i>640 A</i>
13.	<i>Manufacture</i>	<i>Toshiba, Japan, Tahun 2005, No: 0315025</i>	<i>Toshiba, Japan, Tahun 2005, No: 0315027</i>
14.	<i>Standard</i>	<i>Spec IEC</i>	<i>Spec IEC</i>

(Sumber : Jelita Rima Dewi, 2008)



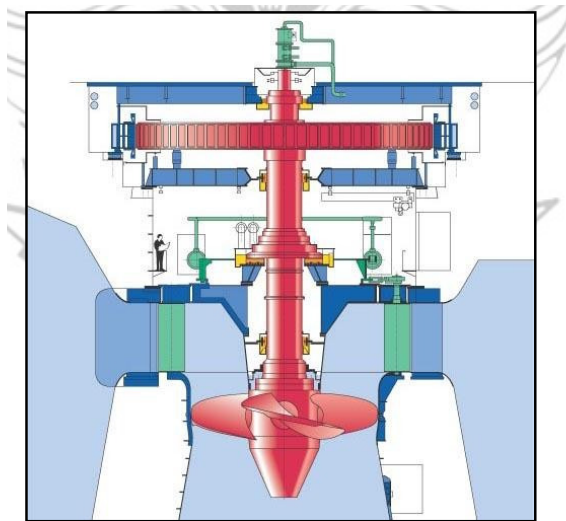
Gambar 2. 9 Generator

2.4 Turbin yang digunakan untuk Tugas Akhir ini (Turbin Kaplan)

2.4.1 Pengertian Turbin Kaplan

Turbin kaplan adalah turbin dengan sudu-sudu berbentuk baling-baling yang dapat diatur untuk mendapat efisiensi maksimal sesuai dengan besar-kecilnya aliran dan level ketinggian air. Sejatinya, turbin kaplan merupakan pengembangan dari turbin francis, pengembangannya dilakukan pada tahun 1913 oleh ilmuwan asal Austria yang bernama Viktor Kaplan. Turbin kaplan juga termasuk ke dalam jenis turbin reaksi.

Keistimewaan lainnya, turbin kaplan dapat diaplikasikan pada *head* (tinggi jatuhnya air) yang rendah, yaitu bekisar 10 – 70 meter, tetapi dengan aliran air yang besar. Maka dari itu, turbin ini cocok digunakan dalam pembangkit listrik tenaga air sungai. (Cakrawala96, 2015)



Gambar 2. 10 Turbin Kaplan
(Sumber : <https://dokumen.tips/>)

2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Kaplan

Alur aliran air pada turbin Kaplan sedikit berbeda dari turbin lainnya. Pada turbin kaplan, air dialirkan ke turbin secara radial dan masuk melalui samping (baling-baling pemandu). Baling-baling pemandu dengan cepat mengambil air melalui putaran 90° sehingga dapat mengenai sudu-sudu secara aksial. Air kemudian mengalir ke bawah sehingga air dapat memutar sudu-sudu turbin. Cara kerja seperti ini biasa disebut sebagai turbin reaksi. Setelah turbin berputar, energi mekanik pun tercipta. Selanjutnya, putaran atau energi mekanik turbin ditransmisikan untuk memutar generator dan terciptalah energi listrik. (Cakrawala96, 2015)

2.5 Kavitas

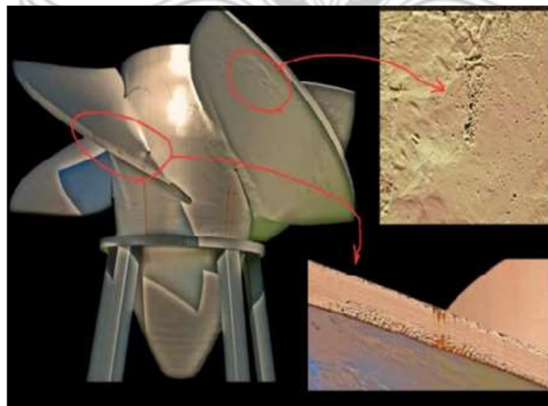
2.5.1 Pengertian Kavitas

Kavitas berasal dari kata “*Cavus*” (Latin) yang berarti kosong. 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. 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). (Arifin, 2017)

2.5.2 Akibat Kavitas

Dengan tekanan yang begitu tinggi pada peristiwa kavitas sebagai akibatnya adalah sebagai berikut (Sinaga, 2016):

1. Menimbulkan suara yang sangat bising dan getaran-getaran yang sangat merusak instalasi turbin.
2. Dengan tekanan yang begitu tinggi akibat pecahnya gelembung dari air yang menguap akan mudah merusak material-material yang dipakai pada instalasi turbin.
3. Menyebabkan putaran turbin tidak seimbang yang dapat menurunkan efisiensi dan daya turbin.
4. Umur material menjadi pendek, berdampak kepada keandalan dan peningkatan biaya operasi dan pemeliharaan.



Gambar 2. 11 Kerusakan Turbin Akibat Kavitas
(Sumber : <https://repairengineering.com>)

2.5.3 Daerah Rawan Kavitas

Pada daerah aliran dalam pipa yang tidak rata atau bersudut, bercabang akan terjadi turbulensi dan dapat terjadi kavitas.

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.



Gambar 2. 12 Contoh Kerusakan Material Runner Akibat Kavitasi
(Sumber : <https://repository.its.ac.id/>)

2.5.4 Pencegahan Kavitasi

Untuk mencegah terjadinya kavitasi ini, maka perlu diambil langkah-langkah sebagai berikut (Sinaga, 2016):

- 2.1 Desain PLTA pada jalur penstock harus lurus supaya kecepatan jatuh dan tekanan air tidak berkurang.
- 2.2 Mempergunakan material yang cukup kuat, pada tempat – tempat dimana diperkirakan kavitasi bakal terjadi. Pada daerah runner, sudu-sudu (*guide vane*) dan sisi masuk pipa isap, kondisi yang cenderung terjadi kavitasi, maka bahan *guide vane* dan *runner* terbuat dari bahan yang keras dan tidak berkarat, serta pipa isap dilapisi dengan cat anti karat.
- 2.3 Menggunakan komponen pelengkap turbin (*fitting*) yang tingkat lossesnya kecil.
- 2.4 Memilih runner yang tepat bentuknya dan jumlah vanenya.

2.5 Peletakan turbin ini diusahakan harus selalu dibawah tinggi tekanan isap (H_s), yaitu letak turbin berada dibawah elevasi air buang (tail water level).

2.6 Persamaan yang Mendukung Penelitian

2.6.1 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 pengurangan antara elevasi dam dan elevasi turbin. Berikut adalah persamaan head efektif (Arifin, 2017):

$$H_{eff} = (z_1 - z_2) - H_f \quad (2.2)$$

Keterangan:

H_{eff} = Head efektif (m)

H_f = Head Losses

z_1 = Elevasi Dam (m)

z_2 = Elevasi Turbin (m)

2.6.2 Persamaan Daya Hidrolik

Daya Hidrolik adalah daya yang dihasilkan oleh air yang jatuh pada head tertentu dengan debit tertentu. Berikut adalah persamaan daya hidrolik (Arifin, 2017):

$$P_h = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{eff}}{1000} \quad (2.3)$$

Keterangan

P_h = Daya hidrolik (kW)

ρ = Massa jenis air (kg/m³)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

Q = Debit air (m³/s)

H_{eff} = Head efektif (m)

2.6.3 Persamaan Daya Turbin

Daya Turbin adalah daya yang dihasilkan oleh putaran turbin. Secara teoritis apabila diketahui daya generator dan efisiensi generator maka daya turbin merupakan hasil bagi daya generator dengan efisiensi generator. Sedangkan bila diketahui daya hidrolik dan efisiensi turbin maka daya turbin merupakan hasil bagi daya hidrolik dengan efisiensi turbin. Dalam hal ini yang dipakai adalah persamaan daya turbin berdasarkan daya generator dan efisiensi generator. Berikut persamaan daya turbin berdasarkan daya generator dan efisiensi generator (Arifin, 2017):

$$P_t = \frac{\rho \cdot n_t \cdot Q \cdot H_{eff}}{75} \quad (2.4)$$

Keterangan:

P_t = Daya turbin (kW)

ρ = Massa jenis air (Kg/m³)

n_t = Efisiensi turbin = 0,9 (%)

Q = Debit air (m³/s)

H_{eff} = Head efektif (m)

2.6.4 Persamaan Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin adalah daya guna turbin dilihat dari perbandingan daya turbin (daya output) dengan daya hidrolik (daya input). Dari perhitungan efisiensi inilah kita dapat menilai unjuk kerja dari turbin air, yaitu semakin tinggi efisiensi yang dihasilkan maka akan semakin besar unjuk kerja yang dihasilkan. Semakin rendah efisiensi yang dihasilkan maka akan semakin rendah unjuk kerja yang dihasilkan. (Arifin, 2017)

$$n_t = \frac{P_t}{P_h} \times 100\% \quad (2.5)$$

Keterangan:

n_t = Efisiensi turbin (%)

P_t = Daya turbin (kW)

P_h = Daya hidrolik (kW)

2.6.5 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 (Arifin, 2017).

$$n_s = \frac{n\sqrt{P_t}}{(H)^{5/4}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

n_s = Kecepatan spesifik (rpm)

n = Kecepatan nominal (rpm)

P_t = Daya turbin (kW)

H = Net Head (m)

2.6.6 Persamaan Koefisien Kavitas

Koefisien kavitas adalah suatu nilai yang menunjukkan bahwa apakah suatu turbin memasuki daerah bahaya kavitas atau daerah aman kavitas. Sehingga nantinya bisa dibandingkan dengan kecepatan spesifik untuk mengetahui tingkat kavitasnya. Koefisien kavitas dinotasikan dengan bilangan Thoma (σ). Berikut persamaan koefisien kavitas seperti persamaan (2.) (Arifin, 2017):

$$\sigma_{inst} = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H} \quad (2.7)$$

Koefisien kavitas operasi dan koefisien kritis kavitas dapat juga dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini (Brigjkishore, et al.,2021).

$$\sigma_o = \frac{\frac{H_{atm} - p_r}{\rho} - gH_s}{gH} = \frac{H_{atm} - H_r - H_s}{H} \quad (2.8)$$

$$\sigma_c = 0.3 + 0.0024 \left(\frac{N_s}{100} \right)^{2.73} \quad (2.9)$$

Keterangan:

σ_{inst} = Koefisien kavitas instalasi Turbin

σ_o = Koefisien kavitas operasi

σ_c = Koefisien kritis kavitas

ρ_{atm} = Tekanan atmosfer (N/m^2)

p_r = Tekanan statis pada sisi outlet runner (N/m^2)

H_{atm} = $P_{atm} = 76 \text{ cmHg} - \frac{h}{100}$, Tekanan atmosfer (mH_2O)

H_v = Tekanan uap air berdasarkan temperatur air yang masuk pada turbin (mH_2O)

H_s = Tinggi isap jarak vertikal dari permukaan air bawah sampai titik dimana tekanannya minimum (pada roda Kaplan berada pada dasar roda) (mH₂O)

H = Tinggi jatuh efektif (m)



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam menyusun Tugas Akhir Analisa Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitas pada Turbin Kaplan di PLTA Bili-Bili adalah sebagai berikut:

3.1.1 Studi Literatur

Dengan cara mempelajari literatur-literatur yang ada di perpustakaan PLTA Bili-Bili dan juga buku-buku tentang turbin air dari Perpustakaan Politeknik Negeri Ujung Pandang.

3.1.2 Observasi

Dengan cara melakukan peninjauan langsung pada PLTA Bili-Bili, untuk mengetahui secara langsung turbin Kaplan dan melakukan pengambilan data-data turbin yang akan digunakan untuk perhitungan unjuk kerja turbin. Data-data yang didapat sebagai berikut:

1. Debit air (Q)
2. Tekanan permukaan air waduk (p_1)
3. Tekanan pada *draft tube* (p_2)
4. Elevasi dam (z_1)
5. Elevasi turbin (z_2)
6. Elevasi *tailrace*
7. Putaran turbin (n)
8. Daya generator (P_1)
9. Massa jenis (ρ)

10. Percepatan gravitasi (g)

3.1.3 Perhitungan Data dan Analisis

Menghitung data-data yang didapat dari observasi dan menganalisisnya perhitungan yang didapat:

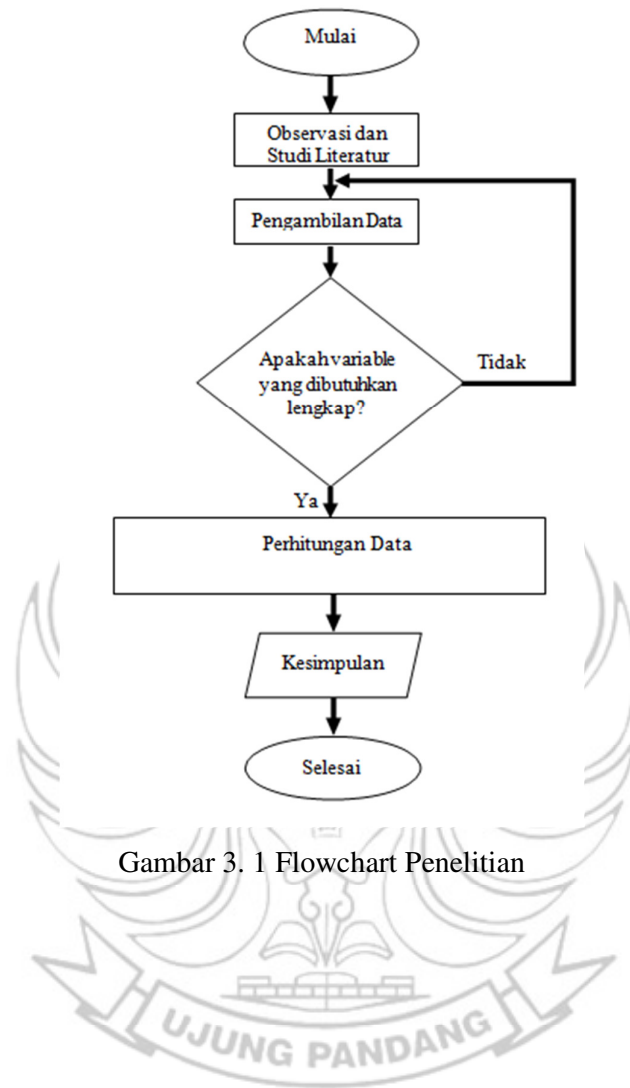
1. H_{eff} = Head efektif
2. Ph = Daya hidrolik
3. Pt = Daya turbin
4. nt = Efisiensi turbin
5. ns = Kecepatan spesifik
6. σ_{inst} = Koefisien kavitasi instalasi turbin
7. σ_o = Koefisien kavitasi operasi
8. σ_c = Koefisien kritis kavitasi

3.1.4 Kesimpulan

Mengetahui unjuk kerja turbin Kaplan dan hubungan antara faktor-faktor di dalamnya.

3.1.5 Flowchart

Adapun langkah-langkah penulisan Tugas Akhir ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

3.2 Jadwal Pelaksanaan

Tabel 3. 1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Lokasi pengambilan data penelitian dilakukan di ULPLTA BILI-BILI, dimulai pada bulan Maret 2022 sampai April 2022.

Waktu penyusunan skripsi dan pengolahan data dimulai dari Mei 2022 sampai September 2022.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Contoh Perhitungan Turbin Unit 2

Data pengamatan ditunjukkan pada lampiran 1 dan data hasil pengamatan ditunjukkan pada lamiran 2. Untuk perhitungan menggunakan data ke-2

4.1.1 Head Efektif (H_{eff})

$$H_f = \frac{1}{3} H_{act}$$

$$H_f = \frac{1}{3} 50 \text{ m}$$

$$H_f = 16,667 \text{ m}$$

$$H_{eff} = (El. Dam - El. Tailrace) - H_f$$

$$H_{eff} = (96,81 - 48,41) - 16,667$$

$$H_{eff} = 31,7330 \text{ m}$$

4.1.2 Daya Hidrolik (P_h)

$$P_h = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{eff}}{1000}$$

$$P_h = \frac{997,02 \cdot 9,81 \cdot 32,2 \cdot 31,73}{1000}$$

$$P_h = 9994,0123 \text{ kW}$$

4.1.3 Daya Turbin (P_t)

$$P_t = \frac{\rho \cdot nt \cdot Q \cdot H_{eff}}{75}$$

$$P_t = \frac{997,02 \cdot 0,9 \cdot 32,2 \cdot 31,73}{75}$$

$$P_t = 12225,0915 \text{ Hp}$$

$$P_t = 9116,2508 \text{ kW}$$

4.1.4 Efisiensi Turbin (n_t)

$$n_t = \frac{P_t}{P_h} \times 100\%$$

$$n_t = \frac{9116,2508}{9994,0123} \times 100\%$$

$$n_t = 91,217 \%$$

4.1.5 Kecepatan Spesifik Turbin (n_s)

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

$$n_s = \frac{375\sqrt{9116,2508}}{(31,7330)^{5/4}}$$

$$n_s = 476,6582 \text{ rpm}$$

4.1.6 Koefisien Kavitas instalasi turbin (σ_{inst})

$$\sigma_{inst} = \frac{\frac{H_{atm}}{\rho} - \frac{H_v}{\rho} - gH_s}{gH} = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H}$$

$$\sigma_{inst} = \frac{\frac{100901,95203}{997,02} - \frac{3196,07380}{997,02} - 9,81(-9,2100)}{9,81 \cdot 31,73}$$

$$\sigma_{inst} = \frac{101,2034 - 3,1785 - (-90,3501)}{311,2713}$$

$$\sigma_{inst} = 0,6050$$

4.1.7 Koefisien Kavitas Operasi (σ_o)

$$\sigma_o = \frac{\frac{H_{atm}}{\rho} - \frac{P_r}{\rho} - gH_s}{gH} = \frac{H_{atm} - H_r - H_s}{H}$$

$$\sigma_o = \frac{\frac{100901,95203}{997,02} - \frac{30,2167}{997,02} - 9,81(-9,2100)}{9,81 \cdot 31,73}$$

$$\sigma_o = \frac{101,2034 - 0,0303 - (-90,3501)}{311,2713}$$

$$\sigma_o = 0,6152$$

4.1.8 Koefisien Kritis Kavitasi (σ_c)

$$\sigma_c = 0.3 + 0.0024 \left(\frac{N_s}{100} \right)^{2.73}$$

$$\sigma_c = 0.3 + 0.0024 \left(\frac{476,66}{100} \right)^{2.73}$$

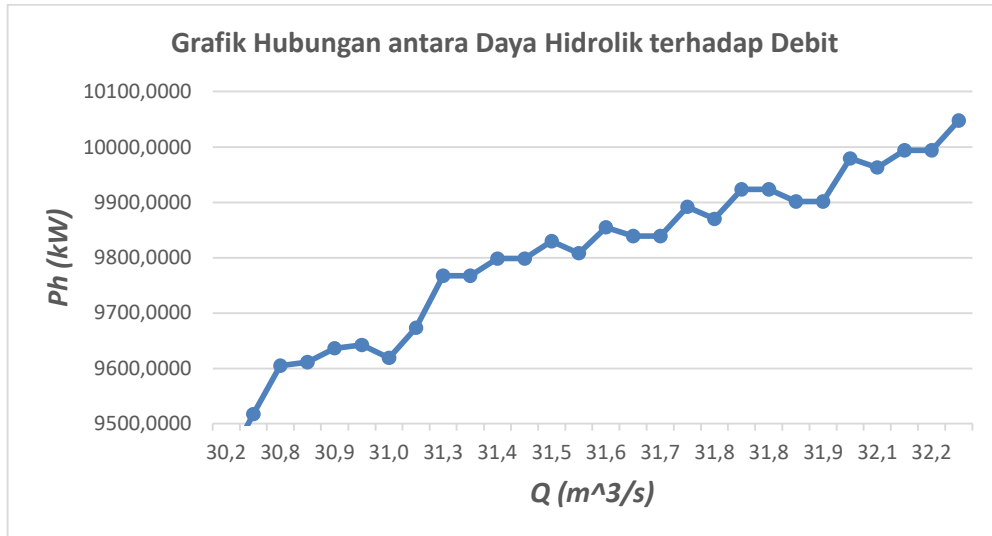
$$\sigma_c = 0.3 + 0.0024 (4,7610)^{2.73}$$

$$\sigma_c = 0,4705$$



4.1 Data Hasil Perhitungan dan Analisa

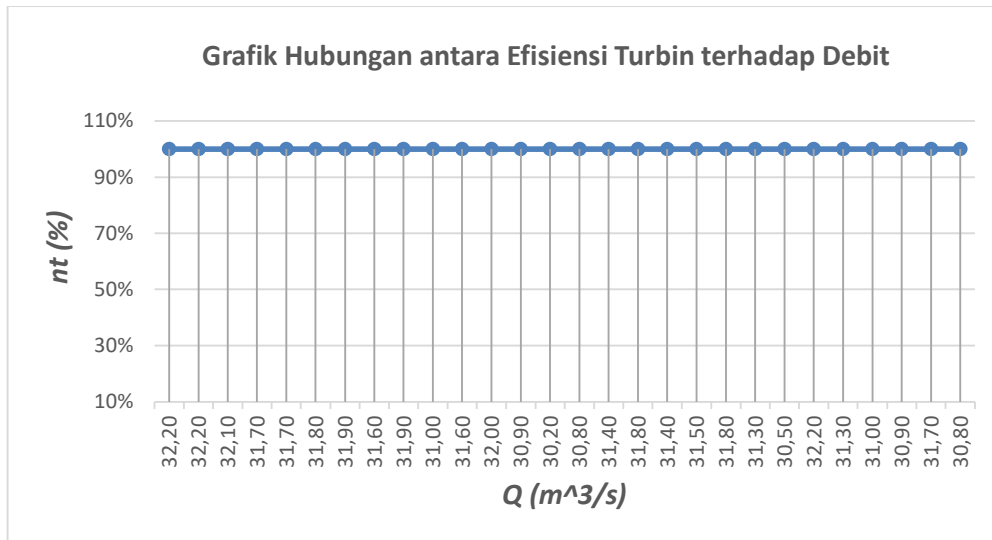
4.2.1 Perbandingan Daya Hidrolik terhadap Debit



Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Daya Hidrolik terhadap Debit

Dari Gambar 4.1 di atas dapat dilihat daya hidrolik yang dihasilkan cenderung mengalami kenaikan berdasarkan debit air. Hal ini disebabkan karena tekanan air yang semakin besar untuk mendorong bukaan guid vane. Semakin besar bukaan guid vane maka semakin besar daya yang dihasilkan. Dimana daya hidrolik terbesar ditunjukkan oleh nilai 10047,8546 kW dengan debit 32,2 m³/s. Sedangkan daya hidrolik terkecil ditunjukkan oleh nilai 9423,7642 kW dengan debit 30,2 m³/s.

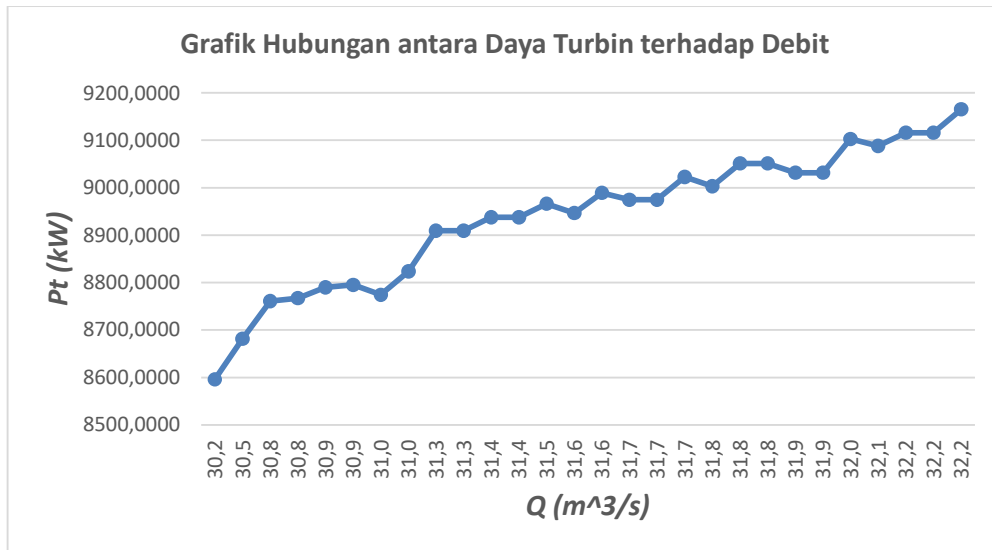
4.2.2 Perbandingan Efisiensi Turbin terhadap Debit



Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Efisiensi Turbin terhadap Debit

Dari Gambar 4.2 di atas dapat dilihat efisiensi turbin yang dihasilkan tidak serta merta mengalami kenaikan berdasarkan debit air. Berdasarkan grafik nilai efisiensi turbin terlihat cenderung konstant terhadap debit yang variatif. Dimana efisiensi tertinggi ditujukan oleh nilai 91,2171 % dengan debit 32,2 m³/s. Sedangkan efisiensi terendah ditujukan oleh nilai 91,2171 % dengan debit 30,2 m³/s.

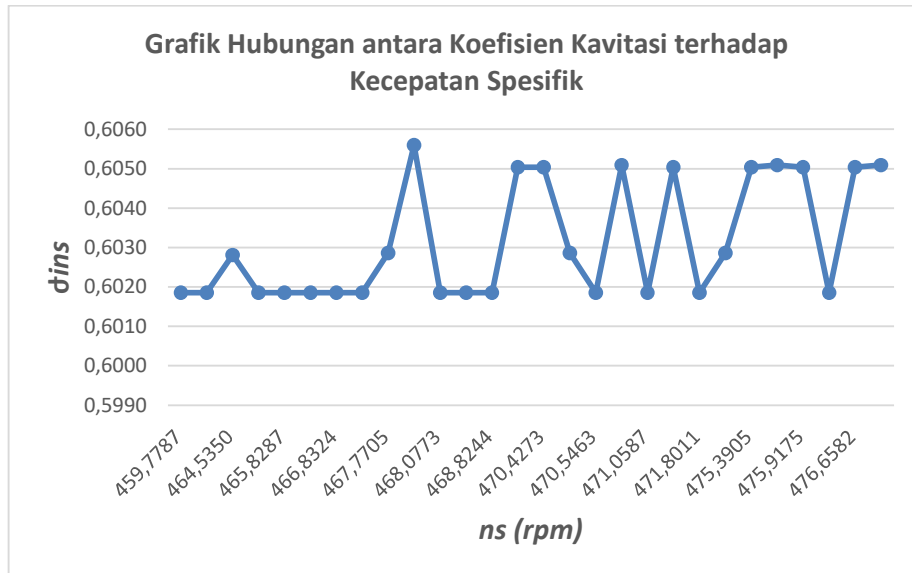
4.2.3 Perbandingan Daya Turbin terhadap Debit



Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Daya Turbin terhadap Debit

Dari Gambar 4.3 di atas dapat dilihat daya turbin yang dihasilkan cenderung mengalami kenaikan berdasarkan debit air. Hal ini disebabkan karena tekanan air yang semakin besar untuk mendorong bukaan guid vane. Semakin besar bukaan guid vane maka semakin besar daya yang dihasilkan. Dimana daya turbin tertinggi ditunjukkan oleh nilai 9165,3641 kW dengan debit 32,2 m³/s. Sedangkan daya turbin terendah ditunjukkan oleh nilai 859,7787 kW dengan debit 30,2 m³/s.

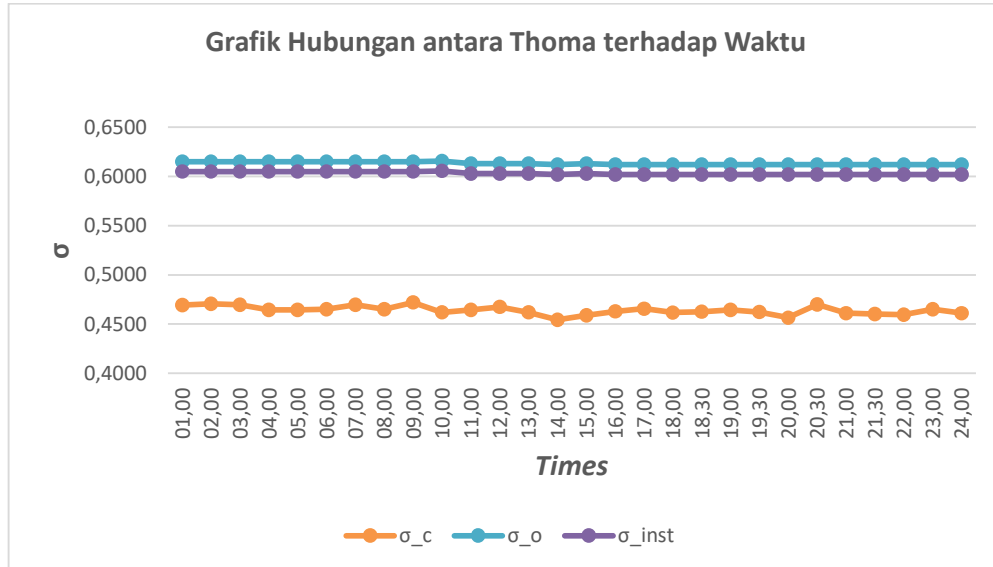
4.2.4 Perbandingan Koefisien Kavitasi Instalasi Turbin terhadap Kecepatan Spesifik



Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Koefisien Kavitasi terhadap Kecepatan Spesifik

Dari Gambar 4.4 di atas dapat dilihat koefisien kavitasi yang dihasilkan tidak serta merta mengalami kenaikan berdasarkan kecepatan spesifik. Berdasarkan grafik, nilai koefisien kavitasi terlihat cenderung konstan terhadap nilai kecepatan putar yang variatif. Dimana koefisien kavitasi terbesar terbesar ditunjukkan oleh 0,6051 dengan kecepatan spesifik sebesar 478,2251 rpm. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil ditunjukkan oleh 0,6019 dengan kecepatan spesifik sebesar 459,7787 rpm. Dalam hal ini semakin kecil koefisien kavitasi menunjukkan bahwa semakin besar tingkat kavitasi. Sebaliknya, semakin besar koefisien kavitasi menunjukkan bahwa semakin kecil tingkat kavitasi.

4.2.5 Perbandingan Koefisien Kavitas Instalasi Turbin, Koefisien Kavitas Operasi Dan Koefisien Kritis Kavitas.



Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Koefisien Kavitas Instalasi Turbin, Koefisien Kavitas Operasi Dan Koefisien Kritis Kavitas

Koefisien kritis kavitas (σ_c) adalah faktor kavitas yang digunakan sebagai batasan dari turbin untuk menentukan apakah fenomena kavitas terjadi atau tidak.

Koefisien kritis kavitas (σ_c) ditentukan berdasarkan kecepatan spesifik dari turbin. Jika koefisien kavitas operasi (σ_o) dan koefisien kavitas instalasi turbin (σ_{inst}) > koefisien kritis kavitas (σ_c), maka akan terjadi kavitas.

Berdasarkan Gambar 4.5 di atas dapat dilihat bahwasanya nilai koefisien kavitas operasi (σ_o) dan koefisien kavitas instalasi turbin (σ_{inst}) nilainya lebih besar dari pada nilai koefisien kritis kavitas (σ_c) maka terjadi kavitas. Jadi, dalam pengoperasiannya turbin unit 2 PLTA Bili-Bili ini mengalami kavitas. Namun, kavitas yang terjadi tidak terlalu besar sehingga efisiensi turbin masih normal, artinya tidak menurun drastis.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dari analisis pada BAB IV maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai efisiensi turbin minimum ditunjukkan pada nilai 49,295 sedangkan nilai efisiensi maksimum ditunjukkan pada nilai 52,857. Kavitas yang terjadi tidak terlalu besar sehingga efisiensi turbin masih normal, artinya tidak menurun drastis. Bisa dikatakan demikian karena efisiensi turbin masih dalam nilai normal.
2. Turbin Unit 2 PLTA Bili-Bili mengalami kavitas berdasarkan nilai koefisien kavitas dan kecepatan spesifik. Turbin Unit 2 PLTA Bili-Bili mengalami kavitas berdasarkan nilai σ_o dan σ_{inst} nilainya lebih besar dari pada nilai σ_c dan nilai σ_o lebih besar dari nilai σ_{inst} . Tingkat kavitas kecil sehingga tidak mengakibatkan efisiensi turbin turun drastis. Hal ini dilihat dari efisiensi turbin yang masih dalam batas normal.

5.2 Saran

Dari hasil pembahasan, maka beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian lebih lanjut:

1. Perlu melakukan penelitian tingkat kavitas untuk turbin air lainnya agar nantinya dapat membandingkan tingkat kavitas disetiap turbin air.
2. Diharapkan pihak perusahaan menyediakan lebih banyak lagi referensi buku untuk menambah wawasan agar dapat lebih mendukung peneliti dalam menyelesaikan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrianto, Hendri dkk. 2015. *Identifikasi Tingkat Kavitasi Turbin Kaplan Menggunakan Metode Nilai Head dan Nilai Coeficient of Pressur*. Diakses pada 17 Januari 2022, dari <http://webcache.googleusercontent.com/>
- Arifin, Moh Zaenal. 2017. *Analisa Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasi pada Turbin Francis di PT PJB Unit Pembangkitan Brantas Unit PLTA Sutami*. Tugas Akhir. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Brijkishore, Khare, R. & Prasad, V., 2021. *Prediction Of Cavitation and its Mitigation Tecniques in Hydraulic Turbines-A Review*, pp. 2-3.
- Hajar, Ibnu. 2010. *Studi Eksperimental Deteksi Fenomena Kavitasi pada Pompa Sentrifugal Menggunakan Getaran untuk Condition Monitoring*. Tesis. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Indonesire.com. (2021, 30 September). *Mekanisme Kegagalan pada Turbin Air*. Diakses pada 2 Maret 2022, dari <https://indonesiare.co.id/id>
- Jelita, Rima Dewi. 2008. *Annual Inspection pada PLTA BILI-BILI*. Laporan Praktek Kerja Lapangan. Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Juliana, I Putu. 2018. *Pengaruh Sudut Kemiringan Head Turbin Ulir dan Daya Putar Turbin Ulir dan Daya Output pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikri Hidro*. *Majalah Ilmiah, (ONLINE)*, 17 (3): 393-400, (<https://doi.org/10.24843/MITE.2018.v17i03.P14>), diakses 3 Maret)
- Prabawa, Hangga Putra dkk. 2016. *Pengaruh Variasi Ukuran Diameter Nozzle Terhadap Daya dan Efisiensi Kincir Air Sudu Datar*. Diakses pada 17 Januari 2022, dari <http://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek>
- Putra, Rizki Hamdani dkk. 2021. *Analisis Tingkat Kavitasi Turbin Francis di PLTA Batang Agam*. *Jurnal Terapan, (ONLINE)*, 2 (2): 78-87, (<http://webcache.googleusercontent.com/>), diakses 17 Februari 2022).
- Sinaga, Salomo P T. 2016. *Pengaruh Bukaannya Sudu Terhadap Tingkat Kavitasi di Sisi Masuk Pipa Isap Turbin Francis Vertikal Unit 4 PLTA Tangga di P.T. Inalum Power Plant*. Skripsi. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Siwi, Wistra Galih Rakha. 2020. *Analisis Pengaruh Beban Operasi Terhadap Tingkat Kavitasi Turbin Francis Vertikal di PT PLN (Persero) Unit*

Pengendalian Pembangkitan Bengkulu, Unit III PLTA Musi. Tugas Akhir. Palembang: Universitas Tridinanti Palembang.

Sudiar, Asrul dkk. 2019. *Pengembangan Aplikasi Perhitungan Kavitas Turbin Reaksi. Jurnal INTEKNA, (ONLINE), 19 (1): 1-68,* (<http://ejurnal.poliban.ac.id/index.php/intekna/issue/arcive>), diakses 16 Januari 2022).

Wicaksana, Christian Asri dkk. 2015. *Turbin Air. Makalah. Malang: Universitas Negeri Malang.*



L

A

M

P



I

R

A

N

LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Data Pengamatan (31 Desember 2007)

Times (hr)	El. Dam (m)	El. Tailrace (m)	Q (m ³ /s)	Speed (rpm)	Tekanan atm (N/m ²)	Tekanan uap air (N/m ²)	Temp. air °C	Massa jenis air(kg/m ³)	Daya generator(kW)	Kecepatan runner (m/s)	Kecepatan draft tube (m/s)	Draft Tube (N/m ²)
01,00	96,81	48,41	32,2	375	100901,95	3196,07380	25,2	997,02	7583,40	29,6338	5,5657	4903,3250
02,00	96,81	48,41	32,2	376	100901,95	3196,07380	25,2	997,02	7514,10	29,7128	5,5657	4903,3250
03,00	96,81	48,41	32,1	376	100901,95	3196,07380	25,2	997,02	7520,63	29,7128	5,5485	4903,3250
04,00	96,81	48,41	31,7	374	100901,95	3196,07380	25,2	997,02	7527,17	29,5547	5,4793	4903,3250
05,00	96,81	48,41	31,7	374	100901,95	3196,07380	25,2	997,02	7596,60	29,5547	5,4793	4903,3250
06,00	96,81	48,41	31,8	374	100901,95	3196,07380	25,2	997,02	7609,80	29,5547	5,4966	4903,3250
07,00	96,81	48,41	31,9	377	100901,95	3177,08200	25,1	997,05	7559,84	29,7918	5,5139	4903,3250
08,00	96,81	48,41	31,6	375	100901,95	3177,08200	25,1	997,05	7596,60	29,6338	5,4620	4903,3250
09,00	96,81	48,41	31,9	379	100901,95	3177,08200	25,1	997,05	7616,40	29,9498	5,5139	4903,3250
10,00	96,81	48,42	31,0	376	100902,09	3177,08200	25,1	997,05	7603,20	29,7128	5,3583	4903,3250
11,00	96,98	48,43	31,6	376	100899,95	3177,08200	25,1	997,05	7570,20	29,7128	5,4620	4903,3250
12,00	96,98	48,43	32,0	376	100899,95	3177,08200	25,1	997,05	7609,80	29,7128	5,5312	4903,3250
13,00	96,98	48,43	30,9	378	100899,95	3177,08200	25,1	997,05	7603,20	29,8708	5,3410	4903,3250
14,00	96,98	48,41	30,2	376	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7583,40	29,7128	5,2200	4903,3250
15,00	96,98	48,43	30,8	376	100899,95	3196,07380	25,2	997,02	7576,80	29,7128	5,3237	4903,3250
16,00	96,98	48,41	31,4	376	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7583,40	29,7128	5,4275	4903,3250
17,00	96,98	48,41	31,8	376	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7603,20	29,7128	5,4966	4903,3250
18,00	96,98	48,41	31,4	375	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7583,40	29,6338	5,4275	4903,3250
18,30	96,98	48,41	31,5	375	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7590,00	29,6338	5,4447	4903,3250

19,00	96,98	48,41	31,8	375	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7596,60	29,6338	5,4966	4903,3250
19,30	96,98	48,41	31,3	376	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7576,80	29,7128	5,4102	4903,3250
20,00	96,98	48,41	30,5	376	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7583,40	29,7128	5,2719	4903,3250
20,30	96,98	48,41	32,2	377	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7583,40	29,7918	5,5657	4903,3250
21,00	96,98	48,41	31,3	375	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7603,20	29,6338	5,4102	4903,3250
21,30	96,98	48,41	31,0	376	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7583,40	29,7128	5,3583	4903,3250
22,00	96,98	48,41	30,9	376	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7570,20	29,7128	5,3410	4903,3250
23,00	96,98	48,41	31,7	376	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7616,40	29,7128	5,4793	4903,3250
24,00	96,98	48,41	30,8	378	100899,69	3177,08200	25,1	997,05	7540,24	29,8708	5,3237	4903,3250



Lampiran 2 Tabel Hasil Analisis (31 Desember 2007)

Hs (m)	Net Head (m)	Daya hidrolik (kW)	Daya turbin (kW)	Eff. Turbin	Ns	Eff. Generator	Tekanan runner (N/m ²)	σ_c	σ_o	σ_{inst}
-9,2100	31,7330	9994,0123	9116,2508	91,2171	475,3905	83,1855	30,2167	0,4693	0,6152	0,6050
-9,2100	31,7330	9994,0123	9116,2508	91,2171	476,6582	82,4253	30,2167	0,4705	0,6152	0,6050
-9,2100	31,7330	9962,9750	9087,9394	91,2171	475,9175	82,7540	30,1206	0,4698	0,6152	0,6050
-9,2100	31,7330	9838,8258	8974,6941	91,2171	470,4273	83,8710	29,7394	0,4645	0,6152	0,6050
-9,2100	31,7330	9838,8258	8974,6941	91,2171	470,4273	84,6447	29,7394	0,4645	0,6152	0,6050
-9,2100	31,7330	9869,8631	9003,0054	91,2171	471,1687	84,5251	29,8343	0,4652	0,6152	0,6050
-9,2100	31,7330	9901,1983	9031,5885	91,2171	475,7015	83,7044	29,9293	0,4696	0,6152	0,6051
-9,2100	31,7330	9808,0836	8946,6519	91,2171	470,9476	84,9100	29,6447	0,4650	0,6152	0,6051
-9,2100	31,7330	9901,1983	9031,5885	91,2171	478,2251	84,3307	29,9293	0,4720	0,6152	0,6051
-9,2200	31,7230	9618,8220	8774,0130	91,2171	467,8096	86,6559	29,0836	0,4620	0,6157	0,6056
-9,2300	31,8830	9854,4458	8988,9422	91,2171	470,5363	84,2168	29,6447	0,4646	0,6130	0,6029
-9,2300	31,8830	9979,1857	9102,7263	91,2171	473,5050	83,5991	30,0247	0,4674	0,6130	0,6029
-9,2300	31,8830	9636,1512	8789,8201	91,2171	467,7705	86,5001	28,9911	0,4620	0,6130	0,6029
-9,2100	31,9030	9423,7642	8596,0868	91,2171	459,7787	88,2192	28,3522	0,4545	0,6119	0,6019
-9,2300	31,8830	9604,6772	8761,1104	91,2171	464,5350	86,4822	28,8991	0,4589	0,6130	0,6028
-9,2100	31,9030	9798,2184	8937,6532	91,2171	468,8244	84,8478	29,4565	0,4630	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9923,0365	9051,5087	91,2171	471,8011	83,9993	29,8341	0,4658	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9798,2184	8937,6532	91,2171	467,5775	84,8478	29,4565	0,4618	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9829,4230	8966,1171	91,2171	468,3215	84,6520	29,5504	0,4625	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9923,0365	9051,5087	91,2171	470,5463	83,9263	29,8341	0,4646	0,6119	0,6019

-9,2100	31,9030	9767,0139	8909,1893	91,2171	468,0773	85,0448	29,3628	0,4622	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9517,3778	8681,4784	91,2171	462,0567	87,3515	28,6243	0,4566	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	10047,8546	9165,3641	91,2171	476,0218	82,7398	30,2165	0,4699	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9767,0139	8909,1893	91,2171	466,8324	85,3411	29,3628	0,4611	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9673,4004	8823,7977	91,2171	465,8287	85,9426	29,0836	0,4601	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9642,1958	8795,3339	91,2171	465,0767	86,0706	28,9911	0,4594	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9891,8320	9023,0448	91,2171	471,0587	84,4105	29,7393	0,4651	0,6119	0,6019
-9,2100	31,9030	9610,9913	8766,8700	91,2171	466,7934	86,0083	28,8990	0,4610	0,6119	0,6019



Lampiran 3 Tabel Data Pengamatan (31 Desember 2020)

Times (hr)	El. Dam (m)	El. Tailrace (m)	Q (m ³ /s)	Speed (rpm)	Tekanan atm (N/m ²)	Tekanan uap air (N/m ²)	Temp. air °C	Massa jenis air(kg/m ³)	Daya generator(kW)	Kecepatan runner (m/s)	Kecepatan draft tube (m/s)	Draft Tube (N/m ²)
01,00	93,13	48,47	29,8	375	100951,81	3682,50140	27,6	996,38	6383,92	29,6338	5,1509	5687,8570
02,00	93,13	48,47	29,9	376	100951,81	3682,50140	27,6	996,37	6462,13	29,7128	5,1682	5687,8570
03,00	93,15	48,47	29,4	375	100951,55	3682,50140	27,6	996,38	6409,79	29,6338	5,0818	5687,8570
04,00	93,17	48,47	29,8	376	100951,28	3682,50140	27,6	996,37	6403,32	29,7128	5,1509	5687,8570
05,00	93,17	48,47	29,6	376	100951,28	3682,50140	27,6	996,38	6396,85	29,7128	5,1163	5687,8570
06,00	93,18	48,47	29,9	376	100951,15	3682,50140	27,6	996,38	6409,79	29,7128	5,1682	5687,8570
07,00	93,19	48,47	29,9	376	100951,01	3682,50140	27,6	996,38	6416,26	29,7128	5,1682	5687,8570
08,00	93,20	48,47	29,5	376	100950,88	3682,50140	27,6	996,38	6429,19	29,7128	5,0990	5687,8570
09,00	93,21	48,47	29,7	375	100950,75	3661,01860	27,5	996,40	6396,85	29,6338	5,1336	5687,8570
10,00	93,22	48,47	29,2	375	100950,61	3661,01860	27,5	996,41	6442,13	29,6338	5,0472	5687,8570
11,00	93,22	48,47	29,7	375	100950,61	3639,64470	27,4	996,44	6435,66	29,6338	5,1336	5687,8570
12,00	93,23	48,51	32,2	375	100951,01	3618,37940	27,3	996,46	6778,46	29,6338	5,5657	5687,8570
13,00	93,23	48,51	32,2	375	100951,01	3639,64470	27,4	996,43	6778,46	29,6338	5,5657	5687,8570
14,00	93,24	48,49	32,2	376	100950,61	3661,01860	27,5	996,37	6804,34	29,7128	5,5657	5687,8570
15,00	93,25	48,49	32,9	375	100950,48	3639,64470	27,4	996,37	6804,34	29,6338	5,6867	5687,8570
16,00	93,26	48,49	32,1	376	100950,35	3661,01860	27,5	996,41	6804,34	29,7128	5,5485	5687,8570
17,00	93,26	48,49	32,4	375	100950,35	3661,01860	27,5	996,41	6804,34	29,6338	5,6003	5687,8570
18,00	93,26	48,49	32,2	377	100950,35	3661,01860	27,5	996,41	6746,12	29,7918	5,5657	5687,8570
18,30	93,26	48,49	32,4	377	100950,35	3661,01860	27,5	996,40	6778,46	29,7918	5,6003	5687,8570
19,00	93,26	48,49	32,1	377	100950,35	3661,01860	27,5	996,39	6797,87	29,7918	5,5485	5687,8570

19,30	93,26	48,49	32,1	376	100950,35	3661,01860	27,5	996,40	6804,34	29,7128	5,5485	5687,8570
20,00	93,26	48,49	32,4	375	100950,35	3661,01860	27,5	996,39	6804,34	29,6338	5,6003	5687,8570
20,30	93,26	48,49	32,2	377	100950,35	3661,01860	27,5	996,40	6746,12	29,7918	5,5657	5687,8570
21,00	93,26	48,49	32,4	377	100950,35	3661,01860	27,5	996,40	6778,46	29,7918	5,6003	5687,8570
21,30	93,24	48,49	32,2	376	100950,61	3661,01860	27,5	996,41	6720,25	29,7128	5,5657	5687,8570
22,00	93,32	48,46	32,5	376	100949,15	3661,01860	27,5	996,41	6765,53	29,7128	5,6176	5687,8570
23,00	93,32	48,46	32,2	375	100949,15	3661,01860	27,5	996,41	6759,06	29,6338	5,5657	5687,8570
24,00	93,33	48,46	32,1	377	100949,01	3661,01860	27,5	996,40	6739,66	29,7918	5,5485	5687,8570



Lampiran 4 Tabel Hasil Analisis (31 Desember 2020)

Hs (m)	Net Head (m)	Daya hidrolik (kW)	Daya turbin (kW)	Eff. Turbin	Ns	Eff. Generator	Tekanan runner (N/m ²)	σ_c	σ_o	σ_{inst}
-9,2700	27,9930	8153,7937	7437,6562	91,2171	502,2703	78,2938	28,7844	0,4967	0,7000	0,6866
-9,2700	27,9930	8181,0733	7462,5399	91,2171	504,4514	78,9887	28,8736	0,4990	0,7000	0,6867
-9,2700	28,0130	8050,0942	7343,0645	91,2171	498,6208	79,6238	28,4307	0,4928	0,6995	0,6862
-9,2700	28,0330	8165,3629	7448,2093	91,2171	503,0681	78,4205	28,7845	0,4975	0,6990	0,6857
-9,2700	28,0330	8110,6432	7398,2956	91,2171	501,3797	78,8698	28,6069	0,4957	0,6990	0,6857
-9,2700	28,0430	8195,7682	7475,9442	91,2171	503,7793	78,2085	28,8736	0,4983	0,6988	0,6854
-9,2700	28,0530	8198,6908	7478,6101	91,2171	503,6446	78,2595	28,8736	0,4982	0,6985	0,6852
-9,2700	28,0630	8091,8928	7381,1920	91,2171	500,1307	79,4523	28,5186	0,4944	0,6983	0,6849
-9,2700	28,0730	8149,8197	7434,0313	91,2171	500,3598	78,4907	28,6954	0,4946	0,6980	0,6848
-9,2700	28,0830	8015,5520	7311,5561	91,2171	496,0001	80,3704	28,2554	0,4901	0,6977	0,6845
-9,2700	28,0830	8153,0501	7436,9779	91,2171	500,2362	78,9356	28,6952	0,4945	0,6977	0,6846
-9,3100	28,0530	8830,0683	8054,5344	91,2171	521,2875	76,7657	31,0068	0,5177	0,6999	0,6868
-9,3100	28,0530	8829,8024	8054,2919	91,2171	521,2797	76,7680	31,0069	0,5177	0,6999	0,6867
-9,2900	28,0830	8838,7128	8062,4197	91,2171	522,2352	76,9833	31,0073	0,5188	0,6985	0,6852
-9,2900	28,0930	9034,0745	8240,6231	91,2171	526,3367	75,3186	31,6880	0,5235	0,6982	0,6851
-9,2900	28,1030	8817,8925	8043,4281	91,2171	521,1558	77,1651	30,9110	0,5175	0,6979	0,6847
-9,2900	28,1030	8900,3027	8118,6003	91,2171	522,1929	76,4506	31,2001	0,5187	0,6979	0,6847
-9,2900	28,1030	8845,3626	8068,4855	91,2171	523,3552	76,2674	31,0071	0,5201	0,6979	0,6847
-9,2900	28,1030	8900,2134	8118,5188	91,2171	524,9753	76,1607	31,2001	0,5219	0,6980	0,6847
-9,2900	28,1030	8817,7155	8043,2666	91,2171	522,5366	77,0933	30,9111	0,5191	0,6980	0,6847

-9,2900	28,1030	8817,8040	8043,3473	91,2171	521,1532	77,1659	30,9111	0,5175	0,6980	0,6847
-9,2900	28,1030	8900,1241	8118,4373	91,2171	522,1877	76,4521	31,2002	0,5187	0,6980	0,6847
-9,2900	28,1030	8845,2738	8068,4045	91,2171	523,3525	76,2681	31,0071	0,5200	0,6980	0,6847
-9,2900	28,1030	8900,2134	8118,5188	91,2171	524,9753	76,1607	31,2001	0,5219	0,6980	0,6847
-9,2900	28,0830	8839,0676	8062,7434	91,2171	522,2457	76,0290	31,0071	0,5188	0,6984	0,6852
-9,2600	28,1930	8956,3640	8169,7378	91,2171	523,1368	75,5388	31,2970	0,5198	0,6947	0,6815
-9,2600	28,1930	8873,6899	8094,3248	91,2171	519,3319	76,1697	31,0071	0,5155	0,6947	0,6815
-9,2600	28,2030	8849,1808	8071,9683	91,2171	521,1490	76,1614	30,9111	0,5175	0,6944	0,6812



Lampiran 5 Tabel Konversi

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)	
$1 \text{ W/m}\cdot\text{K} = 1 \text{ J/s}\cdot\text{m}\cdot\text{K}$ $= 0.577789 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}\cdot\text{R}$	$1 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}\cdot\text{R} = 1.730735 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
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)	
$1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$	
$1 \text{ J} = 0.737562 \text{ lbf}\cdot\text{ft}$	$1 \text{ lbf}\cdot\text{ft} = 1.355818 \text{ J}$
$1 \text{ cal (Int.)} = 4.18681 \text{ J}$	$= 1.28507 \times 10^{-3} \text{ Btu}$
	$1 \text{ Btu (Int.)} = 1.055056 \text{ kJ}$
$1 \text{ erg} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ J}$	$= 778.1693 \text{ lbf}\cdot\text{ft}$
$1 \text{ eV} = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$	
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)	
$1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} = 0.238846 \text{ Btu/lbm}\cdot\text{R}$	$1 \text{ Btu/lbm}\cdot\text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
Heat flux (per unit area)	
$1 \text{ W/m}^2 = 0.316998 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2$	$1 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2 = 3.15459 \text{ W/m}^2$

TABLE A.1 (continued)
Conversion Factors

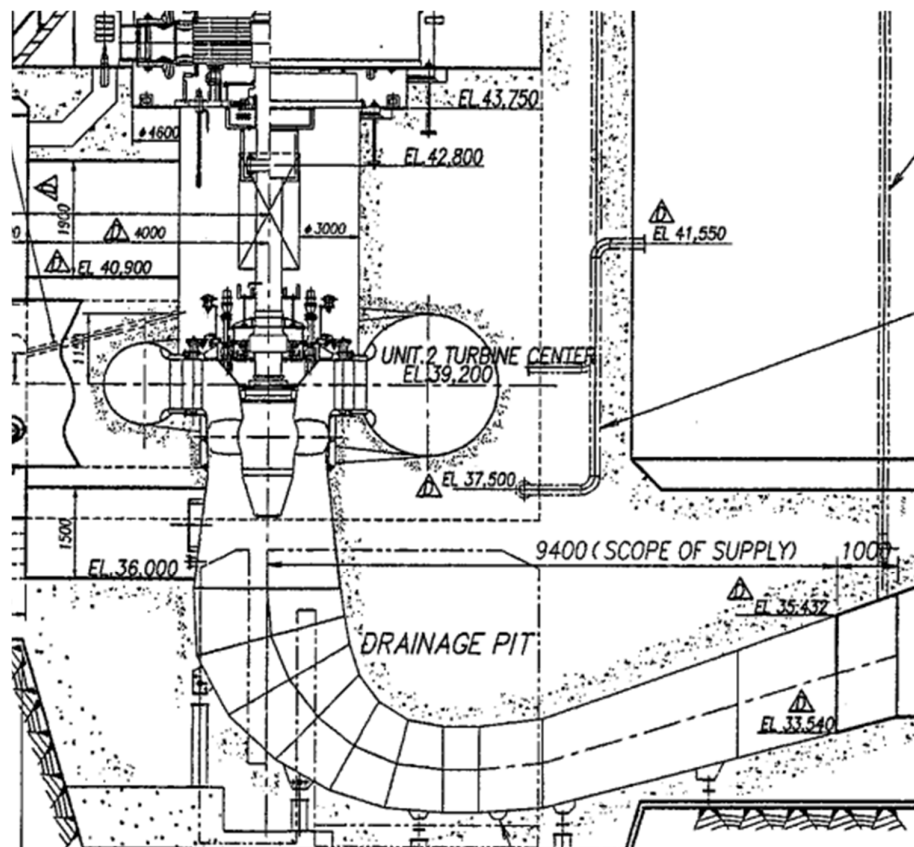
Heat-transfer coefficient (<i>h</i>)		
1 W/m ² ·K = 0.176 11 Btu/h·ft ² ·°R		1 Btu/h·ft ² ·°R = 5.67826 W/m ² ·K
Length (<i>L</i>)		
1 mm = 0.001 m = 0.1 cm		1 ft = 12 in.
1 cm = 0.01 m = 10 mm = 0.3970 in.		1 in. = 2.54 cm = 0.0254 m
1 m = 3.28084 ft = 39.370 in.		1 ft = 0.3048 m
1 km = 0.621 371 mi		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 lbm·ft/s = 0.224809 lbf·s		1 lbm·ft/s = 0.138 256 kg·m/s
Power (<i>Q</i>, <i>W</i>)		
1 W = 1 J/s = 1 N·m/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 = 101.325 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 torr = 1 mm Hg [0°C]		
1 mm Hg [0°C] = 0.133 322 kPa		1 in. Hg [0°C] = 0.49115 lbf/in. ²
1 m H ₂ O [4°C] = 9.806 38 kPa		1 in. H ₂ O [4°C] = 0.036126 lbf/in. ²
Specific energy (<i>e</i>, <i>u</i>)		
1 kJ/kg = 0.42992 Btu/lbm		1 Btu/lbm = 2.326 kJ/kg
= 334.55 lbf·ft/lbm		1 lbf·ft/lbm = 2.98907 × 10 ⁻³ kJ/kg
		= 1.28507 × 10 ⁻³ Btu/lbm

TABLE A.1 (continued)

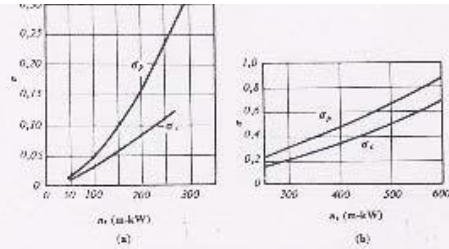
Conversion Factors

Specific kinetic energy ($\frac{1}{2} V^2$)	
$1 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 0.001 \text{ kJ/kg}$	$1 \text{ ft}^2/\text{s}^2 = 3.9941 \times 10^{-5} \text{ Btu/lbm}$
$1 \text{ kJ/kg} = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$	$1 \text{ Btu/lbm} = 25037 \text{ ft}^2/\text{s}^2$
Specific potential energy (Zg)	
$1 \text{ m} \cdot g_{\text{sat}} = 9.80665 \times 10^{-3} \text{ kJ/kg}$	$1 \text{ ft} \cdot g_{\text{sat}} = 1.0 \text{ lbf} \cdot \text{ft}/\text{lbm}$
$= 4.21607 \times 10^{-3} \text{ Btu/lbm}$	$= 0.001285 \text{ Btu/lbm}$
	$= 0.002989 \text{ kJ/kg}$
Specific volume (v)	
$1 \text{ cm}^3/\text{g} = 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$	
$1 \text{ cm}^3/\text{g} = 1 \text{ L/kg}$	
$1 \text{ m}^3/\text{kg} = 16.01846 \text{ ft}^3/\text{lbm}$	$1 \text{ ft}^3/\text{lbm} = 0.062428 \text{ m}^3/\text{kg}$
Temperature (T)	
$1 \text{ K} = 1^\circ\text{C} = 1.8 \text{ R} = 1.8 \text{ F}$	$1 \text{ R} = (5/9) \text{ K}$
$\text{TC} = \text{TK} - 273.15$	$\text{TF} = \text{TR} - 459.67$
$= (\text{TF} - 32)/1.8$	$= 1.8 \text{ TC} + 32$
$\text{TK} = \text{TR}/1.8$	$\text{TR} = 1.8 \text{ TK}$
Universal Gas Constant	
$\bar{R} = N_{\text{av}}k = 8.31451 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$	$\bar{R} = 1.98589 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R}$
$= 1.98589 \text{ kcal/kmol} \cdot \text{K}$	$= 1545.36 \text{ lbf} \cdot \text{ft}/\text{lbmol} \cdot \text{R}$
$= 82.0578 \text{ atm} \cdot \text{L}/\text{kmol} \cdot \text{K}$	$= 0.73024 \text{ atm} \cdot \text{ft}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R}$
	$= 10.7317 \text{ (lbf/in.}^2\text{)} \cdot \text{ft}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R}$
Velocity (V)	
$1 \text{ m/s} = 3.6 \text{ km/h}$	$1 \text{ ft/s} = 0.681818 \text{ mi/h}$
$= 3.28084 \text{ ft/s}$	$= 0.3048 \text{ m/s}$
$= 2.23694 \text{ mi/h}$	$= 1.09728 \text{ km/h}$
$1 \text{ km/h} = 0.27778 \text{ m/s}$	$1 \text{ mi/h} = 1.46667 \text{ ft/s}$
$= 0.91134 \text{ ft/s}$	$= 0.44704 \text{ m/s}$
$= 0.62137 \text{ mi/h}$	$= 1.609344 \text{ km/h}$
Volume (V)	
$1 \text{ m}^3 = 35.3147 \text{ ft}^3$	$1 \text{ ft}^3 = 2.831685 \times 10^{-2} \text{ m}^3$
$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 0.001 \text{ m}^3$	$1 \text{ in.}^3 = 1.6387 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
$1 \text{ Gal (US)} = 3.785412 \text{ L}$	$1 \text{ Gal (UK)} = 4.546090 \text{ L}$
$= 3.785412 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	$1 \text{ Gal (US)} = 231.00 \text{ in.}^3$

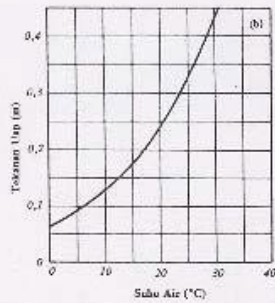
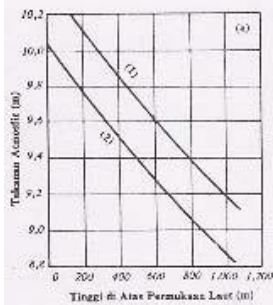
Lampiran 6 Outline Turbin Kaplan ULPLTA Bili-Bili



Lampiran 7 Hubungan Antara N_s dan Thoma



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 (1)	10,33	10,21	10,10	9,95	9,85	9,72	9,62	9,50	9,39	9,28	9,17
(m Kolom Air) (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 0,32 terkecil 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



Lampiran 8 Surat Validasi Data



SURAT KETERANGAN VALIDASI DATA

Yang bertanda tangan di bawah ini :

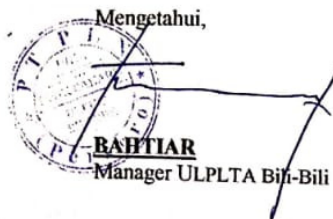
Nama : Amiruddin
Instansi : PT. PLN (Persero) ULPLTA Bili-Bili
Jabatan : Supervisor Operasi

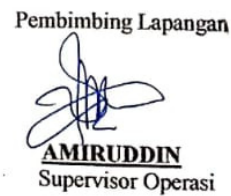
Dengan ini menyatakan bahwa data yang digunakan dalam penelitian skripsi ini adalah benar data dari PT PLN (Persero) ULPLTA Bili-Bili dan telah memenuhi validitas isi dan layak digunakan untuk penelitian dengan judul “**Analisis Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasi pada Turbin Kaplan di PLTA Bili-Bili**” oleh peneliti:

Nama : Suci Ika Pratiwi
NIM : 44218049
Program Studi : D4 Teknik Pembangkit Energi
Jurusan : Teknik Mesin
Universitas : Politeknik Negeri Ujung Pandang

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Bili-Bili, 5 Juni 2022

Mengetahui,

BAHTIAR
Manager ULPLTA Bili-Bili

Pembimbing Lapangan

AMIRUDDIN
Supervisor Operasi

Lampiran 9 Dokumentasi Pengambilan Data

