

ANALISIS EFISIENSI TURBIN PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA *MINIHYDRO* (PLTM) MALEA
DI KABUPATEN TANA TORAJA



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

REZA RISALDI ROBBY 442 15 017
A. KHAYRUNNISA 442 15 019

PROGRAM STUDI D-4 TEKNIK PEMBANGKIT ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG
MAKASSAR
2019

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul “Analisis Efisiensi Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga *Minihydro* (PLTM) Malea di Kabupaten Tana Toraja” oleh Reza Risaldi Robby NIM 442 15 017 dan A. Khayunnisa NIM 442 15 019 dinyatakan layak untuk diujikan.

Makassar, 3 September 2019

Pembimbing I,



DR. Jumadi Tangko, M.Pd.
NIP. 19580606 199003 1 002

Pembimbing II,



Yiyin Klistafani, S.T., M.T.
NIP. 19900517 201504 2 001

Mengetahui,

Ketua Program Studi
D4 Teknik Pembangkit Energi,



Ir. La Ode Musa, M.T.
NIP. 19601231 199003 1 021

HALAMAN PENERIMAAN

Pada hari ini, hari Kamis tanggal 3 September 2019, tim penguji ujian sidang skripsi telah menerima skripsi mahasiswa: Reza Risaldi Robby NIM 44215017 dan A. Khayrunnisa NIM 44215019 dengan judul "Analisis Efisiensi Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga *Minihydro* (PLTM) Malea di Kabupaten Tana Toraja".

Makassar, 3 September 2019

Tim Penguji Ujian Sidang Skripsi:

- | | | |
|----------------------------------|---------------|---|
| 1. Ir. La Ode Musa, M.T. | Ketua | (..... ) |
| 2. Muh. Yusuf Yunus, S.ST., M.T. | Sekretaris | (..... ) |
| 3. Dr. Ir. Firman, M.T. | Anggota I | (.....) |
| 4. Sri Suwasti, S.ST., M.T | Anggota II | (..... ) |
| 5. Dr. Jumadi Tangko, M.Pd. | Pembimbing I | (..... ) |
| 6. Yiyin Klistafani, S.T., M.T | Pembimbing II | (..... ) |

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas berkat rahmat serta karunia-Nya, penulisan skripsi ini yang berjudul “Analisis Efisiensi Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga *Minihydro* (PLTM) Malea di Kabupaten Tana Toraja” dapat diselesaikan dengan baik.

Dalam penulisan skripsi ini tidak sedikit hambatan yang penulis alami. Namun, berkat bantuan berbagai pihak terutama pembimbing, hambatan tersebut dapat teratasi. Sehubungan dengan itu, pada kesempatan dan melalui lembaran ini penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas Rahmat dan karunia-Nya.
2. Ayah dan Ibu tercinta atas dukungan materi, doa, serta kasih sayang yang tak terhingga nilainya.
3. Bapak Prof. Ir. Muhammad Anshar., M.Si., Ph.D., selaku Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang.
4. Bapak Dr. Jamal, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.
5. Bapak Ir. La Ode Musa, M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Pembangkit Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang.
6. Bapak DR. Jumadi Tangko, M.Pd., selaku Pembimbing I yang telah banyak meluangkan waktu, pikiran dan tenaga untuk membimbing kami.
7. Ibu Yiyin Klistafani, S.T., M.T, selaku Pembimbing II yang telah banyak meluangkan waktu, pikiran dan tenaga untuk membimbing kami.

8. Para Dosen dan Staf Administrasi Politeknik Negeri Ujung Pandang yang tidak disebutkan namanya satu persatu atas bimbingan dan bantuannya.
9. *General Manager* dan seluruh *team Engineering* PLTM Malea.
10. Rekan – rekan sesama mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang, khususnya mahasiswa Teknik Pembangkit Energi angkatan 2015.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini dan demi perbaikan pada masa mendatang. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembacanya.



Makassar, 3 September 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	hlm.
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PENERIMAAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR SIMBOL, SATUAN ATAU SINGKATAN	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
SURAT PERNYATAAN	xiv
RINGKASAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	5
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga <i>Minihydro</i> (PLTM)	5
2.2.1 Pengertian PLTM	5
2.2.2 Bagian-bagian PLTM	6
2.2.3 Prinsip Kerja PLTM	16
2.3 Turbin Air	17

2.3.1 Pengertian Turbin Air	17
2.3.2 Jenis Turbin Air	19
2.4 Efisiensi Turbin	25
BAB III METODE PENELITIAN	26
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	26
3.2 Alat dan Bahan	26
3.3 Teknik Pengumpulan Data.....	26
3.4 Prosedur Penelitian.....	27
3.5 Teknik Analisis Data	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1. Tabel Hasil Pengukuran	30
4.1.1 Tabel data saat beroperasi	30
4.1.2 Tabel data tahunan.....	32
4.2. Perhitungan debit, torsi, efisiensi dan daya turbin.....	38
4.3. Tabel Hasil Analisis	48
4.3.1 Tabel hasil analisis turbin saat beroperasi.....	50
4.3.2 Tabel hasil analisis turbin tahunan	51
4.4. Grafik dan Pembahasan	63
4.5. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	68
5.1 Kesimpulan	68
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN	72

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Data saat beroperasi pada hari Kamis – Sabtu, 28 Februari sampai 2 Maret 2019 untuk mendapatkan nilai debit	30
Tabel 4.2	Data saat beroperasi pada hari Kamis – Sabtu, 28 Februari sampai 2 Maret 2019 untuk mendapatkan nilai torsi dan efisiensi turbin	31
Tabel 4.3	Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2012	32
Tabel 4.4	Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2013	32
Tabel 4.5	Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2014	33
Tabel 4.6	Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2015	33
Tabel 4.7	Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2016	34
Tabel 4.8	Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2017	34
Tabel 4.9	Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2018	35
Tabel 4.10	Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2012	35
Tabel 4.11	Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2013	36
Tabel 4.12	Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2014	36
Tabel 4.13	Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2015	37
Tabel 4.14	Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2016	37
Tabel 4.15	Hasil analisa turbin unit 1 pada saat beroperasi tanggal 28 Februari sampai 2 Maret 2019	49
Tabel 4.16	Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2012	50
Tabel 4.17	Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2013	51
Tabel 4.18	Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2014	52
Tabel 4.19	Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2015	53
Tabel 4.20	Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2016	54

Tabel 4.21 Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2017	55
Tabel 4.22 Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2018	56
Tabel 4.23 Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2012	57
Tabel 4.24 Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2013	58
Tabel 4.25 Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2014	59
Tabel 4.26 Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2015	60
Tabel 4.27 Hasil analisa data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2016	61



DAFTAR GAMBAR

	hlm.
Gambar 2.1 <i>Weir-Intake</i> pada PLTM Malea.....	6
Gambar 2.2 <i>Waterway</i> pada PLTM Malea.....	7
Gambar 2.3 <i>Headpond</i> pada PLTM Malea	8
Gambar 2.4 <i>Penstock</i> pada PLTM Malea.....	8
Gambar 2.5 Turbin Air pada PLTM Malea.....	9
Gambar 2.6 Generator pada PLTM Malea.....	10
Gambar 2.7 Panel Governor pada PLTM Malea.....	11
Gambar 2.8 <i>Main Inlet Valve (MIV)</i> pada PLTM Malea.....	12
Gambar 2.9 <i>Power House</i> pada PLTM Malea	12
Gambar 2.10 Transformator <i>Step-Up</i> pada PLTM Malea.....	13
Gambar 2.11 Transformator <i>Auxiliary</i> pada PLTM Malea.....	14
Gambar 2.12 Jaringan Distribusi pada PLTM Malea	14
Gambar 2.13 Gardu Hubung pada PLTM Malea.....	15
Gambar 2.14 Saluran Pembuangan (<i>Tailrace</i>) pada PLTM Malea.....	16
Gambar 2.15 Turbin Pelton	20
Gambar 2.16 Turbin Francis	23
Gambar 2.17 Turbin Kaplan	23
Gambar 2.17 Grafik pemilihan turbin berdasarkan ketinggian (<i>head</i>) dan debit (<i>discharge</i>)	24
Gambar 3.1 <i>Flow Chart</i> Pengujian efisiensi turbin	28
Gambar 4.1 Grafik hubungan antara debit dengan daya turbin pada PLTM Malea	62

Gambar 4.2 Grafik hubungan antara tahun beroperasi dengan efisiensi turbin pada PLTM Malea 63

Gambar 4.3 *Bearing Houshing* pada Turbin Unit 2 PLTM Malea 64

Gambar 4.4 *Inner Ring Bearing* pada *Shaft* Turbin Unit 2 PLTM Malea 65



DAFTAR SIMBOL, SATUAN, ATAU SINGKATAN

SIMBOL	SATUAN	KETERANGAN
v	m/s	Kecepatan Air
g	m/s^2	Gaya gravitasi bumi
H	m	Tinggi saluran pembawa
q	m^3/s	Debit air
A	m^2	Luas penampang
P_h	Watt	Daya hidrolik
P_g	Watt	Daya generator
P_m	Watt	Daya mekanik
P_t	Watt	Daya turbin
ρ	kg/m^3	Massa jenis air
V	Volt	Tegangan
I_{ph}	Ampere	Arus Phasa
n	Rpm	Putaran generator
η_t	%	Efisiensi turbin
η_g	%	Efisiensi generator
η_s	%	Efisiensi sistem
f	Hz	Frekuensi
T	Nm	Torsi
l	m	Jarak
t	s	Waktu
Q	kVar	Daya Reaktif

DAFTAR LAMPIRAN

	hlm.
Lampiran 1	Peta Jarak Lokasi Dari Ibu Kota Provinsi 72
Lampiran 2	<i>Single line</i> diagram PLTM Malea73
Lampiran 3	<i>Control Panel</i> pada PLTM Malea 74
Lampiran 4	Pengambilan data..... 75
Lampiran 5	Standard Operation Procedure pada PLTM Malea..... 81



SURAT PERNYATAAN

Kami yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Reza Risaldi Robby / A Khayrunnisa

NIM : 442 15 017 / 442 15 019

menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa segala pernyataan dalam skripsi ini yang berjudul “Analisa Efisiensi Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihydro (PLTM) Malea di Kabupaten Tana Toraja” merupakan gagasan dan hasil karya kami dengan arahan komisi pembimbing dan belum pernah diajukan dalam bentuk apa pun pada perguruan tinggi dan instansi mana pun.

Semua data dan informasi yang digunakan telah dinyatakan secara jelas dan dapat diperiksa kebenarannya. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya penulis lain telah disebutkan dalam naskah dan dicantumkan dalam skripsi ini.

Jika pernyataan kami tersebut di atas tidak benar, kami siap menanggung risiko yang ditetapkan oleh Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Makassar, 3 September 2019

Hormat Saya,



Reza Risaldi Robby
442 15 017



A. Khayrunnisa
442 15 019

**ANALISIS EFISIENSI TURBIN PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA *MINIHYDRO* (PLTM) MALEA
DI KABUPATEN TANA TORAJA**

RINGKASAN

Pembangkit Listrik Tenaga *MiniHydro* (PLTM) Malea di Kabupaten Tana Toraja merupakan satu satunya pembangkit yang menyuplai langsung kebutuhan listrik pada proyek PLTA Malea. Analisis ini memberikan penjelasan atau gambaran tentang keadaan dari Pembangkit yang diteliti mulai dari *waterway* hingga kinerja turbin Francis. Bertujuan untuk mengetahui besar efisiensi yang dihasilkan turbin serta faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin.

Dalam penelitian ini turbin yang diteliti adalah turbin unit 1 dan unit 2. Data diperoleh dari hasil pengukuran dan data tahunan di PLTM Malea dengan teknik dokumentasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap tahun terjadi penurunan efisiensi turbin baik pada turbin unit 1 dan turbin unit 2. Hal ini diakibatkan karena berkurangnya kinerja dari beberapa komponen pada turbin tersebut. Adapun pada turbin unit 1 nilai efisiensi turbin terbesar pada tahun 2012 yaitu 98,40 %, nilai efisiensi turbin pada tahun 2016 yaitu 83,30 % dan efisiensi turbin terkecil pada tahun 2018 yaitu 79,37 %. Pada turbin unit 2 nilai efisiensi turbin terbesar pada tahun 2012 yaitu 97,46 % dan efisiensi turbin terkecil pada tahun 2016 yaitu 77,35 %. Dimana pada tahun 2017 dan 2018, turbin unit 2 tidak beroperasi lagi dikarenakan kerusakan *bearing*. Dari nilai ini didapatkan bahwa nilai efisiensi pada PLTM Malea Kabupaten Tana Toraja kurang efisien dalam membangkitkan daya listrik. Hal ini disebabkan karena PLTM tersebut sudah beroperasi sejak tahun 2012 dan tidak adanya perawatan yang dilakukan secara berkala.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Ketersediaan energi listrik sudah merupakan keharusan bagi keberlanjutan pembangunan setiap negara. Energi listrik merupakan kebutuhan primer dan telah hampir menyamai tingkat kebutuhan terhadap sandang, pangan dan papan. Karenanya setiap negara berlomba untuk membangun pembangkit tenaga listrik yang bersesuaian dengan kondisi geografis dan sumber daya alam yang tersedia. Indonesia sebagai negara yang berada pada garis khatulistiwa yang beriklim tropis memiliki hutan luas dan lebat yang menyediakan mata air/sumber air yang membentuk danau, dan sungai yang mengalirkan air sepanjang tahun. Air yang mengalir tersebut merupakan sumber energi yang salah satu manfaatnya untuk memutar turbin air untuk menghasilkan tenaga listrik.

Beberapa keunggulan memanfaatkan sumber daya air adalah terjaminnya ketersediaan listrik tanpa batasan waktu selama intensitas aliran air dapat dipertahankan sesuai kebutuhan turbin/pembangkit, tidak menimbulkan polusi sehingga aman bagi lingkungan dan juga pengaturan air dari fasilitas pembangkit dapat digunakan sebagai sumber pengairan bagi lahan pertanian.

Melihat kebutuhan akan tambahan kapasitas pembangkit listrik di masa depan Pulau Sulawesi dan melihat potensi alam yang ada di wilayah pulau tersebut, PT. Hadji Kalla Group memprakarsai pembangunan PLTM Malea kapasitas 25 MW untuk unit 1 sampai unit 6 yang dirintis sejak tahun 2005. Saat ini telah beroperasi unit 1 dan 2 dengan kapasitas $2 \times 3,5$ MW, unit 3 dan 4 sudah tidak beroperasi karena rusak dan sekarang sedang pembangunan tahap akhir

untuk unit 5 dan 6 dengan kapasitas $2 \times 5,5$ MW yang memanfaatkan aliran air Sungai Sadang. Daya yang dihasilkan PLTM Malea akan ditransmisikan ke penyulang di PLN Rayon Makale yang kemudian digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik pada konstruksi PLTA Malea. Adapun turbin yang digunakan adalah Turbin Francis yang dimana prinsip kerja turbin air adalah mengubah energi potensial akibat dari perbedaan ketinggian atau air yang jatuh ke sudu - sudu di ubah menjadi energi kinetik lalu diubah lagi menjadi energi mekanik pada poros dan air yang jatuh akan memutar baling - baling turbin dan turbin akan memutar generator yang akan menghasilkan listrik.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Aditya Ferdianto (2011) menyimpulkan bahwa penyebab utama menurunnya efisiensi dan performa turbin disebabkan oleh faktor usia komponen yang memang sudah waktunya untuk diganti.

Adapun penelitian yang dilakukan oleh Herman Siregar (2010) menyimpulkan bahwa hubungan antara produksi listrik berbanding lurus dengan tinggi muka air, debit air, dan daya yang digunakan. Semakin tinggi muka air dalam waduk, maka semakin banyak debit air yang dikeluarkan, sehingga semakin besar juga daya dan jumlah produksi listrik yang akan dihasilkan.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Muliawan, A., dan Yani, A., (2016) menyimpulkan bahwa semakin besar debit air maka efisiensi turbin kinetik semakin meningkat dikarenakan adanya penambahan kecepatan aliran yang menumbuk sudu turbin sehingga gaya tangensial yang dihasilkan meningkat dan mempengaruhi torsi turbin, daya turbin dan efisiensi turbin.

Kondisi saat ini untuk unit 1 dan 2 telah beroperasi sekitar 6 tahun dan telah mengalami permasalahan yang dapat menurunkan efisiensi unit secara umum dan efisiensi turbin secara khusus. Untuk itu, perlu dilakukan analisa guna mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi permasalahan tersebut.

Berdasarkan penjelasan dan alur pemikiran diatas maka penulis mengambil penelitian dengan judul “Analisis Efisiensi Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga *Minihydro* (PLTM) Malea di Kabupaten Tana Toraja”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, akhirnya rumusan masalah penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Berapa besar efisiensi turbin air unit 1 dan 2 yang dihasilkan pada PLTM Malea?
2. Faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi efisiensi turbin unit 1 dan 2 pada PLTM Malea?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Mengingat adanya keterbatasan dalam penelitian ini dilakukan pembatasan masalah yaitu penelitian dilakukan pada bagian input turbin pada unit 1 dan 2 PLTM Malea sampai output yang dihasilkan generator.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang dikemukakan pada rumusan masalah, berikut tujuan yang akan dicapai:

1. Mengetahui besar efisiensi yang dihasilkan turbin unit 1 dan 2 pada PLTM Malea.
2. Mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin unit 1 dan 2 pada PLTM Malea.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah mengetahui perbandingan efisiensi turbin yang dihasilkan PLTM Malea dengan standar perusahaan yang telah ditetapkan serta faktor-faktor yang mempengaruhi turunnya efisiensi pada turbin.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan energi terbaru berupa air. Salah satu keunggulan dari pembangkit ini adalah responnya yang sangat cepat sehingga sangat sesuai dengan kondisi beban puncak maupun pada saat terjadi gangguan (Hasriani, dkk, 2017).

Berdasarkan daya yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga air dibedakan menjadi:

1. *Micro-hydro* : dibawah dari 100 KW
2. *Mini-hydro* : 101 KW – 10 MW
3. *Small-hydro* : 10 MW – 50 MW
4. *Large-hydro* : lebih dari 50 MW

(J. Gale dan Y. Kaya, 2003).

2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM)

2.2.1. Pengertian PLTM

PLTM adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan tenaga air untuk menjalankan turbin sehingga dapat menghasilkan listrik. Besarnya listrik yang dihasilkan oleh PLTM tergantung pada debit alirannya dan tinggi jatuh atau *head* pada instalasinya. Debit aliran dan tinggi jatuh berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan.

2.2.2. Bagian-bagian PLTM

1. *Weir-Intake*

Weir adalah bagian awal dari PLTM. *Weir* adalah struktur bendungan berkepala rendah (*lowhead dam*), yang berfungsi untuk menaikkan muka air. Air sungai yang permukaannya dinaikkan akan melimpas melalui puncak / mercu bendung (*overflow*).

Intake merupakan pintu masuknya air menuju *waterway* dengan struktur *range force concrete* dengan tipe pintu vertikal yang berukuran 2,5 x 2,8 meter.



(a)

(b)

Gambar 2.1 (a) *Weir*, (b) *Intake* pada PLTM Malea

2. *Waterway*

Waterway berfungsi untuk mengalirkan air yang masuk dari intake menuju *headpond*. Disepanjang *waterway* ini terdapat 3 buah *flushing gate* yang berfungsi menjaga ketinggian dan debit air agar tetap normal dengan debit air 28.88 m³/s. *Waterway* ini terdiri atas 2 tipe yaitu tipe square dan tipe trapesium dengan dimensi sebagai berikut:

a. *Waterway tipe square:*

Panjang = 150 meter

Lebar = 5,5 meter

Kedalaman = 3,3 meter

b. *Waterway tipe trapesium:*

Panjang = 1350 meter

Lebar = 10,5 meter

Kedalaman = 5 meter



Gambar 2.2 *Waterway* pada PLTM Malea

3. *Headpond*

Headpond berfungsi untuk menampung air dalam jumlah besar sebelum masuk ke *penstock* serta untuk menciptakan *head* (tinggi jatuh air) agar energi yang dihasilkan juga besar. *Head pond* ini berukuran dengan lebar 12 meter dan kedalaman 7,5 meter.



Gambar 2.3 *Headpond* pada PLTM Malea

4. *Penstock*

Penstock atau biasa disebut pipa pesat adalah pipa yang mengalirkan air dari *headpond* masuk ke *spiral case* (rumah turbin). Di dalam pipa *penstock* terjadi perubahan energi pada air, yaitu dari energi potensial menjadi energi kinetik. Dalam perencanaan pipa *penstock* banyak hal yang harus dipertimbangkan, diantaranya tekanan air di dalam *penstock*, *head losses* yang terjadi, serta jenis material pipa. Pada PLTM Malea ini memiliki 3 buah *penstock* dengan masing-masing diameter berukuran 2×1,5 meter, dan 2,2 meter dengan panjang 300 meter. Adapun material yang digunakan Steel JIS SS400 dan SM490.



Gambar 2.4 *Penstock* pada PLTM Malea

5. Turbin Air

Turbin air merupakan mesin yang mengkonversikan energi air menjadi energi poros untuk memutar generator sehingga menghasilkan listrik. Jenis turbin yang digunakan pada PLTM dengan *head* 60 m adalah Turbin Francis.

Turbin Francis merupakan turbin yang terbanyak dipergunakan pada pembangkit listrik tenaga air. Hal ini disebabkan karakteristiknya yang mampu mengisi sektor tengah kapasitas tenaga air yang ada. Saat ini turbin Francis dioperasikan antara *head* 20 m sampai 600 m.



Gambar 2.5 Turbin Air pada PLTM Malea

Berikut spesifikasi turbin yang digunakan pada PLTM Malea untuk unit 1 dan 2:

<i>Type</i>	: Francis
<i>Rated Power</i>	: 3777 KW
<i>Max head</i>	: 61 m
<i>Rated head</i>	: 60 m
<i>Rated discharge</i>	: 6.96 m ³ /s

Rated speed : 600 rpm

Runaway speed : 1152 rpm

6. Generator

Generator adalah sebuah mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Secara garis besar generator terdiri dari beberapa bagian, diantaranya rotor dan stator. Untuk menghasilkan listrik sebuah generator harus memenuhi ketiga syarat, yaitu gerakan (putaran), *fluks* (magnet), dan belitan.



Gambar 2.6 Generator pada PLTM Malea

Spesifikasi generator pada PLTM Malea:

Seri : SFW-3600-10/1730

Phase : 3 phase

Rated power : 3.6 MW

Rated voltage : 10.5 Kv

Rated current : 233 A

Rated freq : 50 Hz

Power factor : 0.85

7. Governor

Pada dasarnya governor merupakan suatu sistem kendali otomatis yang sangat berpengaruh dalam menjaga kecepatan putaran poros suatu pembangkit listrik tenaga air. Pada PLTM Malea, frekuensi yang harus dijaga yaitu sekitar 50 Hz pada beban yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan PLN. Fungsi lain dari governor yakni menghentikan operasi turbin pada saat terjadi gangguan.

Kecepatan putar yang terjadi pada poros untuk beban yang terjadi diatur oleh main governor. Pada saat beban tinggi, secara otomatis putaran akan berkurang. Dalam hal ini, kontrol governor akan menjaga agar kecepatannya konstan dengan cara membuka katup masuk air (*guide vanes*) sebelum masuk ke dalam turbin.



Gambar 2.7 Panel Governor pada PLTM Malea

8. Main Inlet Valve (MIV)

MIV adalah sebuah katup masukan yang membatasi antara penstock dan rumah keong (*spiral case*) yang dapat menahan air pada saat terjadi

perbaikan/kerusakan di *spiral case*. Pada MIV terdapat *counter weight* berwarna merah berguna untuk membantu kinerja *butterfly valve*. Diatas MIV ada katup *bypass* yang berfungsi untuk menyamakan tekanan air antara *penstock (upstream)* dan *spiral case (downstream)* ketika pada saat ingin dioperasikan.



Gambar 2.8 *Main Inlet Valve* pada PLTM Malea

9. *Power House*

Power house atau rumah pembangkit merupakan tempat pembangkitan energi listrik. Di dalamnya terdapat perangkat diantaranya *Central Control Room*, *Main Inlet Valve*, turbin, governor, generator, trafo, dan perlengkapan lainnya.



Gambar 2.9 *Power House* pada PLTM Malea

10. Transformator *Step-up*

Transformator adalah sebuah mesin listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang merubah besaran arus dan tegangan dari *input*, tetapi tidak merubah besaran daya *input* dan *output*nya. Dalam hal ini transformator *step-up* menaikkan tegangan 10,5 kV dari output generator menjadi 20 kV, kemudian ditransmisikan melalui kawat penghantar (tipe kabel) AAAC 300 sqmm untuk disalurkan ke penyulang PLTM Malea di PLN rayon Makale.



Gambar 2.10 Transformator *Step-up* pada PLTM Malea

11. Transformator *Auxiliary*

Transformator *auxiliary* digunakan untuk pemakaian sendiri. Fungsi dari transformator *auxiliary* ini adalah menyuplai kebutuhan listrik untuk operasional PLTM seperti motor-motor listrik dan penerangan di area PLTM.



Gambar 2.11 Transformator *Auxiliary* pada PLTM Malea

12. Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi adalah jaringan antara pemakai tenaga listrik (konsumen/langganan) dengan *Bulk Power Source* (sumber daya besar) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik (PLN).



Gambar 2.12 Jaringan Distribusi pada PLTM Malea

13. Gardu Hubung

Gardu hubung adalah suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik yang merupakan pusat beban yang diambil dari saluran transmisi yang secara spesifik berfungsi untuk mentransformasi tenaga listrik dari tegangan tinggi ke tegangan tinggi lainnya atau dari tegangan tinggi ke tegangan menengah, serta pengukuran, pengawasan operasi, dan pengaturan dari pengamanan sistem tenaga listrik.

Tegangan 20 kV yang dikirim dari Power house PLTM Malea ke gardu hubung PLTD Makale akan ditransmisikan ke Penyulang Lakipadada 20 kV, Penyulang Bandara 20 kV, Penyulang Tinoring 20 kV.



Gambar 2.13 Gardu Hubung pada PLTM Malea

14. Saluran Pembuangan (*Tailrace*)

Tailrace merupakan tempat mengalirnya air yang telah digunakan memutar turbin setelah melewati *draft tube*. *Tailrace* dapat dimanfaatkan untuk mengalirkan dan mengurangi tekanan air dari *draft tube*. *Tailrace* dilengkapi

dengan pintu, dengan tujuan menutup aliran air dari *tailrace* ke *draft tube* pada waktu diadakan perbaikan/ pemeriksaan pada turbin.



Gambar 2.14 Saluran Pembuangan (*Tailrace*) pada PLTM Malea

2.2.3. Prinsip Kerja PLTM

PLTM Malea merupakan salah satu unit dari *hydro plant* yang ada di PT. Malea Energy. Adapun sumbernya berasal dari aliran air Sungai Saddang. Air yang mengalir dari *intake* menuju *waterway* tersebut kemudian dialirkan menuju turbin melalui penstock yang dimana terjadi energi potensial. Dari penstock menuju turbin energi potensial dirubah menjadi energi kinetik. Didalam turbin energi kinetik akan memutar *runner* dan dirubah menjadi energi mekanik karena adanya poros. Energi mekanik yang timbul pada turbin akan di salurkan melalui poros ke generator. Di dalam generator energi mekanik tersebut akan dirubah menjadi energi listrik.

PLTM Malea beroperasi pada level 165.20-165.95 meter agar energi potensialnya dapat dimanfaatkan secara optimal. Air kemudian masuk kedalam *penstock* melalui *intake gate*. Air yang masuk kedalam penstock akan masuk

jalurnya dibuat mengecil agar tekanan yang di berikan sama besar. Dari *spiral case* air akan memutar *runner* melalui sudu-sudu pengarah. Putaran tersebut akan di teruskan ke generator melalui poros. Di dalam generator akan dibangkitkan energi listrik, untuk PLTM Malea unit 1 dan 2 tegangan yang dihasilkan yaitu sebesar 10,5 KV. Tegangan ini akan dinaikkan di dalam main transformer menjadi 20 KV untuk disalurkan ke penyulang PLTM Malea di PLN rayon Makale.

Sebelum menghitung daya yang akan dihasilkan turbin, terlebih dahulu perlu diketahui debit dan luas penampang. Dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$q = A \cdot v \text{ (m}^3\text{/s)} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

dan

$$v = \frac{l}{t} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

- q = Debit (m³/s)
- A = Luas penampang (m²)
- v = Kecepatan (m/s)
- l = Jarak (m)
- t = Waktu (s)
- d = Diameter *penstock*

2.3. Turbin Air

2.3.1. Pengertian Turbin Air

Turbin air merupakan mesin yang berputar diakibatkan oleh energi potensial dari aliran fluida. Fluida yang bergerak menjadikan *blade* pada turbin

berputar dan menghasilkan energi mekanik untuk menggerakkan rotor. Perbedaan dasar antara turbin air awal dengan kincir air terletak pada komponen. Komponen pada turbin lebih optimal dan dapat memanfaatkan air dengan putaran lebih cepat serta dapat memanfaatkan *head* yang lebih tinggi. Komponen kincir lebih sederhana dengan biaya peralatan dan perawatan yang lebih murah. Turbin berfungsi untuk mengubah energi potensial dan kinetik menjadi energi mekanik. Gaya jatuh air yang mendorong baling-baling menyebabkan turbin berputar. (Ridwan, 2014).

Adapun bagian bagian utama dari turbin yaitu:

- a. Sudu pengarah : berfungsi untuk mengarahkan air yang masuk sehingga aliran air berubah menjadi searah (*uniform*).
- b. *Casing spiral* : Sebagian dari mesin ini memiliki poros vertikal meskipun beberapa mesin yang lebih kecil dari jenis ini memiliki poros horisontal. Cairan masuk dari *penstock* (pipa yang menuju ke turbin dari reservoir pada ketinggian tinggi) ke casing spiral yang benar-benar mengelilingi runner. *Casing* ini dikenal sebagai gulir *casing* atau *volute*. Luas penampang casing ini menurun merata sepanjang keliling untuk menjaga kecepatan fluida konstan dalam besar disepanjang jalan yang menuju *guide vane*.
- c. *Guide on stay vanes* : fungsi *guide vanes* atau baling-baling tetap adalah untuk mengkonversi bagian dari energi tekanan fluida di pintu masuk ke energi kinetik dan kemudian untuk mengarahkan cairan pada pisau *runner* pada sudut yang tepat untuk desain.

- d. Sudu *runner* : berfungsi untuk mengubah energi hidrolis air menjadi energi mekanis.
- e. Poros turbin : berfungsi untuk meneruskan torsi dan putaran ke poros generator.
- f. Pipa hisap : berfungsi untuk mengubah energi kecepatan menjadi energi tekanan.
- g. *Draft-tube* : Fungsi utama dari *draft tube* adalah untuk mengurangi kecepatan air dibuang untuk meminimalkan kehilangan energi kinetik di outlet (Dietzel, 1992).

2.3.2. Jenis Turbin Air

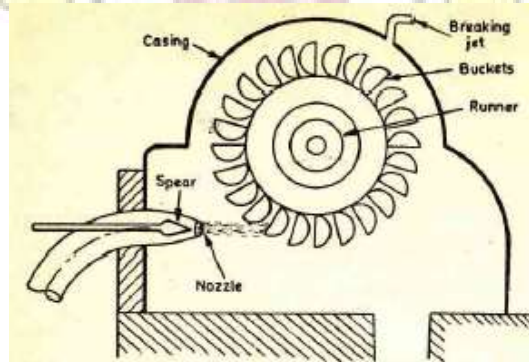
Terdapat dua jenis turbin air yaitu: turbin impuls dan turbin reaksi.

1. Turbin Impuls

Pada turbin impuls seluruh energi air yang tersedia mula-mula dikonversi menjadi energi kinetik dengan melewati air melalui *nozzle* yang dijaga dekat dengan *runner*. Air masuk wheel dalam bentuk semburan (*jet*) yang menumbuk bucket. Semburan (*jet*) air menumbuk bucket dengan kecepatan tinggi dan sesudah mengalir melewati sudu, air keluar dengan kecepatan rendah (energi diberikan ke *runner*). Tekanan air (pada sisi masuk dan sisi keluar sudu) adalah sama, yaitu bertekanan atmosfer. Termasuk dalam jenis turbin impuls adalah : turbin Pelton dan turbin *Crossflow*. Contoh yang paling umum dari turbin impuls adalah Turbin Pelton (Pratama, 2016).

a. Turbin Pelton

Turbin pelton adalah salah satu dari jenis turbin air yang paling efisien. Turbin ini dioperasikan pada tinggi jatuh air (*head*) sampai 1800 m, turbin ini relatif membutuhkan jumlah air yang lebih sedikit dan biasanya porosnya dalam posisi mendatar. Turbin pelton sering disebut dengan turbin tekanan sama karena selama mengalir disepanjang sudu-sudu turbin tidak terjadi penurunan tekanan, sedangkan perubahan seluruhnya terjadi pada bagian pengarah pancaran atau *nozzle*, dimana air yang semula mempunyai energi potensial yang tinggi dirubah menjadi energi kinetis. Pancaran air yang keluar dari *nozzle* akan menumbuk *bucket* yang dipasang tetap di sekeliling *runner* dan garis pusat pancaran air menyinggung lingkaran dari pusat *bucket*. Setelah membentur sudu, arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (impuls). Kecepatan keliling dari *bucket* akibat tumbukan yang terjadi tergantung dari jumlah dan ukuran pancaran serta kecepatannya. Kecepatan pancaran tergantung dari tinggi air di atas *nozzle* serta efisiensinya (Pratama, 2016).



Gambar 2.15 Turbin *Pelton*
(Sumber: *Hydraulic Machines*, Khurmi 1997)

b. Turbin *Crossflow*

Turbin *crossflow* dapat dioperasikan pada debit 20 liter/s hingga 10 m³/s dan ketinggian antara 1 m s/d 200 m. Turbin *crossflow* menggunakan nosel persegi panjang yang lebarnya sesuai dengan lebar *runner*. Terjadi konversi energi kinetik menjadi energi mekanis ketika air masuk menuju turbin dan mengenai sudu. Air mengalir keluar membentur sudu dan memberikan energinya (lebih rendah dibanding saat masuk) kemudian meninggalkan turbin. *Runner* turbin dibuat dari beberapa sudu yang dipasang pada sepasang piringan paralel (Pratama, 2016).

2. Turbin Reaksi

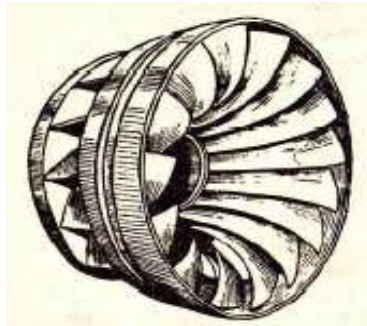
Turbin reaksi adalah turbin yang memanfaatkan energi potensial untuk menghasilkan energi gerak. Sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga *runner* dapat berputar. *Runner* turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin. Turbin reaksi bekerja secara langsung mengubah energi kinetik juga energi tekanan secara bersamaan menjadi energi mekanik. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi, jenis dari turbin ini adalah turbin francis dan turbin kaplan (Pratama, 2016).

a. Turbin Francis

Turbin francis pertama kali ditemukan sekitar tahun 1950 oleh orang Amerika yang bernama Howk dan Francis. Teknik mengkonversikan energi potensial menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses

reaksi sehingga turbin francis juga sering disebut turbin reaksi. Turbin dipasang diantara sumber air tekanan tinggi di bagian masuk dan air bertekanan rendah di bagian keluar. Konstruksi turbin francis terdiri dari sudu pengarah dan sudu jalan. Perubahan energi seluruhnya terjadi pada sudu pengarah dan sudu gerak yang keduanya terendam dalam air. Air pertama masuk pada terusan berbentuk spiral. Sudu pengarah mengarahkan air masuk secara tangensial. Sudu pengarah pada turbin francis merupakan suatu sudu pengarah yang tetap ataupun sudu pengarah yang dapat diatur sudutnya. Penggunaan sudu pengarah yang dapat diatur merupakan pilihan yang tepat untuk berbagai kondisi aliran air. Turbin francis merupakan jenis turbin tekanan lebih. Aliran air masuk ke sudu pengarah dengan kecepatan semakin naik dengan tekanan yang semakin turun sampai roda jalan, pada roda jalan kecepatan akan naik lagi dan tekanan turun sampai di bawah 1 atm. Untuk menghindari kavitasi, tekanan harus dinaikan sampai 1 atm dengan cara pemasangan pipa hisap.

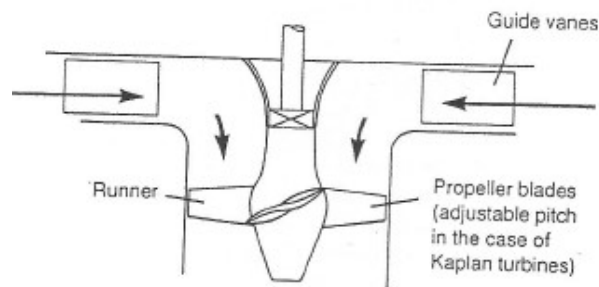
Pengaturan daya yang dihasilkan yaitu dengan mengatur posisi pembukaan sudu pengarah, sehingga kapasitas air yang masuk ke roda turbin dapat diperbesar atau diperkecil. Turbin ini digunakan untuk tinggi terjun sedang, yaitu 20 - 440 meter (Pratama, 2016).



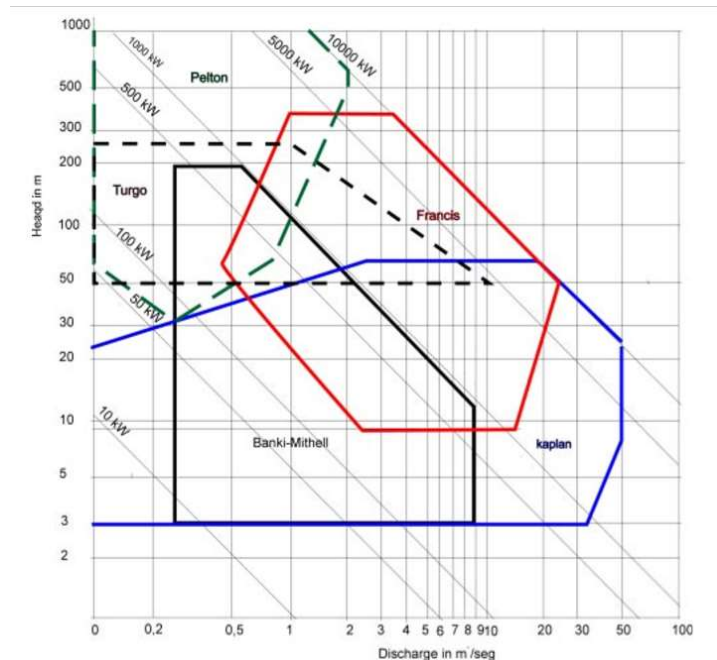
Gambar 2.16 Turbin *Francis*
(Sumber: *Hydraulic Machines*, Khurmi 1997)

b. Turbin Kaplan

Turbin kaplan merupakan evolusi dari turbin francis. Turbin ini mempunyai roda jalan yang mirip dengan baling-baling pesawat terbang. Bila baling-baling pesawat terbang berfungsi untuk menghasilkan gaya dorong, roda jalan pada turbin kaplan berfungsi untuk mendapatkan gaya putar yang dapat menghasilkan torsi pada poros turbin. Berbeda dengan roda jalan pada turbin francis, keistimewaan turbin kaplan adalah sudut sudu geraknya (*runner*) bisa diatur untuk menyesuaikan kondisi aliran saat itu yaitu perubahan debit air (Pratama, 2016).



Gambar 2.17 Turbin Kaplan
(Sumber: *Low head simple reaction water turbine*, Date dan Akbarzadeh, 2005)



Gambar 2.18 Grafik pemilihan turbin berdasarkan ketinggian (*head*) dan debit (*discharge*)
 (Sumber: Layman's Handbook On How To Develop A Small Hydro Site, Celso Penche, 1988)

Pada penelitian ini, analisis data yang akan dihitung dalam menentukan daya dari suatu turbin adalah :

a. Daya Hidrolik

Daya hidrolik adalah daya yang dimiliki oleh air yang mengalir dan tempat yang tinggi ke tempat yang rendah. Dapat dicari dengan persamaan 2.4.

$$P_h = \rho \times g \times q \times H \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

P_h = daya hidrolik (Watt)

ρ = Densitas air (kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

q = Debit air (m^3/s)

H = Tinggi jatuh air (m)

b. Daya Mekanik

Daya mekanik adalah daya yang dihasilkan pada poros turbin didapat dengan persamaan 2.5.

$$P_m = \frac{2 \times \pi \times n}{60} T \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

P_m = Daya Mekanik (Watt)

T = Torsi (Nm)

π = 3,14

n = Kecepatan putar (rpm)

2.4. Efisiensi Turbin

Efisiensi adalah hasil guna atau daya guna yang dibangkitkan oleh turbin dan generator sebagai hasil pemanfaatan potensi air terjun semaksimal mungkin untuk menghasilkan tenaga listrik sebesar besarnya, efisiensi ini ditentukan dengan satuan persen (Salim, 2009).

Efisiensi turbin merupakan perbandingan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin dengan daya hidrolik yang digunakan untuk menggerakkan turbin, dapat dihitung dengan persamaan 2.6.

$$\eta_t = \frac{P_m}{P_h} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

η_t = Efisiensi Turbin

P_m = Daya Mekanik

P_h = Daya Hidrolik

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari - Mei 2019 bertempat di PLTA Malea Energy Sub. Unit PLTM Malea (2 x 3,6 MW) Kabupaten Tana Toraja Provinsi Sulawesi Selatan dan Laboratorium Konversi Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang.

3.2. Alat dan Bahan

1. *Stopwatch*
2. Roll Meter
3. Handy Talky (HT)

3.3. Teknik Pengumpulan Data

Cara yang digunakan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah:

1. Teknik Observasi (*Field Research*)

Penulis melakukan penelitian secara langsung di lapangan terhadap Turbin Francis unit 1 dan unit 2 untuk memperoleh data-data yang akan diperlukan khususnya pada sub unit pembangkitan PLTM Malea. Spesifikasi turbin Francis yang menjadi objek penelitian dapat dilihat pada halaman 9.

2. Studi Dokumen

Penulis mengumpulkan dokumen-dokumen dengan membaca dan mempelajari terkait dengan bagian-bagian dan prosedur pengoperasian pada PLTM Malea.

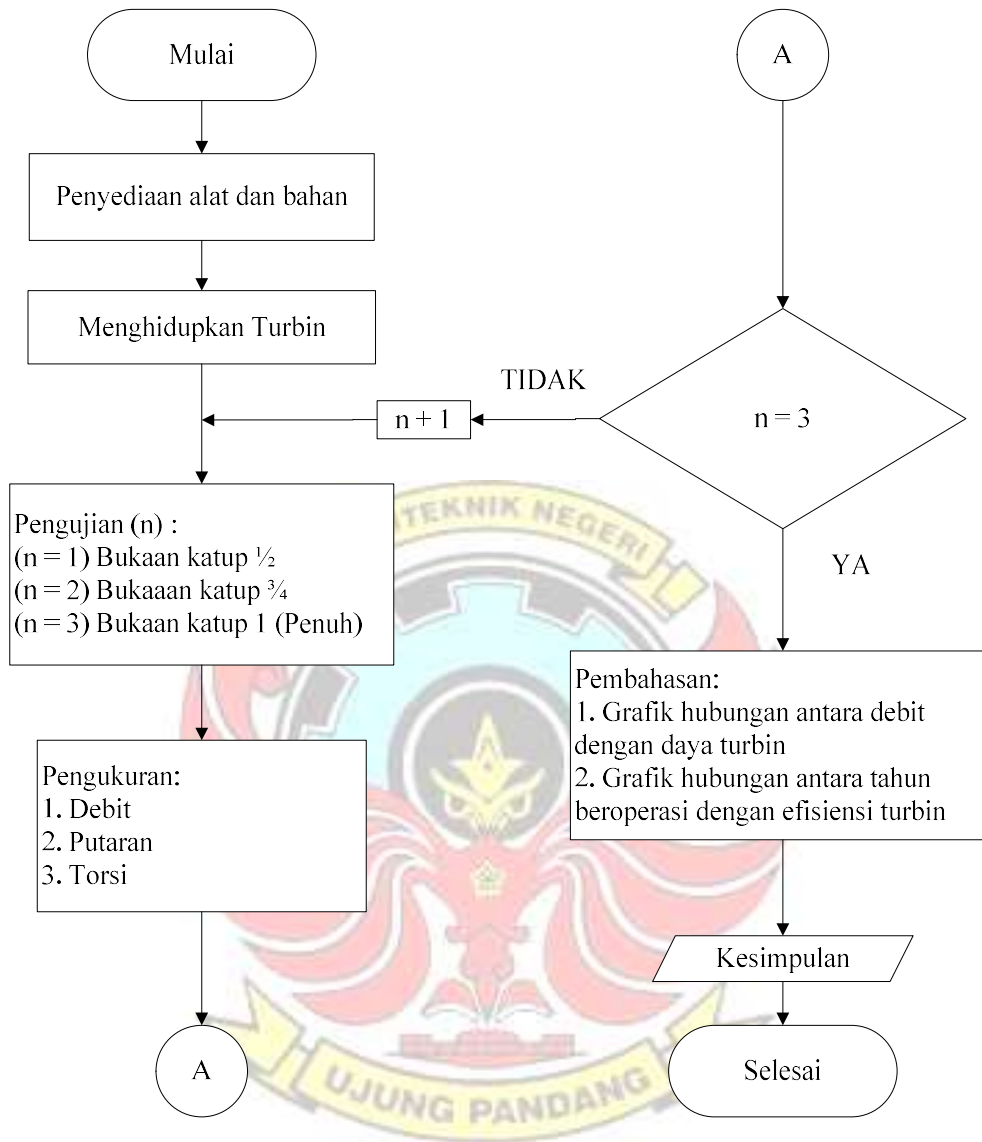
3. Wawancara (*Interview*)

Mengumpulkan data yang dilakukan oleh peneliti dengan menanyakan langsung tentang hal-hal yang berkaitan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro.

3.4. Prosedur Penelitian

Langkah – langkah proses perhitungan efisiensi keseluruhan turbin dan karakteristik dari turbin berdasarkan variasi bukaan katup dapat dilihat secara umum pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 *Flow chart* Pengujian Efisiensi Turbin

3.5. Teknik Analisis Data

Data turbin yang diperoleh dari sistem PLTM Malea unit 1 dan 2 kemudian dimasukkan ke dalam persamaan yang menggunakan metode langsung. Kemudian menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin pada PLTM unit 1 dan 2.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Tabel Hasil Pengukuran

4.1.1 Tabel data operasional

Data-data operasional turbin unit 1 dengan variasi bukaan katup yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai debit air yang mengalir dalam turbin dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data saat beroperasi pada hari Kamis – Sabtu, 28 Feb – 2 Maret 2019

No.	Variasi Bukaan Katup	Pengukuran Jarak (l)	Pengukuran Waktu (t)	Penampang Waterway (m)			Rata-rata Waktu (t)	Rata-rata Kedalaman (h)
				Permukaan atas	Alas	Kedalaman		
1	100%	45 m	54 s	10,5	7	2,58	53,00 s	2,60 m
			52 s			2,62		
			53 s			2,6		
2	75%		74 s			3,23	72,75 s	3,21 m
			74 s			3,22		
			72 s			3,19		
			71 s			3,2		
3	50%		92 s			3,65	93,33 s	3,67 m
			94 s			3,68		
		94 s	3,68					

Data-data operasional turbin unit 1 dengan variasi bukaan katup yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai torsi dan efisiensi turbin dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data saat beroperasi pada hari Kamis – Sabtu, 28 Feb – 2 Maret 2019

Variasi Bukaan Katup	q (m ³ /s)	V (kV)	Ip (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)	Q (kVar)	P _{unit 5} (kW)	P _{unit 6} (kW)
			R	S	T						
100%	7,90	11	95	100	100	599	49,98	3498	724	3818	2887
	7,92	11	95	100	100	599	49,99	3508,3	743,3		
	7,93	11	95	100	100	600	49,99	3511,89	748		
	7,96	11	95	100	100	600	50,02	3515	751		
Rata-rata	7,93	11	95	100	100	599,5	50,00	3508,3	741,575		
75%	5,98	11	70	75	75	598,5	49,97	2594	679,75		
	5,99	11	70	75	75	599	49,97	2590	688,9		
	6,00	11	70	75	75	599	50,00	2604	688		
Rata-rata	5,99	11	70	75	75	598,833	49,98	2596	685,55		
50%	4,08	11	50	50	50	597,5	50,01	1743,75	467,75		
	4,09	11	50	50	50	598	49,98	1748,25	487,5		
	4,10	11	50	50	50	598	49,98	1754	498		
Rata-rata	4,09	11	50	50	50	597,833	49,98	1748,67	484,42		

4.1.2 Tabel data tahunan

Berikut data tahunan pengoperasian turbin untuk unit 1 sejak tahun 2012 hingga tahun 2018 dapat dilihat pada Tabel 4.3 - 4.9.

Tabel 4.3 Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2012

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	6,40	11	95	100	100	600	50	3527,59
Februari	6,39	11	95	100	100	600	50	3531,45
Maret	6,34	11	95	100	100	600	50	3525,09
April	6,36	11	95	100	100	599	50	3512,36
Mei	6,41	11	95	100	100	600	50	3544,18
Juni	6,37	11	95	100	100	600	50	3537,82
Juli	6,40	11	95	100	100	599	50	3518,73
Agustus	6,49	11	95	100	100	600	50	3506,00
September	6,47	11	95	100	100	600	50	3537,82
Oktober	6,46	11	95	100	100	599	50	3525,09
November	6,38	11	95	100	100	599	50	3499,64
Desember	6,45	11	95	100	100	599	50	3554,21

Tabel 4.4 Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2013

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	6,47	11	95	100	100	600	50	3478,19
Februari	6,55	11	95	100	100	600	50	3514,65
Maret	6,54	11	95	100	100	599	50	3511,25
April	6,52	11	95	100	100	600	50	3506,38
Mei	6,57	11	95	100	100	600	50	3525,45
Juni	6,56	11	95	100	100	599	50	3519,36
Juli	6,53	11	95	100	100	600	50	3513,06
Agustus	6,51	11	95	100	100	600	50	3492,34
September	6,56	11	95	100	100	600	50	3518,70
Oktober	6,54	11	95	100	100	600	50	3502,74
November	6,50	11	95	100	100	600	50	3485,87
Desember	6,63	11	95	100	100	599	50	3557,07

Tabel 4.5 Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2014

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	6,79	11	95	100	100	600	50	3527,53
Februari	6,75	11	95	100	100	600	50	3509,83
Maret	6,81	11	95	100	100	600	50	3503,93
April	6,72	11	95	100	100	599	50	3468,54
Mei	6,84	11	95	100	100	600	50	3480,34
Juni	6,83	11	95	100	100	600	50	3527,53
Juli	6,80	11	95	100	100	599	50	3474,44
Agustus	6,78	11	95	100	100	598	50	3498,03
September	6,81	11	95	100	100	600	50	3520,85
Oktober	6,77	11	95	100	100	599	50	3473,85
November	6,75	11	95	100	100	599	50	3526,93
Desember	6,76	11	95	100	100	598	50	3523,89

Tabel 4.6 Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2015

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	6,88	11	95	100	100	599	50	3499,80
Februari	6,85	11	95	100	100	600	50	3475,63
Maret	6,84	11	95	100	100	599	50	3511,89
April	6,78	11	95	100	100	600	50	3457,49
Mei	6,80	11	95	100	100	600	50	3530,03
Juni	6,88	11	95	100	100	600	50	3523,98
Juli	6,79	11	95	100	100	600	50	3505,85
Agustus	6,83	11	95	100	100	599	50	3493,76
September	6,89	11	95	100	100	600	50	3511,89
Oktober	6,79	11	95	100	100	600	50	3487,72
November	6,88	11	95	100	100	599	50	3475,63
Desember	7,10	11	95	100	100	599	50	3481,67

Tabel 4.7 Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2016

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	7,27	11	95	100	100	600	50	3343,90
Februari	7,23	11	95	100	100	600	50	3379,47
Maret	7,34	11	95	100	100	599	50	3384,55
April	7,28	11	95	100	100	599	50	3415,04
Mei	7,28	11	95	100	100	600	50	3415,04
Juni	7,32	11	95	100	100	600	50	3404,88
Juli	7,33	11	95	100	100	600	50	3384,55
Agustus	7,31	11	95	100	100	599	50	3384,55
September	7,24	11	95	100	100	600	50	3394,72
Oktober	7,28	11	95	100	100	600	50	3404,88
November	7,26	11	95	100	100	599	50	3409,96
Desember	7,35	11	95	100	100	600	50	3430,29

Tabel 4.8 Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2017

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	7,38	11	95	100	100	600	50	3354,30
Februari	7,45	11	95	100	100	600	50	3344,38
Maret	7,46	11	95	100	100	600	50	3369,19
April	7,52	11	95	100	100	600	50	3374,15
Mei	7,52	11	95	100	100	600	50	3398,96
Juni	7,50	11	95	100	100	600	50	3334,46
Juli	7,46	11	95	100	100	600	50	3394,00
Agustus	7,46	11	95	100	100	600	50	3403,92
September	7,48	11	95	100	100	600	50	3364,23
Oktober	7,50	11	95	100	100	600	50	3374,15
November	7,51	11	95	100	100	600	50	3418,81
Desember	7,55	11	95	100	100	600	50	3384,07

Tabel 4.9 Data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2018

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	7,55	11	95	100	100	600	50	3364,30
Februari	7,54	11	95	100	100	600	50	3343,51
Maret	7,57	11	95	100	100	600	50	3400,70
April	7,58	11	95	100	100	600	50	3369,50
Mei	7,61	11	95	100	100	600	50	3369,50
Juni	7,62	11	95	100	100	600	50	3390,30
Juli	7,63	11	95	100	100	600	50	3395,50
Agustus	7,61	11	95	100	100	600	50	3385,10
September	7,58	11	95	100	100	600	50	3348,70
Oktober	7,6	11	95	100	100	600	50	3317,51
November	7,64	11	95	100	100	600	50	3359,10
Desember	7,61	11	95	100	100	600	50	3405,90

Berikut data-data tahunan pengoperasian turbin untuk unit 2 sejak tahun 2012 hingga tahun 2018 dapat dilihat pada Tabel 4.10 - 4.14.

Tabel 4.10 Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2012

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	6,44	11	95	100	100	600	50	3500,76
Februari	6,43	11	95	100	100	599	50	3495,97
Maret	6,43	11	95	100	100	599	50	3496,61
April	6,45	11	95	100	100	600	50	3510,07
Mei	6,41	11	95	100	100	599	50	3485,03
Juni	6,45	11	95	100	100	600	50	3507,90
Juli	6,49	11	95	100	100	600	50	3526,00
Agustus	6,48	11	95	100	100	600	50	3530,28
September	6,47	11	95	100	100	600	50	3537,78
Oktober	6,46	11	95	100	100	599	50	3525,85
November	6,47	11	95	100	100	600	50	3531,31
Desember	6,46	11	95	100	100	600	50	3512,93

Tabel 4.11 Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2013

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	6,48	11	95	100	100	600	50	3433,90
Februari	6,51	11	95	100	100	600	50	3448,88
Maret	6,49	11	95	100	100	599	50	3438,20
April	6,54	11	95	100	100	600	50	3454,70
Mei	6,55	11	95	100	100	600	50	3457,00
Juni	6,58	11	95	100	100	599	50	3485,90
Juli	6,55	11	95	100	100	600	50	3458,00
Agustus	6,56	11	95	100	100	600	50	3460,30
September	6,59	11	95	100	100	600	50	3490,20
Oktober	6,56	11	95	100	100	600	50	3461,30
November	6,53	11	95	100	100	600	50	3456,40
Desember	6,58	11	95	100	100	599	50	3486,30

Tabel 4.12 Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2014

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	6,62	11	95	100	100	600	50	3374,79
Februari	6,67	11	95	100	100	600	50	3398,82
Maret	6,68	11	95	100	100	600	50	3406,04
April	6,71	11	95	100	100	599	50	3422,01
Mei	6,70	11	95	100	100	600	50	3416,12
Juni	6,80	11	95	100	100	600	50	3473,35
Juli	Perbaikan <i>Bearing</i>							
Agustus								
September	6,68	11	95	100	100	600	50	3404,63
Oktober	6,78	11	95	100	100	599	50	3456,60
November	6,82	11	95	100	100	599	50	3477,60
Desember	6,80	11	95	100	100	598	50	3467,27

Tabel 4.13 Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2015

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	6,93	11	95	100	100	599	50	3254,99
Februari	6,92	11	95	100	100	600	50	3244,76
Maret	6,90	11	95	100	100	599	50	3242,97
April	6,89	11	95	100	100	600	50	3236,89
Mei	6,89	11	95	100	100	600	50	3230,69
Juni	6,93	11	95	100	100	600	50	3255,57
Juli	6,88	11	95	100	100	600	50	3232,88
Agustus	6,96	11	95	100	100	599	50	3262,82
September	7,11	11	95	100	100	600	50	3339,99
Oktober	7,13	11	95	100	100	600	50	3343,96
November	7,15	11	95	100	100	599	50	3352,60
Desember	7,18	11	95	100	100	599	50	3369,54

Tabel 4.14 Data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2016

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)
			R	S	T			
Januari	7,39	11	95	100	100	600	50	3196,46
Februari	7,45	11	95	100	100	600	50	3220,38
Maret	7,48	11	95	100	100	599	50	3229,54
April	7,53	11	95	100	100	599	50	3252,70
Mei	7,65	11	95	100	100	600	50	3303,77
Juni	7,56	11	95	100	100	600	50	3264,38
Juli	7,67	11	95	100	100	600	50	3312,57
Agustus	7,65	11	95	100	100	599	50	3304,00
September	7,55	11	95	100	100	600	50	3265,87
Oktober	7,60	11	95	100	100	600	50	3284,46
November	7,57	11	95	100	100	599	50	3266,95
Desember	7,60	11	95	100	100	600	50	3285,98

4.2 Perhitungan debit, torsi, efisiensi dan daya turbin

Perhitungan berdasarkan data pada Tabel 4.1. Berikut adalah contoh perhitungan

untuk data ke 1 :

1. Menghitung nilai Debit (m^3/s) (untuk bukaan katup 100 %)

Diketahui : $l = 45 \text{ m}$

$t = 53 \text{ s}$

$h = 2,6 \text{ m}$

alas penampang = 7 m

permukaan atas penampang = 10,5 m

$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$

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

P unit 5 = 3818 kW

P unit 6 = 2887 kW

Ditanyakan : $Q = \dots ?$

Penyelesaian :

Menghitung Luas Penampang saluran pembawa (A)

$$A = \frac{\text{Alas} + \text{permukaan atas penampang}}{2} \times \text{tinggi}$$

$$A = \frac{10,5 \text{ m} + 7 \text{ m}}{2} \times 2,60 \text{ m}$$

$$= 22,75 \text{ m}^2$$

Menghitung Kecepatan aliran air pada saluran pembawa (v)

$$v = \frac{l}{t}$$

$$v = \frac{45 \text{ m}}{53 \text{ s}} = 0,849 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{total}} &= v \times A \\ &= 0,849 \text{ m/s} \times 22,75 \text{ m}^2 \\ &= 19,32 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Menghitung debit PLTM untuk unit 5 dan 6

$$P = \rho \times g \times q \times H$$

$$6705000 \text{ w} = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times q \times 60 \text{ m}$$

$$6705000 \text{ w} = 588600 \text{ kg m/s}^2 \times q$$

$$q = \frac{6705000 \text{ w}}{588600 \text{ kg m/s}^2}$$

$$q = 11,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

Jadi debit untuk unit 1 adalah :

$$\begin{aligned} q_1 &= q_{\text{total}} - q_{\text{unit 5 dan 6}} \\ &= 19,32 \text{ m}^3/\text{s} - 11,39 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 7,93 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

2. Menghitung Debit (m^3/s) (untuk bukaan katup 75 %)

Diketahui : $l = 45 \text{ m}$

$$t = 72,75 \text{ s}$$

$$h = 3,21 \text{ m}$$

$$\text{alas penampang} = 7 \text{ m}$$

$$\text{permukaan atas penampang} = 10,5 \text{ m}$$

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

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

$$P \text{ unit 5} = 3818 \text{ kW}$$

$$P \text{ unit 6} = 2887 \text{ kW}$$

Ditanyakan : $q = \dots ?$

Penyelesaian :

Menghitung Luas Penampang saluran pembawa (A)

$$A = \frac{\text{Alas} + \text{permukaan atas penampang}}{2} \times \text{tinggi}$$

$$A = \frac{10,5 \text{ m} + 7 \text{ m}}{2} \times 3,21 \text{ m}$$
$$= 28,09 \text{ m}^2$$

Menghitung Kecepatan aliran air pada saluran pembawa (v)

$$v = \frac{l}{t}$$

$$v = \frac{45 \text{ m}}{72,75 \text{ s}}$$
$$= 0,62 \text{ m/s}$$

$$q_{\text{total}} = v \times A$$

$$= 0,62 \text{ m/s} \times 28,09 \text{ m}^2$$

$$= 17,38 \text{ m}^3/\text{s}$$

Menghitung debit PLTM untuk unit 5 dan 6

$$P = \rho \times g \times q \times H$$

$$6705000 \text{ w} = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times q \times 60 \text{ m}$$

$$6705000 w = 588600 \text{ kg m/s}^2 \times q$$

$$q = \frac{6705000 w}{588600 \text{ kg m/s}^2}$$

$$q = 11,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

Jadi debit untuk unit 1 adalah :

$$q_1 = q_{\text{total}} - q_{\text{unit 5 dan 6}}$$

$$= 17,38 \text{ m}^3/\text{s} - 11,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 5,99 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. Menghitung Debit (m^3/s) (untuk bukaan katup 50 %)

Diketahui : $l = 45 \text{ m}$

$$t = 93,33 \text{ s}$$

$$h = 3,67 \text{ m}$$

$$\text{alas penampang} = 7 \text{ m}$$

$$\text{permukaan atas penampang} = 10,5 \text{ m}$$

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

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

$$P \text{ unit 5} = 3818 \text{ kW}$$

$$P \text{ unit 6} = 2887 \text{ kW}$$

Ditanyakan : $q = \dots ?$

Penyelesaian :

Menghitung Luas Penampang saluran pembawa (A)

$$A = \frac{\text{Alas} + \text{permukaan atas penampang}}{2} \times \text{tinggi}$$

$$A = \frac{10,5 \text{ m} + 7 \text{ m}}{2} \times 3,67 \text{ m}$$

$$= 32,11 \text{ m}^2$$

Menghitung Kecepatan aliran air pada saluran pembawa (v)

$$v = \frac{l}{t}$$

$$v = \frac{45 \text{ m}}{93,33 \text{ s}}$$

$$= 0,48 \text{ m/s}$$

$$q_{\text{total}} = v \times A$$

$$= 0,48 \text{ m/s} \times 32,11 \text{ m}^2$$

$$= 15,48 \text{ m}^3/\text{s}$$

Menghitung debit PLTM untuk unit 5 dan 6

$$P = \rho \times g \times q \times H$$

$$6705000 \text{ w} = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times q \times 60 \text{ m}$$

$$6705000 \text{ w} = 588600 \text{ kg m/s}^2 \times q$$

$$q = \frac{6705000 \text{ w}}{588600 \text{ kg m/s}^2}$$

$$q = 11,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

Jadi debit untuk unit 1 adalah :

$$q_1 = q_{\text{total}} - q_{\text{unit 5 dan 6}}$$

$$= 15,48 \text{ m}^3/\text{s} - 11,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 4,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

Perhitungan berdasarkan data pada Tabel 4.2. Berikut adalah contoh perhitungan untuk data ke 1 :

1. Menghitung nilai Torsi (Nm) (untuk bukaan katup 100 (%))

Diketahui : $q = 7,90 \text{ m}^3/\text{s}$

$$V = 11 \text{ kV}$$

$$I_{ph} = \frac{(95 \text{ A} + 100 \text{ A} + 100 \text{ A})}{3} = 98,33 \text{ A}$$

$$n = 599 \text{ rpm}$$

$$f = 49,98 \text{ Hz}$$

$$P_g = 3498 \text{ kW}$$

$$Q = 724 \text{ kVar}$$

$$H = 60 \text{ m}$$

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

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

$$\cos \phi = 0,85$$

$$\eta_g = 95\%$$

Ditanyakan : $T = \dots ?$

$$\eta_t = \dots ?$$

Penyelesaian :

Menghitung nilai torsi (T)

$$\eta_g = \frac{P_g}{P_m}$$

$$\eta_g = \frac{P_g}{\frac{2 \times \pi \times n \times T}{60}}$$

$$T = \frac{P_g \times 60}{2 \times \pi \times n \times \eta_g}$$

$$T = \frac{3498 \text{ kW} \times 60}{2 \times 3,14 \times 599 \text{ rpm} \times 0,95}$$

$$T = \frac{209880}{3573,63} \text{ kNm}$$

$$T = 58,73 \text{ kNm}$$

Menghitung Efisiensi Turbin (η_t)

$$\eta_t = \frac{\text{Daya Mekanik}}{\text{Daya Hidrolik}} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{\frac{2 \times \pi \times n \times T}{60}}{\rho \times g \times q \times H}$$

$$\eta_t = \frac{\frac{2 \times 3,14 \times 599 \text{ rpm} \times 58,73 \text{ kNm}}{60}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 7,90 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 60 \text{ m}} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{3682,11 \text{ kW}}{4649,94 \text{ kW}} \times 100\%$$

$$\eta_t = 79,19 \%$$

2. Menghitung nilai Torsi (Nm) (untuk bukaan katup 75%)

Diketahui : $q = 5,98 \text{ m}^3/\text{s}$

$$V = 11 \text{ kV}$$

$$I_{ph} = \frac{(70 \text{ A} + 75 \text{ A} + 75 \text{ A})}{3} = 73,33 \text{ A}$$

$$n = 598,5 \text{ rpm}$$

$$f = 49,97 \text{ Hz}$$

$$P_g = 2594 \text{ kW}$$

$$Q = 679,75 \text{ kVar}$$

$$H = 60 \text{ m}$$

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

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

$$\cos \emptyset = 0,85$$

$$\eta_g = 95\%$$

Ditanyakan : $T = \dots ?$

$\eta_t = \dots ?$

Penyelesaian :

Menghitung nilai torsi (T)

$$\eta_g = \frac{P_g}{P_m}$$

$$\eta_g = \frac{P_g}{\frac{2 \times \pi \times n \times T}{60}}$$

$$T = \frac{P_g \times 60}{2 \times \pi \times n \times \eta_g}$$

$$T = \frac{2594 \text{ kW} \times 60}{2 \times 3,14 \times 598,5 \text{ rpm} \times 0,95}$$

$$T = \frac{155640}{3570,651} \text{ kNm}$$

$$T = 43,59 \text{ kNm}$$

Menghitung Efisiensi Turbin (η_t)

$$\eta_t = \frac{\text{Daya Mekanik}}{\text{Daya Hidrolik}} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{2 \times \pi \times n \times T}{60 \times \rho \times g \times q \times H}$$

$$\eta_t = \frac{2 \times 3,14 \times 598,5 \text{ rpm} \times 43,59 \text{ kNm}}{60 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 5,98 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 60 \text{ m}} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{2730,53 \text{ kW}}{3517,86 \text{ kW}} \times 100\%$$

$$\eta_t = 77,62 \%$$

3. Menghitung nilai Torsi (Nm) (untuk bukaan katup 50 %)

Diketahui : $q = 4,08 \text{ m}^3/\text{s}$

$$V = 11 \text{ kV}$$

$$I_{ph} = \frac{(50 \text{ A} + 50 \text{ A} + 50 \text{ A})}{3} = 50 \text{ A}$$

$$n = 597,5 \text{ rpm}$$

$$f = 50,01 \text{ Hz}$$

$$P_g = 1743,75 \text{ KW}$$

$$Q = 467,75 \text{ kVar}$$

$$H = 60 \text{ m}$$

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

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

$$\cos \emptyset = 0,85$$

$$\eta_g = 95\%$$

Ditanyakan : $T = \dots ?$

$$\eta_t = \dots ?$$

Penyelesaian :

Menghitung nilai torsi (T)

$$\eta_g = \frac{P_g}{P_m}$$

$$\eta_g = \frac{P_g}{\frac{2 \times \pi \times n \times T}{60}}$$

$$T = \frac{P_g \times 60}{2 \times \pi \times n \times \eta_g}$$

$$T = \frac{1743,75 \text{ kW} \times 60}{2 \times 3,14 \times 597,5 \text{ rpm} \times 0,95}$$

$$T = \frac{104625}{3564,69} \text{ kNm}$$

$$T = 29,35 \text{ kNm}$$

Menghitung Efisiensi Turbin (η_t)

$$\eta_t = \frac{\text{Daya Mekanik}}{\text{Daya Hidrolik}} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{\frac{2 \times \pi \times n \times T}{60}}{\rho \times g \times q \times H}$$

$$\eta_t = \frac{\frac{2 \times 3,14 \times 597,5 \text{ rpm} \times 29,35 \text{ kNm}}{60}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 4,08 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 60 \text{ m}} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{1835,53 \text{ kW}}{2403,35 \text{ kW}} \times 100\%$$

$$\eta_t = 76,37 \%$$

Menghitung efisiensi system (η_s)

$$\eta_s = \eta_g \times \eta_t$$

$$= 95 \% \times 79,19 \%$$

$$= 75,22 \%$$

Menghitung daya turbin (P_t)

Perhitungan berdasarkan data pada Tabel 4.3. Berikut adalah contoh perhitungan

untuk data bulan Januari :

$$P_t = \rho \times g \times q \times H$$

$$= 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 6,40 \text{ m}^3/\text{s} \times 60 \text{ m}$$

$$= 3767040 \text{ W}$$

$$= 3767,04 \text{ kW}$$



4.3 Tabel Hasil Analisis

4.3.1 Tabel hasil analisis turbin saat beroperasi

Berdasarkan perhitungan, dapat dilihat bahwa bukaan katup pada MIV (*Main Inlet Valve*) berpengaruh terhadap debit, daya keluaran dan torsi. Semakin besar bukaan katup pada MIV maka semakin besar pula debit yang masuk ke dalam turbin begitu pula daya keluaran yang dihasilkan dan torsi. Akan tetapi, bukaan katup pada MIV tidak begitu berpengaruh pada efisiensi turbin karena setiap bukaan akan menghasilkan nilai efisiensi yang hampir sama. Hal ini didapatkan sesuai rumus efisiensi turbin yaitu $\eta_t = \frac{\text{Daya Mekanik}}{\text{Daya Hidrolik}} \times 100\%$, dimana apabila bukaan katup semakin kecil, maka nilai torsi untuk daya mekanik turun dan nilai debit untuk daya hidrolik juga akan turun begitupun sebaliknya. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Herman Siregar (2010) yang menyimpulkan bahwa hubungan antara produksi listrik berbanding lurus dengan tinggi muka air, debit air, dan daya yang digunakan. Semakin tinggi muka air dalam waduk, maka semakin banyak debit air yang dikeluarkan, sehingga semakin besar juga daya dan jumlah produksi listrik yang akan dihasilkan. Akibatnya nilai efisiensi yang dihasilkan untuk setiap bukaan hampir sama. Nilai efisiensi turbin pada bukaan katup 100%, 75%, dan 50% berturut-turut yaitu 79,15%, 77,52% dan 76,38%. Adapun hasil analisis turbin unit 1 dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Hasil analisis turbin unit 1 pada saat beroperasi tanggal 28 Februari sampai 2 Maret 2019

Variasi Bukaan Katup	q (m ³ / s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	P _g (kW)	P _t (kW)	Q (kVar)	P _m (kW)	T (Nm)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T									
100%	7,90	11	95	100	100	599	49,98	3498	4649,94	724	3682,11	46,31	79,19	75,23
	7,92	11	95	100	100	599	49,99	3508,3	4661,71	743,3	3692,98	46,31	79,22	75,26
	7,93	11	95	100	100	600	49,99	3511,89	4667,60	748	3696,73	46,23	79,20	75,24
	7,96	11	95	100	100	600	50,02	3515	4682,92	751	3700	46,23	79,01	75,06
Rata-rata	7,93	11	95	100	100	599,5	50,00	3508,3	4665,54	741,58	3692,94	46,27	79,15	75,20
75%	5,98	11	70	75	75	598,5	49,97	2594	3517,86	679,75	2730,53	34,57	77,62	73,74
	5,99	11	70	75	75	599	49,97	2590	3525,38	688,9	2726,32	34,54	77,33	73,47
	6,00	11	70	75	75	599	50,00	2604	3531,98	688	2741,05	34,54	77,61	73,73
Rata-rata	5,99	11	70	75	75	598,83	49,98	2596	3525,07	685,55	2732,63	34,55	77,52	73,64
50%	4,08	11	50	50	50	597,5	50,01	1743,75	2403,35	467,75	1835,53	23,61	76,37	72,56
	4,09	11	50	50	50	598	49,98	1748,25	2410,25	487,5	1840,26	23,59	76,35	72,53
	4,10	11	50	50	50	598	49,98	1754	2416,14	498	1846,32	23,59	76,42	72,60
Rata-rata	4,09	11	50	50	50	597,83	49,98	1748,67	2409,91	484,42	1840,70	23,59	76,38	72,56

4.3.2 Tabel hasil analisis turbin tahunan

Hasil analisis turbin unit 1 pada PLTM Malea untuk nilai torsi dan efisiensi turbin dibulan Januari 2012 sampai dengan Desember 2018 dapat dilihat pada Tabel 4.16 sampai Tabel 4.22.

Tabel 4.16 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2012

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	6,40	11	95	100	100	600	50	59,13	3527,59	3767,04	3713,25	98,57	93,64
Februari	6,39	11	95	100	100	600	50	59,19	3531,45	3761,15	3717,32	98,83	93,89
Maret	6,34	11	95	100	100	600	50	59,09	3525,09	3731,72	3710,62	99,43	94,46
April	6,36	11	95	100	100	599	50	58,97	3512,36	3743,50	3697,23	98,76	93,83
Mei	6,41	11	95	100	100	600	50	59,41	3544,18	3772,93	3730,71	98,88	93,94
Juni	6,37	11	95	100	100	600	50	59,30	3537,82	3749,38	3724,02	99,32	94,36
Juli	6,40	11	95	100	100	599	50	59,08	3518,73	3767,04	3703,92	98,32	93,41
Agustus	6,49	11	95	100	100	600	50	58,86	3506,00	3820,01	3690,53	96,61	91,78
September	6,47	11	95	100	100	600	50	59,30	3537,82	3808,24	3724,02	97,79	92,90
Oktober	6,46	11	95	100	100	599	50	59,18	3525,09	3802,36	3710,62	97,59	92,71
November	6,38	11	95	100	100	599	50	58,76	3499,64	3755,27	3683,83	98,10	93,19
Desember	6,45	11	95	100	100	599	50	59,67	3554,21	3796,47	3741,27	98,55	93,62
Rata-Rata	6,41	11	95	100	100	599,50	50	59,16	3526,66	3772,93	3712,28	98,40	93,48

Tabel 4.17 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2013

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	6,47	11	95	100	100	600	50	58,30	3478,19	3804,36	3661,26	96,14	91,33
Februari	6,55	11	95	100	100	600	50	58,91	3514,65	3851,40	3699,63	95,96	91,16
Maret	6,54	11	95	100	100	599	50	58,95	3511,25	3845,52	3696,05	96,02	91,21
April	6,52	11	95	100	100	599	50	58,87	3506,38	3833,76	3690,92	96,18	91,37
Mei	6,57	11	95	100	100	600	50	59,09	3525,45	3863,16	3711	95,96	91,17
Juni	6,56	11	95	100	100	599	50	59,09	3519,36	3857,28	3704,59	95,94	91,15
Juli	6,53	11	95	100	100	600	50	58,88	3513,06	3839,64	3697,96	96,21	91,40
Agustus	6,51	11	95	100	100	600	50	58,54	3492,34	3827,88	3676,15	95,94	91,14
September	6,56	11	95	100	100	599	50	59,08	3518,70	3857,28	3703,90	95,93	91,13
Oktober	6,54	11	95	100	100	600	50	58,71	3502,74	3845,52	3687,10	95,78	90,99
November	6,50	11	95	100	100	600	50	58,43	3485,87	3822,00	3669,34	95,91	91,11
Desember	6,63	11	95	100	100	599	50	59,72	3557,07	3898,44	3744,29	95,95	91,15
Rata-Rata	6,54	11	95	100	100	599,58	50	58,88	3510,42	3845,52	3695,18	95,99	91,19

Tabel 4.18 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2014

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	6,79	11	95	100	100	600	50	59,13	3527,53	3992,52	3713,188	92,91	88,26
Februari	6,75	11	95	100	100	600	50	58,83	3509,83	3969,00	3694,56	92,99	88,34
Maret	6,81	11	95	100	100	600	50	58,73	3503,93	4004,28	3688,35	92,02	87,42
April	6,72	11	95	100	100	599	50	58,24	3468,54	3951,36	3651,094	92,31	87,69
Mei	6,84	11	95	100	100	600	50	58,34	3480,34	4021,92	3663,513	91,00	86,45
Juni	6,83	11	95	100	100	600	50	59,13	3527,53	4016,04	3713,188	92,36	87,75
Juli	6,80	11	95	100	100	599	50	58,33	3474,44	3998,40	3657,303	91,38	86,81
Agustus	6,78	11	95	100	100	598	50	58,73	3498,03	3986,64	3682,141	92,27	87,65
September	6,81	11	95	100	100	600	50	59,02	3520,85	4004,28	3706,156	92,46	87,84
Oktober	6,77	11	95	100	100	599	50	58,32	3473,85	3980,76	3656,683	91,77	87,18
November	6,75	11	95	100	100	599	50	59,12	3526,93	3969,00	3712,558	93,44	88,77
Desember	6,76	11	95	100	100	598	50	59,07	3523,89	3974,88	3709,363	93,22	88,56
Rata-Rata	6,78	11	95	100	100	599,67	50	58,75	3502,97	3989,09	3687,34	92,34	87,73

Tabel 4.19 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2015

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	6,88	11	95	100	100	599	50	58,76	3499,80	4045,44	3684,005	90,97	86,42
Februari	6,85	11	95	100	100	600	50	58,26	3475,63	4027,80	3658,554	90,74	86,20
Maret	6,84	11	95	100	100	599	50	58,96	3511,89	4021,92	3696,73	91,82	87,23
April	6,78	11	95	100	100	600	50	57,95	3457,49	3986,64	3639,466	91,20	86,64
Mei	6,80	11	95	100	100	600	50	59,17	3530,03	3998,40	3715,818	92,84	88,20
Juni	6,88	11	95	100	100	600	50	59,07	3523,98	4045,44	3709,455	91,60	87,02
Juli	6,79	11	95	100	100	600	50	58,76	3505,85	3992,52	3690,367	92,34	87,72
Agustus	6,83	11	95	100	100	599	50	58,66	3493,76	4016,04	3677,642	91,48	86,91
September	6,89	11	95	100	100	600	50	58,87	3511,89	4051,32	3696,73	91,15	86,60
Oktober	6,79	11	95	100	100	600	50	58,46	3487,72	3992,52	3671,279	91,86	87,27
November	6,88	11	95	100	100	599	50	58,26	3475,63	4045,44	3658,554	90,34	85,83
Desember	7,10	11	95	100	100	599	50	58,46	3481,67	4174,80	3664,916	87,70	83,31
Rata-Rata	6,86	11	95	100	100	599,67	50	58,64	3496,28	4033,19	3680,29	91,17	86,61

Tabel 4.20 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2016

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	7,27	11	95	100	100	600	50	56,05	3343,90	4274,76	3519,891	82,26	78,14
Februari	7,23	11	95	100	100	600	50	56,65	3379,47	4251,24	3557,337	83,59	79,41
Maret	7,34	11	95	100	100	599	50	56,83	3384,55	4315,92	3562,687	82,46	78,34
April	7,28	11	95	100	100	599	50	57,24	3415,04	4280,64	3594,783	83,89	79,70
Mei	7,28	11	95	100	100	600	50	57,24	3415,04	4280,64	3594,783	83,89	79,70
Juni	7,32	11	95	100	100	600	50	57,07	3404,88	4304,16	3584,084	83,19	79,03
Juli	7,33	11	95	100	100	600	50	56,73	3384,55	4310,04	3562,687	82,58	78,45
Agustus	7,31	11	95	100	100	599	50	56,83	3384,55	4298,28	3562,687	82,80	78,66
September	7,24	11	95	100	100	600	50	56,90	3394,72	4257,12	3573,385	83,85	79,66
Oktober	7,28	11	95	100	100	600	50	57,07	3404,88	4280,64	3584,084	83,64	79,46
November	7,26	11	95	100	100	599	50	57,25	3409,96	4268,88	3589,433	84,00	79,80
Desember	7,35	11	95	100	100	600	50	57,50	3430,29	4321,80	3610,831	83,46	79,29
Rata-Rata	7,29	11	95	100	100	599,75	50	56,95	3395,99	4287,01	3574,72	83,30	79,14

Tabel 4.21 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2017

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	7,38	11	95	100	100	600	50	56,22	3354,30	4339,44	3530,85	81,28	77,22
Februari	7,45	11	95	100	100	600	50	56,06	3344,38	4380,60	3520,4	80,28	76,27
Maret	7,46	11	95	100	100	600	50	56,47	3369,19	4386,48	3546,52	80,77	76,73
April	7,52	11	95	100	100	600	50	56,56	3374,15	4421,76	3551,74	80,24	76,23
Mei	7,52	11	95	100	100	600	50	56,97	3398,96	4421,76	3577,85	80,83	76,79
Juni	7,50	11	95	100	100	600	50	55,89	3334,46	4410,00	3509,95	79,51	75,53
Juli	7,46	11	95	100	100	600	50	56,89	3394,00	4386,48	3572,63	81,36	77,30
Agustus	7,46	11	95	100	100	600	50	57,06	3403,92	4386,48	3583,08	81,60	77,52
September	7,48	11	95	100	100	600	50	56,39	3364,23	4398,24	3541,29	80,43	76,41
Oktober	7,50	11	95	100	100	600	50	56,56	3374,15	4410,00	3551,74	80,46	76,43
November	7,51	11	95	100	100	600	50	57,30	3418,81	4415,88	3598,75	81,41	77,34
Desember	7,55	11	95	100	100	600	50	56,72	3384,07	4439,40	3562,18	80,16	76,15
Rata-Rata	7,48	11	95	100	100	600	50	56,59	3376,22	4399,71	3553,91	80,70	76,66

Tabel 4.22 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 1 pada tahun 2018

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	7,55	11	95	100	100	600	50	56,39	3364,30	4439,40	3541,37	79,69	75,71
Februari	7,54	11	95	100	100	600	50	56,04	3343,51	4433,52	3519,48	79,30	75,34
Maret	7,57	11	95	100	100	600	50	57,00	3400,70	4451,16	3579,69	80,34	76,32
April	7,58	11	95	100	100	600	50	56,48	3369,50	4457,04	3546,85	79,50	75,52
Mei	7,61	11	95	100	100	600	50	56,48	3369,50	4474,68	3546,85	79,18	75,22
Juni	7,62	11	95	100	100	600	50	56,83	3390,30	4480,56	3568,74	79,57	75,59
Juli	7,63	11	95	100	100	600	50	56,91	3395,50	4486,44	3574,21	79,59	75,61
Agustus	7,61	11	95	100	100	600	50	56,74	3385,10	4474,68	3563,27	79,55	75,57
September	7,58	11	95	100	100	600	50	56,13	3348,70	4457,04	3524,95	79,01	75,06
Oktober	7,6	11	95	100	100	600	50	55,61	3317,51	4468,80	3492,11	78,06	74,16
November	7,64	11	95	100	100	600	50	56,30	3359,10	4492,32	3535,9	78,63	74,70
Desember	7,61	11	95	100	100	600	50	57,09	3405,90	4474,68	3585,16	80,04	76,04
Rata-Rata	7,60	11	95	100	100	600	50	56,50	3370,80	4465,86	3548,22	79,37	75,40

Hasil analisis turbin unit 2 pada PLTM Malea untuk nilai torsi dan efisiensi turbin dibulan Januari 2012 sampai dengan Desember 2018 dapat dilihat pada Tabel 4.23 sampai Tabel 4.27.

Tabel 4.23 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2012

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	6,44	11	95	100	100	600	50	58,68	3500,76	3786,72	3685,02	97,31	92,45
Februari	6,43	11	95	100	100	599	50	58,70	3495,97	3780,84	3679,97	97,33	92,47
Maret	6,43	11	95	100	100	599	50	58,71	3496,61	3780,84	3680,65	97,35	92,48
April	6,45	11	95	100	100	600	50	58,83	3510,07	3792,60	3694,81	97,42	92,55
Mei	6,41	11	95	100	100	599	50	58,51	3485,03	3769,08	3668,46	97,33	92,46
Juni	6,45	11	95	100	100	600	50	58,80	3507,90	3792,60	3692,52	97,36	92,49
Juli	6,49	11	95	100	100	600	50	59,20	3526,00	3816,12	3711,58	97,26	92,40
Agustus	6,48	11	95	100	100	600	50	59,17	3530,28	3810,24	3716,09	97,53	92,65
September	6,47	11	95	100	100	600	50	59,30	3537,78	3804,36	3723,98	97,89	92,99
Oktober	6,46	11	95	100	100	599	50	59,20	3525,85	3798,48	3711,42	97,71	92,82
November	6,47	11	95	100	100	600	50	59,19	3531,31	3804,36	3717,17	97,71	92,82
Desember	6,46	11	95	100	100	600	50	58,88	3512,93	3798,48	3697,82	97,35	92,48
Rata-Rata	6,45	11	95	100	100	599,58	50	58,93	3513,37	3794,56	3698,29	97,46	92,59

Tabel 4.24 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2013

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	6,48	11	95	100	100	600	50	57,56	3433,90	3810,24	3614,632	94,87	90,12
Februari	6,51	11	95	100	100	600	50	57,81	3448,88	3827,88	3630,4	94,84	90,10
Maret	6,49	11	95	100	100	599	50	57,73	3438,20	3816,12	3619,158	94,84	90,10
April	6,54	11	95	100	100	600	50	57,91	3454,70	3845,52	3636,526	94,57	89,84
Mei	6,55	11	95	100	100	600	50	57,95	3457,00	3851,40	3638,947	94,48	89,76
Juni	6,58	11	95	100	100	599	50	58,53	3485,90	3869,04	3669,368	94,84	90,10
Juli	6,55	11	95	100	100	600	50	57,96	3458,00	3851,40	3640	94,51	89,79
Agustus	6,56	11	95	100	100	600	50	58,00	3460,30	3857,28	3642,421	94,43	89,71
September	6,59	11	95	100	100	600	50	58,50	3490,20	3874,92	3673,895	94,81	90,07
Oktober	6,56	11	95	100	100	600	50	58,11	3461,30	3857,28	3643,474	94,46	89,73
November	6,53	11	95	100	100	600	50	57,93	3456,40	3839,64	3638,316	94,76	90,02
Desember	6,58	11	95	100	100	599	50	58,53	3486,30	3869,04	3669,789	94,85	90,11
Rata-Rata	6,54	11	95	100	100	599,67	50	58,04	3460,92	3847,48	3643,08	94,69	89,95

Tabel 4.25 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2014

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	6,62	11	95	100	100	600	50	56,57	3374,79	3892,56	3552,406	91,26	86,70
Februari	6,67	11	95	100	100	600	50	56,97	3398,82	3921,96	3577,708	91,22	86,66
Maret	6,68	11	95	100	100	600	50	57,09	3406,04	3927,84	3585,306	91,28	86,72
April	6,71	11	95	100	100	599	50	57,45	3422,01	3945,48	3602,114	91,30	86,73
Mei	6,70	11	95	100	100	600	50	57,26	3416,12	3939,60	3595,916	91,28	86,71
Juni	6,80	11	95	100	100	600	50	58,22	3473,35	3998,40	3656,155	91,44	86,87
Juli	Perbaikan <i>Bearing</i>												
Agustus													
September	6,68	11	95	100	100	600	50	57,07	3404,63	3927,84	3583,823	91,24	86,68
Oktober	6,78	11	95	100	100	599	50	58,04	3456,60	3986,64	3638,53	91,27	86,70
November	6,82	11	95	100	100	599	50	58,39	3477,60	4010,16	3660,634	91,28	86,72
Desember	6,80	11	95	100	100	598	50	58,31	3467,27	3998,40	3649,755	91,28	86,72
Rata-Rata	6,726	11	95	100	100	599,5	50	57,54	3429,72	3954,89	3610,23	91,29	86,72

Tabel 4.26 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2015

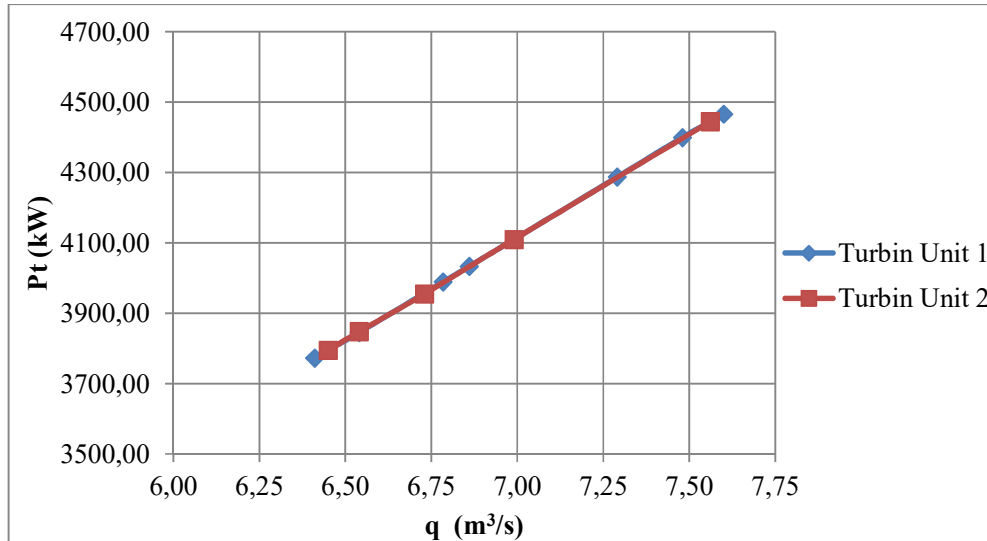
Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	6,93	11	95	100	100	599	50	54,65	3254,99	4074,84	3426,306	84,00	79,80
Februari	6,92	11	95	100	100	600	50	54,39	3244,76	4068,96	3415,535	83,86	79,66
Maret	6,90	11	95	100	100	599	50	54,36	3242,97	4057,20	3413,653	84,05	79,85
April	6,89	11	95	100	100	600	50	54,26	3236,89	4051,32	3407,255	84,02	79,82
Mei	6,89	11	95	100	100	600	50	54,15	3230,69	4051,32	3400,728	83,86	79,66
Juni	6,93	11	95	100	100	600	50	54,57	3255,57	4074,84	3426,914	84,01	79,81
Juli	6,88	11	95	100	100	600	50	54,19	3232,88	4045,44	3403,034	84,03	79,83
Agustus	6,96	11	95	100	100	599	50	54,69	3262,82	4092,48	3434,545	83,84	79,65
September	7,11	11	95	100	100	600	50	55,98	3339,99	4180,68	3515,78	84,01	79,81
Oktober	7,13	11	95	100	100	600	50	56,05	3343,96	4192,44	3519,953	83,87	79,68
November	7,15	11	95	100	100	599	50	56,29	3352,60	4204,20	3529,057	83,86	79,66
Desember	7,18	11	95	100	100	599	50	56,57	3369,54	4221,84	3546,887	83,93	79,73
Rata-Rata	6,99	11	95	100	100	599,75	50	55,01	3280,64	4109,63	3453,3	83,94	79,75

Tabel 4.27 Hasil analisis data pengoperasian turbin unit 2 pada tahun 2016

Waktu pengoperasian	q (m ³ /s)	V (kV)	I _{ph} (A)			n (rpm)	f (Hz)	T (Nm)	P _g (kW)	P _t (kW)	P _m (kW)	η _t (%)	η _s (%)
			R	S	T								
Januari	7,39	11	95	100	100	600	50	53,58	3196,46	4345,32	3364,698	77,43	73,56
Februari	7,45	11	95	100	100	600	50	53,98	3220,38	4380,60	3389,871	77,38	73,51
Maret	7,48	11	95	100	100	599	50	54,22	3229,54	4398,24	3399,515	77,29	73,43
April	7,53	11	95	100	100	599	50	54,61	3252,70	4427,64	3423,894	77,33	73,46
Mei	7,65	11	95	100	100	600	50	55,38	3303,77	4498,20	3477,653	77,31	73,45
Juni	7,56	11	95	100	100	600	50	54,72	3264,38	4445,28	3436,191	77,30	73,43
Juli	7,67	11	95	100	100	600	50	55,52	3312,57	4509,96	3486,916	77,32	73,45
Agustus	7,65	11	95	100	100	599	50	55,38	3304,00	4498,20	3477,897	77,32	73,45
September	7,55	11	95	100	100	600	50	54,74	3265,87	4439,40	3437,757	77,44	73,57
Oktober	7,60	11	95	100	100	600	50	55,05	3284,46	4468,80	3457,323	77,37	73,50
November	7,57	11	95	100	100	599	50	54,76	3266,95	4451,16	3438,895	77,26	73,40
Desember	7,60	11	95	100	100	600	50	55,08	3285,98	4468,80	3458,923	77,40	73,53
Rata-Rata	7,56	11	95	100	100	599,83	50	54,75	3265,59	4444,30	3437,46	77,35	73,48

4.4 Grafik dan Pembahasan

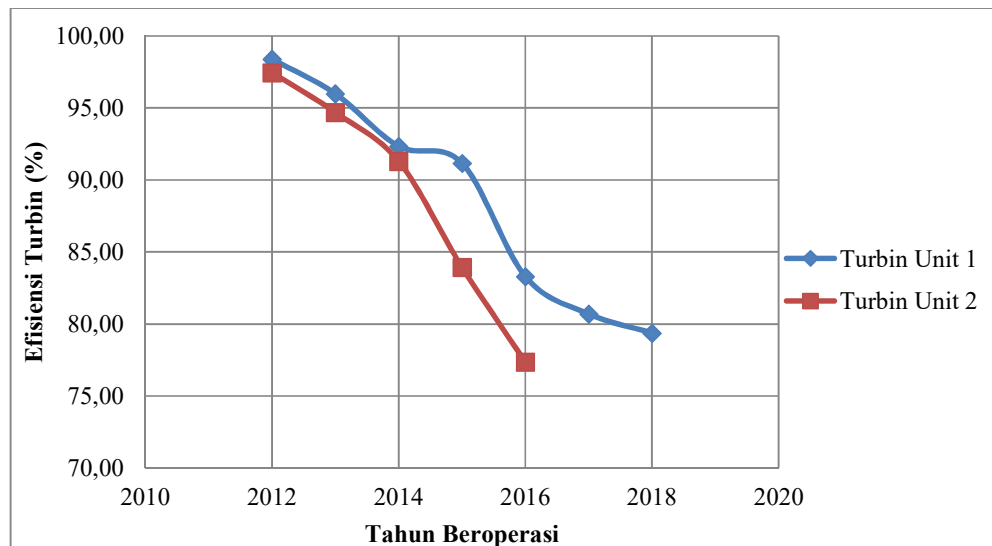
4.4.1 Hubungan antara Debit dengan Daya Turbin



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara debit dengan daya turbin pada PLTM Malea

Berdasarkan gambar 4.1, terlihat hubungan antara debit dengan daya turbin berbanding lurus, dimana semakin besar debit maka semakin besar daya turbin yang dihasilkan, baik pada turbin 1 maupun turbin 2. Hal ini sesuai dengan rumus daya hidrolik yaitu $P_h = \rho \times g \times q \times H$. Adapun pada turbin unit 1 nilai debit terbesar yaitu $7,60 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan daya turbin sebesar $4465,86 \text{ kW}$ dan debit terkecil yaitu $6,41 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan daya turbin sebesar $3772,93 \text{ kW}$. Pada turbin unit 2 nilai debit terbesar yaitu $7,56 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan daya turbin sebesar $4444,30 \text{ kW}$ dan debit terkecil yaitu $6,45 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan daya turbin sebesar $3794,56 \text{ kW}$.

4.4.2 Efisiensi Turbin selama beroperasi (2012 – 2018)



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara tahun beroperasi dengan efisiensi turbin pada PLTM Malea

Berdasarkan gambar 4.2, terlihat hubungan antara tahun beroperasi turbin dengan efisiensi turbin bahwa setiap tahun terjadi penurunan efisiensi turbin baik pada turbin unit 1 dan turbin unit 2. Hal ini diakibatkan karena berkurangnya kinerja dari beberapa komponen pada turbin tersebut. Adapun pada turbin unit 1 nilai efisiensi turbin terbesar yaitu 98,40 % pada tahun 2012 dan efisiensi turbin terkecil yaitu 79,37 % pada tahun 2018. Pada turbin unit 2 nilai efisiensi turbin terbesar yaitu 97,46 % pada tahun 2012 dan efisiensi turbin terkecil yaitu 77,35 % pada tahun 2016. Dimana pada tahun 2017 dan 2018, turbin unit 2 tidak beroperasi lagi dikarenakan *bearing* yang digunakan telah rusak.

4.5 Faktor – faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin

Berdasarkan hasil pengumpulan data dan wawancara dengan pihak PLTM Malea, maka faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin terbagi atas 2 macam, yaitu faktor internal dan faktor eksternal :

4.6.1 Faktor internal

Dalam hal ini faktor internal yang dimaksud adalah pengaruh efisiensi dari dalam unit yaitu :

- Faktor *Bearing*

Dapat dilihat pada Tabel 4.12 Data pengoperasian turbin unit 2 pada bulan Juli sampai agustus 2014 terjadi kerusakan *bearing* akibat gesekan antara poros dengan *inner ring* pada *bearing* yang mengakibatkan keretakan pada sisi *inner ring*.



Gambar 4.3 *Bearing Housing* Pada Turbin Unit 2



Gambar 4.4 *Inner Ring Bearing* Pada *Shaft* Turbin Unit 2

Dari gambar di atas terlihat bahwa terjadi keretakan pada sisi *inner ring*. Hal ini sangat berpengaruh terhadap daya mekanik yang dihasilkan oleh poros turbin dan tentunya berpengaruh terhadap efisiensi turbin itu sendiri. Terlebih dalam proses perbaikannya pihak PLTM Malea hanya melakukan langkah penambalan dengan cara mengelas bagian *inner ring* yang retak.

- Faktor *Blade* Turbin

Dapat dilihat pada data pengoperasian turbin unit 1 dan 2 setiap tahunnya mengalami kenaikan debit untuk mencapai daya yang sama, hal ini berarti terjadi penipisan pada sisi *blade* turbin yang diakibatkan oleh tumbukan air selama turbin beroperasi.

- Faktor *Maintenance*

Dalam proses perawatan dan perbaikannya pihak *Maintenance* PLTM Malea tidak berpedoman pada *Standard Operational Prosedure* (SOP) atau tidak melakukan perawatan dan perbaikan secara periodik. Namun tergantung pada kondisi dari unit itu sendiri. Hal ini menjadi faktor utama penyebab menurunnya efisiensi sistem secara keseluruhan.

4.6.2 Faktor Eksternal

Dalam hal ini faktor eksternal yang dimaksud adalah pengaruh efisiensi dari luar unit yaitu :

- Faktor Sedimentasi

Data terakhir yang kami peroleh pada bulan November 2018 mengenai tinggi sedimentasi yang berada pada sisi *waterway* mencapai 57 cm. Hal ini berpengaruh terhadap jumlah debit yang masuk ke dalam turbin dan akan berpengaruh terhadap daya hidrolik yang dihasilkan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

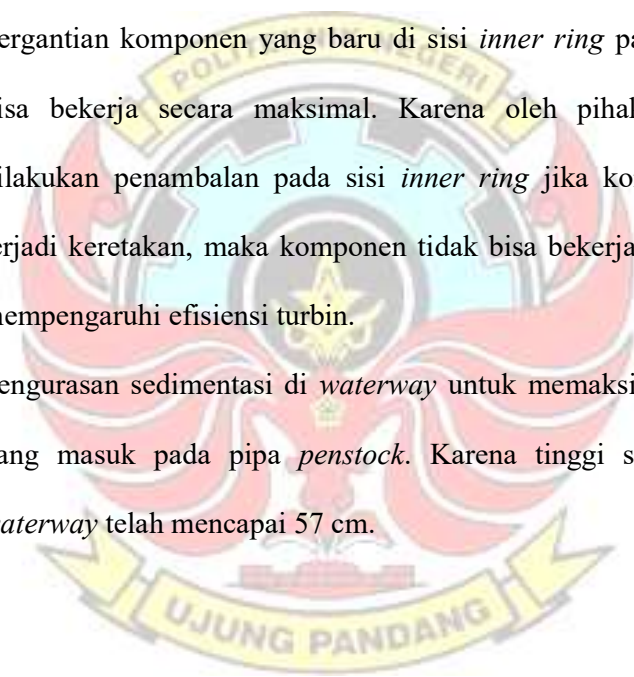
Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan :

1. Nilai efisiensi turbin unit 1 pada Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro (PLTM) Malea dari hasil pengukuran pada bukaan katup 100%, 75%, dan 50% berturut-turut yaitu 79,15%, 77,52% dan 76,38%. Nilai efisiensi setiap tahun terjadi penurunan baik pada turbin unit 1 dan turbin unit 2. Hal ini diakibatkan karena berkurangnya kinerja dari beberapa komponen pada turbin tersebut. Adapun pada turbin unit 1 nilai efisiensi turbin terbesar pada tahun 2012 yaitu 98,40 %, nilai efisiensi turbin pada tahun 2016 yaitu 83,30 % dan efisiensi turbin terkecil pada tahun 2018 yaitu 79,37 %. Pada turbin unit 2 nilai efisiensi turbin terbesar pada tahun 2012 yaitu 97,46 % dan efisiensi turbin terkecil pada tahun 2016 yaitu 77,35 %.
2. Faktor – faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin terbagi menjadi dua yaitu faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal meliputi faktor *bearing*, faktor *blade* turbin, dan faktor *maintenance*. Adapun faktor eksternal meliputi faktor sedimentasi.

5.2 Saran

Adanya penurunan efisiensi turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro (PLTM) Malea Kabupaten Tana Toraja, maka ada beberapa saran yang mungkin dapat dilaksanakan diantaranya:

1. Pembuatan jadwal untuk melakukan perawatan dan perbaikan secara periodik. Karena kurangnya perhatian dari pihak maintenance PLTM Malea terhadap komponen-komponen pembangkitan.
2. Pergantian komponen yang baru di sisi *inner ring* pada *bearing* agar bisa bekerja secara maksimal. Karena oleh pihak PLTM Malea dilakukan penambalan pada sisi *inner ring* jika komponen tersebut terjadi keretakan, maka komponen tidak bisa bekerja secara baik dan mempengaruhi efisiensi turbin.
3. Pengurasan sedimentasi di *waterway* untuk memaksimalkan debit air yang masuk pada pipa *penstock*. Karena tinggi sedimentasi pada *waterway* telah mencapai 57 cm.



DAFTAR PUSTAKA

- Azis, Prayudi dan Syahril. 2016. *Analisa Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Desa Tombolo Pao Kabupaten Gowa*. Laporan Tugas Akhir. Makassar: Program Studi D-IV Pembangkit Energi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Date A. Dan Akbarzadeh A. 2005. Design Analysis and Investigation of a low head simple reaction water turbine. 43rd ANZSES conference. New Zealand (Online, diakses 28 Januari 2019).
- Dietzel, Fritz, Dakso Sriyono. *Turbin Pompa dan Kompresor*, Erlangga, Jakarta, 1992.
- Ferdianto, Aditya. 2017. Kajian Analisis Efisiensi Keseluruhan Turbin Air Francis pada Tahun 2011 di PLTA Ir. H Djuanda Purwakarta. *Journal Department of Mechanical Engineering*. Yogyakarta: Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Gale, J. dan Kaya, Y. 2003. “Greenhouse Gas Control Technologies-6th International Conference”. *Journal National Economic Development Authority (NEDA)*, NEDA sa Pasig Bldg, Ortigas, Pasig City, Philippines.
- Hasriani, dkk. 2017. “Penerapan Media Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) terhadap Keterampilan Siswa”. *Jurnal Pendidikan Fisika*, Vol. 5 No.2. (Online, diakses 28 Januari 2019).
- Khurmi. 1997. *Hydraulic Machine*, hlm. 601-700. New Delhi: S chand and compani Ltd. (Online, diakses tanggal 28 Januari 2019).
- Muliawan, Arief dan Yani, A. 2016. “Analisis Daya dan Efisiensi Turbin Air Kinetis Akibat Perubahan Putaran Runner”. *Journal of Sainstek*, (Online) 8(1):19,(https://www.academia.edu/ANALISIS_DAYA_DAN_EFISIENS_I_TURBIN_AIR_KINETIS_AKIBAT_PERUBAHAN_PUTARAN_RUNNER), diakses 28 Januari 2019).
- Penche, Celso. 1998. *Layman's Handbook On How To Develop A Small Hydro Site*, second edition hlm. 170 - 200. Belgica: Directorate-General for Energy by European Small Hydropower Association (ESHA).

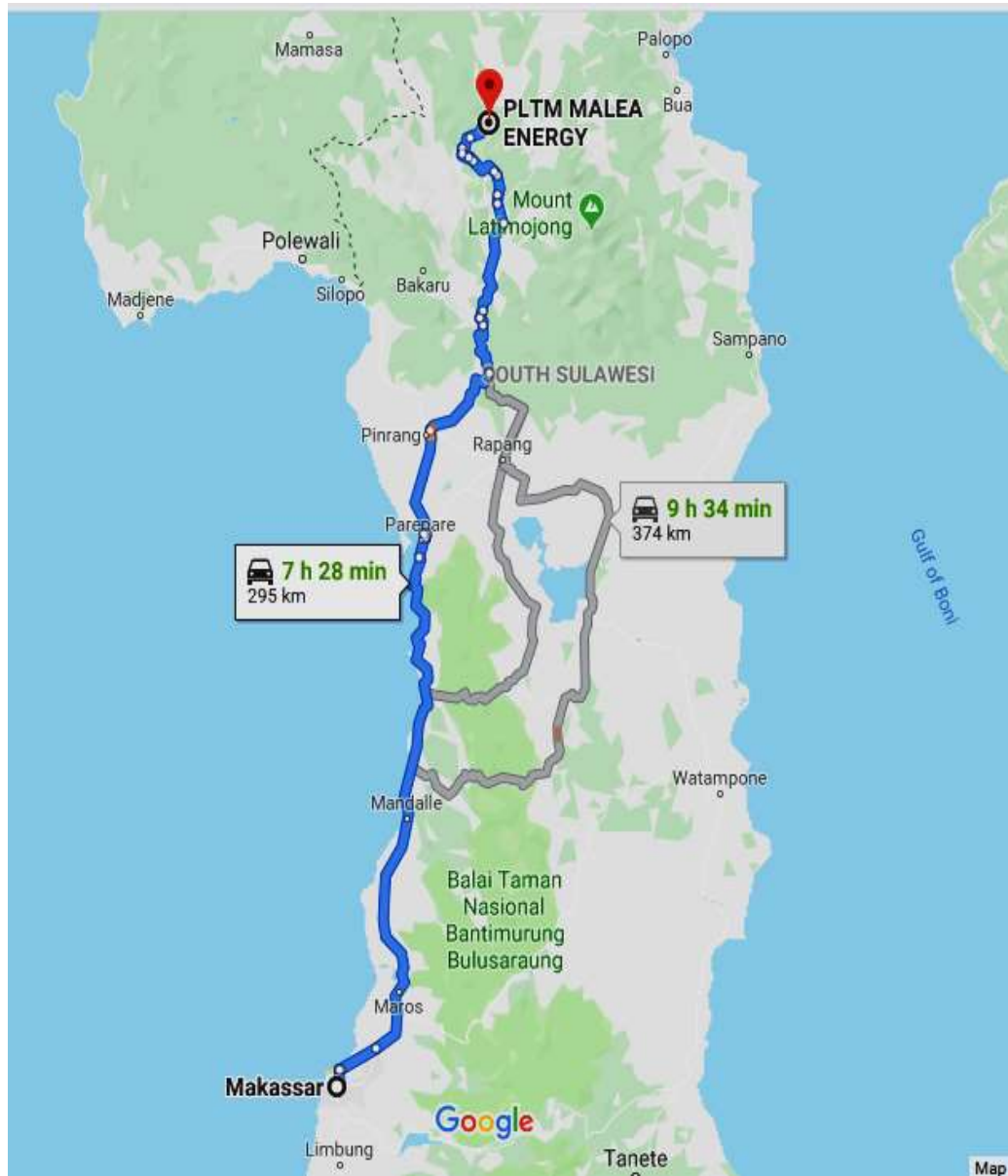
- Pratama, Aditya Yoga. 2016. Kajian Eksperimental Kinerja Blower Angin Sentrifugal yang Digunakan Sebagai Turbin Air. Laporan Tugas Akhir. Yogyakarta: Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Ridwan. 2014. Perancangan Model Air Aliran Silang (*Cross Flow Turbine*) dengan *Head* 2 meter dan Debit 0,03 m³/s. Jurnal Teknik Mesin, Vol. 03 No. 3. Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.
- Salim, Saldi. 2009. Pengembangan *Prototype* Pembangkit Listrik *Minihydro* dengan Efisiensi Tinggi. Laporan Penelitian Strategis Nasional. Medan: Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan.
- Saragih, Antonius Binsar. 2014. Analisis Kehilangan Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Dusun Sajingan Desa Kaliau Kecamatan Sajingan Besar Kabupaten Sambas. Laporan Tugas Akhir. Pontianak: Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Pontianak.
- Siregar, Herman. 2010. Analisis Hubungan Antara Daya dan Produksi Listrik di PLTA Ir. H. Djuanda dengan Menggunakan Metode Regresi. Laporan Tugas Akhir. Bogor: Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor.



LAMPIRAN

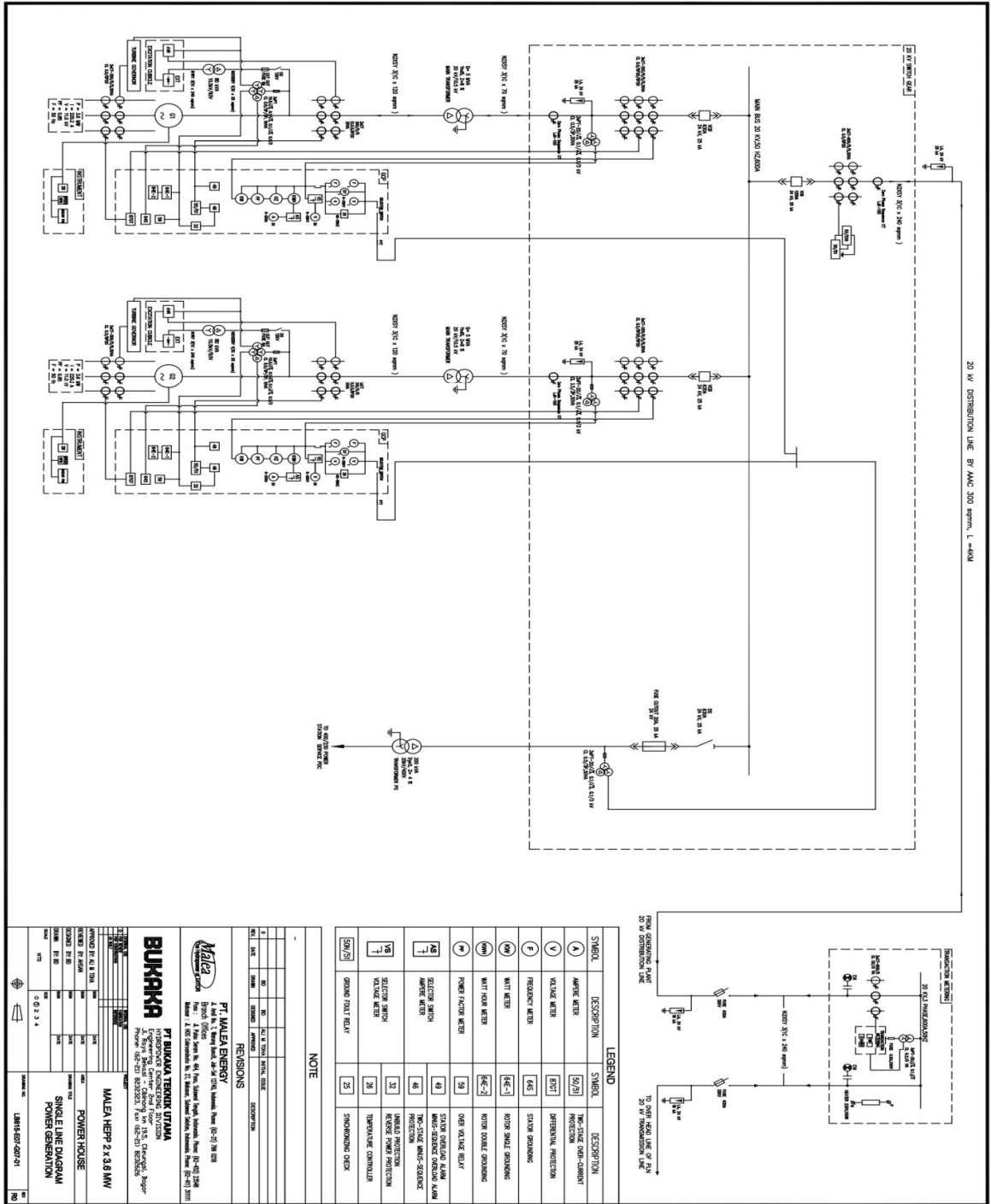


Lampiran 1. Peta jarak lokasi dari Ibu Kota Provinsi



Lampiran 2. Single Line Diagram PLTM Malea

Prepared by Budi December 2010 LB615-E07-G07-01.dwg



LEGEND

SYMBOL	DESCRIPTION	SYMBOL	DESCRIPTION
(A)	AMMETER METER	(S2/S1)	THW-SHAKE OVER-CURRENT PROTECTION
(V)	VOLTAJE METER	(DIF)	DIFERENSIAL PROTECTION
(F)	FREQUENCY METER	(S)	STATION DOWNING
(W)	WATT METER	(R)	REKOR SHUNT DOWNING
(PF)	WATT HOUR METER	(R-2)	REKOR DOUBLE DOWNING
(P)	POWER FACTOR METER	(R-1)	REKOR SINGLE DOWNING
(S)	SELECTOR SWITCH	(R)	OVER VOLTAGE RELAY
(M)	AMPERE METER	(A)	STATUS OVERLOAD ALARM
(M)	AMPERE METER	(S)	THW-SHAKE SHUNT-SOURCE PROTECTION
(M)	AMPERE METER	(S)	REVERSE POWER PROTECTION
(M)	AMPERE METER	(S)	TEMPERATURE CONTROLLER
(M)	AMPERE METER	(S)	SHOCKING CHECK

NOTE

1. ...
2. ...
3. ...
4. ...
5. ...
6. ...
7. ...
8. ...
9. ...
10. ...
11. ...
12. ...
13. ...
14. ...
15. ...
16. ...
17. ...
18. ...
19. ...
20. ...
21. ...
22. ...
23. ...
24. ...
25. ...
26. ...
27. ...
28. ...
29. ...
30. ...
31. ...
32. ...
33. ...
34. ...
35. ...
36. ...
37. ...
38. ...
39. ...
40. ...
41. ...
42. ...
43. ...
44. ...
45. ...
46. ...
47. ...
48. ...
49. ...
50. ...
51. ...
52. ...
53. ...
54. ...
55. ...
56. ...
57. ...
58. ...
59. ...
60. ...
61. ...
62. ...
63. ...
64. ...
65. ...
66. ...
67. ...
68. ...
69. ...
70. ...
71. ...
72. ...
73. ...
74. ...
75. ...
76. ...
77. ...
78. ...
79. ...
80. ...
81. ...
82. ...
83. ...
84. ...
85. ...
86. ...
87. ...
88. ...
89. ...
90. ...
91. ...
92. ...
93. ...
94. ...
95. ...
96. ...
97. ...
98. ...
99. ...
100. ...

REVISIONS

NO	DATE	REVISOR	REVISION
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			
60			
61			
62			
63			
64			
65			
66			
67			
68			
69			
70			
71			
72			
73			
74			
75			
76			
77			
78			
79			
80			
81			
82			
83			
84			
85			
86			
87			
88			
89			
90			
91			
92			
93			
94			
95			
96			
97			
98			
99			
100			

PT MALEA ENERGY
 1. Blok No. 1, Bangunan No. 04, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 2. Blok No. 2, Bangunan No. 05, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 3. Blok No. 3, Bangunan No. 06, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 4. Blok No. 4, Bangunan No. 07, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 5. Blok No. 5, Bangunan No. 08, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 6. Blok No. 6, Bangunan No. 09, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 7. Blok No. 7, Bangunan No. 10, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 8. Blok No. 8, Bangunan No. 11, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 9. Blok No. 9, Bangunan No. 12, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 10. Blok No. 10, Bangunan No. 13, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia

PT BUKARA TEKNIK UTAMA
 1. Blok No. 1, Bangunan No. 01, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 2. Blok No. 2, Bangunan No. 02, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 3. Blok No. 3, Bangunan No. 03, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 4. Blok No. 4, Bangunan No. 04, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 5. Blok No. 5, Bangunan No. 05, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 6. Blok No. 6, Bangunan No. 06, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 7. Blok No. 7, Bangunan No. 07, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 8. Blok No. 8, Bangunan No. 08, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 9. Blok No. 9, Bangunan No. 09, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 10. Blok No. 10, Bangunan No. 10, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia

MALEA HEPP 2 x 3.8 MW
 POWER HOUSE
 SINGLE LINE DIAGRAM
 POWER GENERATION

1. Blok No. 1, Bangunan No. 01, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 2. Blok No. 2, Bangunan No. 02, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 3. Blok No. 3, Bangunan No. 03, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 4. Blok No. 4, Bangunan No. 04, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 5. Blok No. 5, Bangunan No. 05, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 6. Blok No. 6, Bangunan No. 06, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 7. Blok No. 7, Bangunan No. 07, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 8. Blok No. 8, Bangunan No. 08, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 9. Blok No. 9, Bangunan No. 09, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia
 10. Blok No. 10, Bangunan No. 10, Jl. Raya, Desa Tugu, Kecamatan, Kabupaten, Provinsi, Indonesia

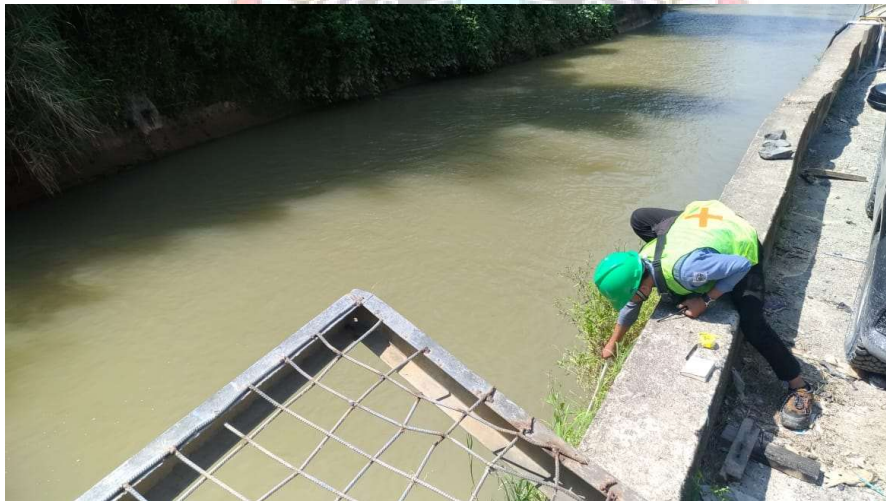
Lampiran 3. Control Panel pada PLTM Malca

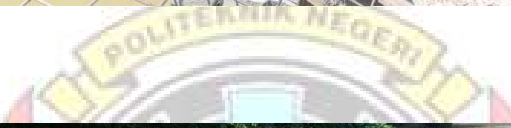


Lampiran 4. Pengambilan data











Standard Operation Procedure

Pengoperasian PLTM Malea Energy

Peralatan kerja:

1. FM radio transceiver
2. Log sheet
3. Alat tulis
4. Senter/Lampu Emergency

Perlengkapan K3:

1. Pakaian Kerja
2. Sepatu proyek (harus dalam keadaan bersih)
3. Helm pengaman
4. Ear Plug

Proses Kerja :

1. Pemeriksaan sebelum keadaan OFF-Standby
2. Urutan keadaan Off- Standby
3. Urutan keadaan Standby-beroperasi
4. Urutan Sinkronisasi dan Penyambungan ke PLN
5. Pengisian logsheet
6. Pemeriksaan Tekanan pada Pipa cooling water, spiral case, Hidrolik governor dan brake
7. Urutan keadaan tersambung ke PLN – beroperasi
8. Urutan keadaan beroperasi – standby
9. Urutan keadaan Standby – off
10. Laporan Pengoperasian
11. Lampiran
 - SLD PLTM Malea
 - Lay out PLTM Malea

Bagian – Bagian Penting PLTM Malea :

1. Weir



Top level : 727,7 mdpl
Structure : Stone masonry
Type of Gate : Sliding gate
Dimension gate : 2 x 3 m (satu lubang bukaan)

- pastikan pintu Weir terbuka agar debit air yang masuk ke water way cukup.
- pastikan tidak ada sampah dari sungai yang masuk, jika ada, bersihkan.
- Jika terjadi kelebihan debit air yang ditandai oleh penuhnya waterway dan headpond maka pintu Weir dapat ditutup dan flushing gate dibuka, dan dikembalikan ke keadaan awal jika debit air sudah normal.

2.Intake



- Debit $28.88 \text{ m}^3/\text{s}$
- Lebar bukaan 2.5 m
- Tinggi bukaan 2.8 m

3.Waterway



Type Shape

Square:

Dimension : $150 \times 5.5 \times 3.3 \text{ m}$

Velocity : $3.9 \text{ m}^3/\text{s}$

Trapezium:

Dimension : $1350 \times 10.5 \times 5 \text{ m}$

Velocity : $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$

Debit : $28.88 \text{ m}^3/\text{s}$

Disepanjang waterway terdapat 3 buah flushing gate

- pastikan ketinggian dan debit waterway normal, jika ketinggian dan debit air berlebih maka buka semua pintu flushing gate. Jika masih berlebih maka tutup pintu intake.

- Pastikan tidak ada sampah disepanjang waterway, jika ada, bersihkan.

4.Headpond



Top level	: 723.191 m
Elevasi muka air normal	: 721.898 m
Elevasi muka air minimum	: 721.128 m
Dimensi	: 34 x 10.5 x 5 m
Dimensi bukaan inlet	: 1.5 x 1.5 m (2 bukaan) 2.2 x 2.2 m (1 bukaan)

- pastikan ketinggian air di headpond cukup, jika kurang buka pintu intake dan tutup semua flushing gate disepanjang waterway dan pada headpond sendiri. Jika berlebih, maka buka pintu flushing gate pada headpond dan sepanjang waterway, jika masih berlebih tutup pintu intake sampai ketinggian yang diinginkan.
- Pastikan tidak ada sampah pada headpond, jika ada bersihkan.



5. Penstock



Type : Steel pipe
Diameter : 2 x 1.5 m
 1 x 2.2 m
Quantity : 3 unit
Panjang : 300 m
Head : 60 m
Tebal pipa : - 8, 12, 14, 16 mm (dia. 1.5 m)

- 12, 14, 18, 22 mm (dia 2.2 m)
- cek kebocoran pada penstock, jika ada hubungi supervisor untuk dilakukan pengecekan ulang dan perbaikan.

6. Generator Diesel



Power : 100 KW

Freq : 50 Hz

Tegangan : 380 Hz

Bahan bakar : Solar

- pastikan bahan bakar dan air radiator cukup. 7. Main

distribution Panel



- Pastikan semua MCB dalam keadaan baik dan panel dalam keadaan bersih
- Selalu mengunci ruangan

8. Panel 10,5 KV Switchgear



Terdiri dari :

- NP-1 (outgoing to excitation transformer)
 - NP-2 (incoming from generator)
 - NP-3 (outgoing to main transformer)
 - NP-4 (incoming from netral generator)
- pastikan panel 10,5 KV Switchgear dalam keadaan bersih

9. Generator Control Panel



PT. Malea Energy
The hydropower of tator

1. Model CNC-LCU UNIT-1
 2. Serial Number 201105001
 3. Working voltage AC 220V / DC 110 V
 4. Date of manufacture 2011-05
- pastikan panel GCP dalam keadaan bersih 10.

Excitation Panel



1. Model WJL-65Y
 2. Output voltage 90 V
 3. Output current 314 A
 4. Operating voltage DC 220 V
 5. With generators SFW-J3600-10/1730
 6. Freq 50 Hz
 7. Weight 350 Kg
 8. Standard no 6B10585.89
 9. Serial number CH2010-2-10 A
 10. Date 3-2010
- pastikan panel excitation dalam keadaan bersih

11. Temperature and Brake panel



1. Model CWZD-01B
2. Input power 220 V
3. Freq 50 Hz
4. Operating Voltage DC 220 V
5. Max Pressure 1 Mpa
6. Rated Pressure 0.8 Mpa
7. Weight 200 Kg
8. Standard number JB 4159-85
9. Serial Number CH2010-2-100
10. Date 2010-3

- pastikan panel ini dalam keadaan bersih

12. Panel 20,5 KV Switchgear



Terdiri dari :

- NP-1 (Incoming from main transformer unit 1)
 - NP-2 (Incoming from main transformer unit 2)
 - NP-3 (Outgoing to auxiliary transformer)
 - NP-4 (Line distribution Panel)
- pastikan panel 20,5 KV Switchgear dalam keadaan bersih

13. Lighting and receptacle Panel



- Pastikan panel lighting and receptacle panel dalam keadaan bersih

14. panel 220 VDC



- Pastikan panel 220 VDC dalam keadaan bersih dan berfungsi dengan baik

15. Panel 110 VDC



- Pastikan panel 110 VDC dalam keadaan bersih

16. Governor



- Cek kondisi panel governor
- Pastikan tegangan tidak melebihi 260 volt

17. Panel Main Inlet Valve



- pastikan panel MIV dalam keadaan bersih dan berfungsi dengan baik

18. Panel ByPass Valve



- pastikan panel bypass valve dalam keadaan bersih dan berfungsi dengan baik

19. Headpond panel



20. Turbin



Type Franchise	
Rated Power	: 3777 KW
max head	: 61 m
rated head	: 60 m
rated discharge	: 6.96 m ³ /s
rated speed	: 600 r/min
runaway speed	: 1152 r/min
weight	: 21 t

- Cek kondisi turbin
- Cek suhu pada bearing
- Penggantian oli bearing tiap 6 bulan sekali
- Pastikan cooling water mengalir pada bearing

21. ByPass



- cek kondisi bypass
- cek katup bypass dapat menutup dan membuka dengan sempurna

22. Main Inlet Valve



- cek kondisi MIV.
- cek katup MIV dapat menutup dan membuka dengan sempurna

23. Generator



Seri : SFW-3600-10/1730
Phase : 3 phase
Rated power : 3.6 MW
Rated voltage : 10.5 Kv
Rated current : 233 A
Rated freq : 50 Hz
Generator eff. : 95%
Power factor : 0.85

- cek suhu bearing
- cek kondisi generator
- Tiap 6 bulan dilakukan penggantian oli bearing
- Tiap bulan dilakukan pembersihan pipa cooling water pada bearing
- pastikan cooling water mengalir ke bearing

24. Main Transformer



Rated Power 5000 KVA
Rated Voltage $20000 \pm 2 \times 2.5\%$ / 6500 V
Insulation level LI 125 AC 50
Connection Group YNd5
Rated freq 50 Hz
Phase 3
Active part weight 2491 Kg
Oil Weight 11581 Kg
Total 11581 Kg
Tapping Position

- HV 20000 V and 144.3 A
- LV 10500 V and 278 A

- cek sistem pendingin apakah bekerja atau tidak
- cek suhu transformer pada saat trafo beroperasi
- pastikan pagar transformer dalam keadaan bersih

25. auxiliary transformer



Rated Power 200 KVA

Rated voltage $20000 \pm 2 \times 2.5 \% / 400 \text{ V}$

Connection Group Dyn5

Total weight 1320 Kg

Tapping Position :

- HV : 20000 V and 5.77 A
 - LV : 400 v and 2887 A
-
- cek system pendingin apakah bekerja atau tidak
 - cek suhu transformer pada saat trafo beroperasi
 - pastikan pagar transformer dalam keadaan bersih

26. excitation Transformer



PT. Malea Energy
The hydropower of tator

Type ZLC-80/10.5
Rated power 80 KVA
phase 3
freq 50 Hz
polarity Yd-11
Rated voltage : HV 10500 v – LV 175 v
Rated currents : HV 4.4 A – LV 263.94 A
imp. 4.6 % 75⁰ C
weight 710 Kg

- cek kondisi transformer

27. compressor



- cek kondisi compressor

28. Jaringan Distribusi



- JTM (jaringan Tegangan Menengah) panjang = ± 12 Km
- JTM dengan tiang beton 11 m 200 daN = ± 4 Km
- SUTM (Jaringan saluran udara tegangan Menengah) digunakan penghantar $3 \times 240 \text{ mm}^2$ HIC/A3CS

29. Interkoneksi dengan PLN



Satu set cubicle yang terdiri dari :

- Proteksi
- Metering
- Sinkronisasi

Pengoperasian

Pada PLTM malea terdapat empat keadaan untuk menggambarkan status dari system, yaitu keadaan off, standby, beroperasi dan keadaan sinkron ke pln

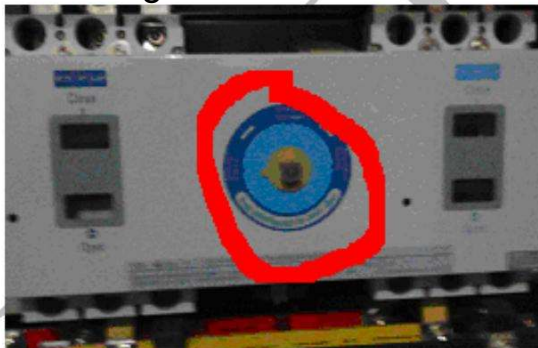
1. keadaan off, yaitu keadaan dimana pintu masuk air ke penstock pada headpond tertutup. Katup bypass, miv, katup cooling water dalam keadaan tertutup. Panel gcp, eksitasi, temperature brake, governor dan switchgear dalam keadaan mati.
2. keadaan standby, yaitu keadaan dimana, debit air di waterway cukup dan ketinggian headpond 723 dpl, panel gcp, eksitasi, temperature brake, governor dan switchgear dalam keadaan menyala. Katup cooling water dan bypass dalam keadaan terbuka, dan memiliki tekanan stabil 0.2-0.25 MPa pada katup cooling water dan 0.6 MPa pada spiral case. Tuas hidrolik pada governor telah diturunkan dan tekanannya 16 Mpa.
3. keadaan beroperasi, yaitu keadaan dimana generator telah menghasilkan tegangan dan digunakan untuk konsumsi sendiri.
4. keadaan sinkron ke pln, yaitu keadaan dimana daya sudah siap dikirimkan ke pln

Keadaan off – standby

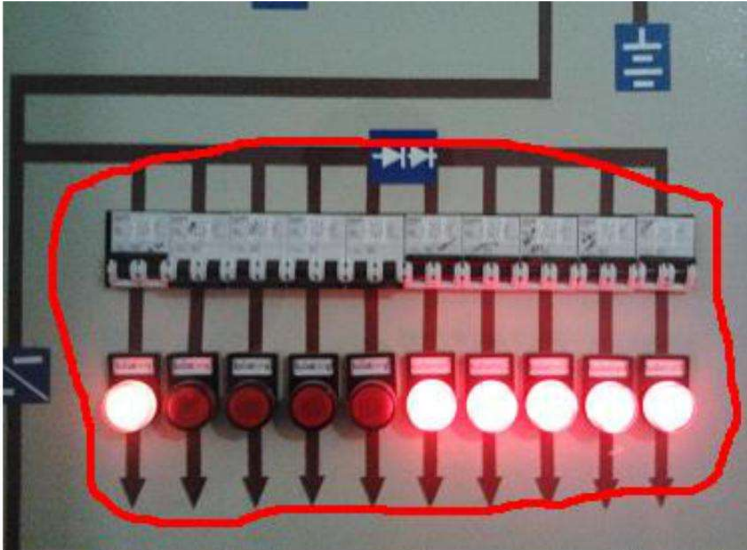
1. nyalakan Generator diesel
2. nyalakan semua panel. pada Main distribution panel NP 1 naikkan mcb untuk menyalakan panel NP 2, NP 3 dan NP 4
3. pada panel power distribution NP 1, cek settingan change over switch pada posisi auto atau manual



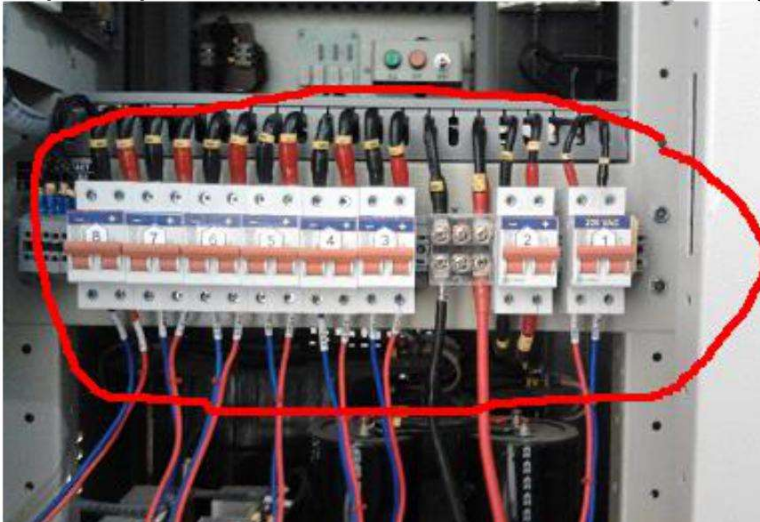
(untuk manual pergantian sumber dilakukan dengan memutar Change over switch ke arah kiri/kanan)



4. pada NP 2 naikkan semua MCB yang digunakan
5. pada NP 3 naikkan semua MCB yang digunakan
6. pada NP 4 naikkan semua MCB yang digunakan
7. pada panel 110 VDC naikkan MCB 1 QF, 2 QF, 3 QF, 8 QF, 9 QF, 10 QF, 11 QF, dan 12 QF



8. pada panel 220 VDC naikan semua MCB yang digunakan



9. pastikan semua display pada governor, gcp, excitation, dan temperature brake panel dalam keadaan menyala.



10. nyalakan ventilator generator, dengan cara menekan tombol hijau pada panel disamping ventilator generator



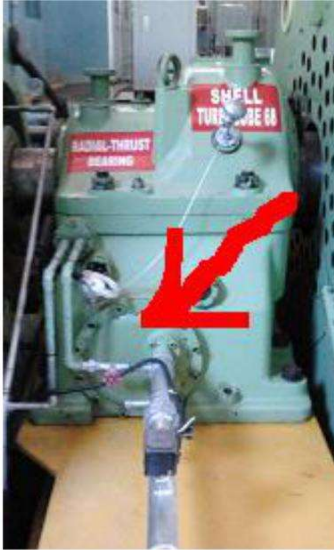
11. pastikan compressor harus dalam keadaan beroperasi dengan cara menaikkan MCB MIV pada unit 2 dan menekan tombol berwarna hijau pada panel compressor. lakukan pengetesan brake secara manual (lihat bagian keadaan beroperasi – standby (manual) poin 4)



12. pada pipa cooling water. buka dua buah katup pada pipa besar dan pipa pembuangan.



13. Tutup katup pada pipa kecil yang menuju ke radial guide bearing dan radial thurst bearing



14. Buka valve pipa cooling water



15. nyalakan pompa cooling water



16. biarkan beberapa saat (1-2 menit)

17. buka kedua katup cooling water pada pipa radial guide bearing dan pipa radial thurst bearing. atur kembali tekanan pada pipa besar cooling water tetap pada kisaran 0.2-0.25 MPa dengan cara menutup sedikit demi sedikit katup pada pipa besar cooling water

18. masukan oli pertamina pada radial guide bearing dan radial thurst bearing (pada unit 2 menggunakan oli shell)

19. buka katup bypass pada bypass panel dengan cara menekan tombol merah



20. buka katup pada pipa pembuangan spiral case (berada disamping spiralcase) sampai air keluar (sebelumnya udara akan keluar) kemudian tutup.



21. cek tekanan spiral case 0.5 - 0.6 MPa



22. turunkan tuas hidrolik governor pada bagian samping bawah panel governor dan cek tekanan hidroliknya 15 - 16 MPa



23. tekan tombol automatic atau manual pada governor tergantung jenis pengoperasian yang diinginkan



Keadaan standby – beroperasi (manual)

1. buka main inlet valve dengan cara menekan tombol merah pada panel MIV, tunggu hingga MIV terbuka sempurna (pada indicator menunjukkan 90 derajat)



2. tekan tombol start pada governor selama 3 detik



3. tekan tombol increase , cek putaran sampai 50 Hz sedangkan regulation dan opening indikator tetap pada kisaran 5



4. pada display excitation panel tekan reset, kemudian tekan start.(panel berada di ruang gcp)

5. naikkan tegangan eksitasi dengan cara menekan tombol anak panah ke atas beberapa kali sampai tegangan 10.5 KV ketika tegangan masih pada kisaran 9 KV



6. cek indicator tegangan pada 10.5 KV , arus eksitasi tidak melebihi 298 ampere dan tegangan eksitasi tidak melebihi 93 volt



7. jika lampu indicator pada panel eksitasi berwarna merah ulangi langkah 4 sampai 6.

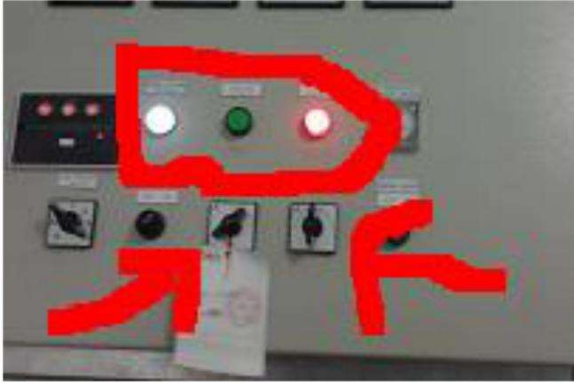


8. pada np 1, 20.5 KV switchgear, switch harus dalam keadaan manual



9. putar switch ke posisi Local dan closed (awalnya lampu hijau menyala) , lampu indicator merah akan menyala sedangkan lampu indicator hijau mati (np 2 , untuk unit 2)

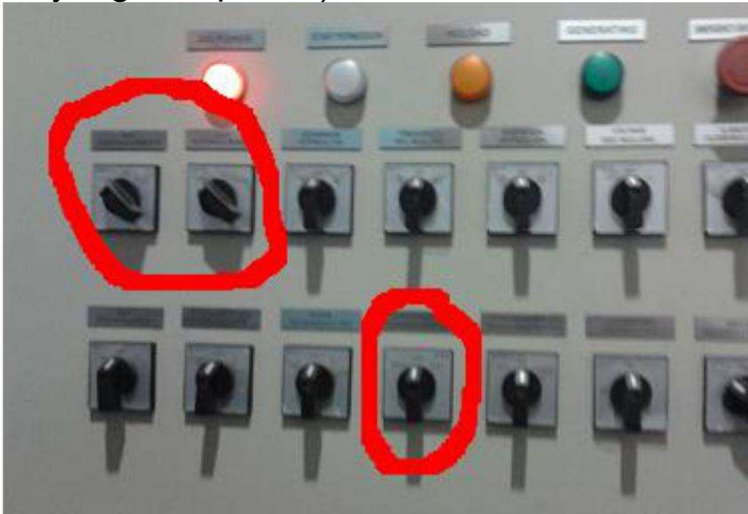
PT. Malea Energy
The hydropower of tator



RAHASIA

keadaan standby-beroperasi (automatic melalui gcp)

1. putar switch unit ke kiri (local) dan (automatic), putar switch shynchronization ke kiri (manual, jika belum ada unit yang beroperasi) atau ke kanan (automatic , jika sudah ada unit yang beroperasi)



2. pastikan lampu indicator start permission (warna putih) dalam keadaan menyala , jika tidak pada display pilih fault record kemudian pilih fault reset



3. Governor harus dalam keadaan automatic (tekan tombol hijau pada panel governor)



4. jika lampu indicator berwarna putih sudah menyala, pilot start unit pada display kemudian putar switch unit ke kanan (start)



5. pada kondisi switch sinchronisation automatic, cb akan otomatis ter-closed, jika dipilih manual, maka putar switch unit ke manual dan switch vcb ke manual lalu putar switch vcb disebelahnya kea rah kanan (on)



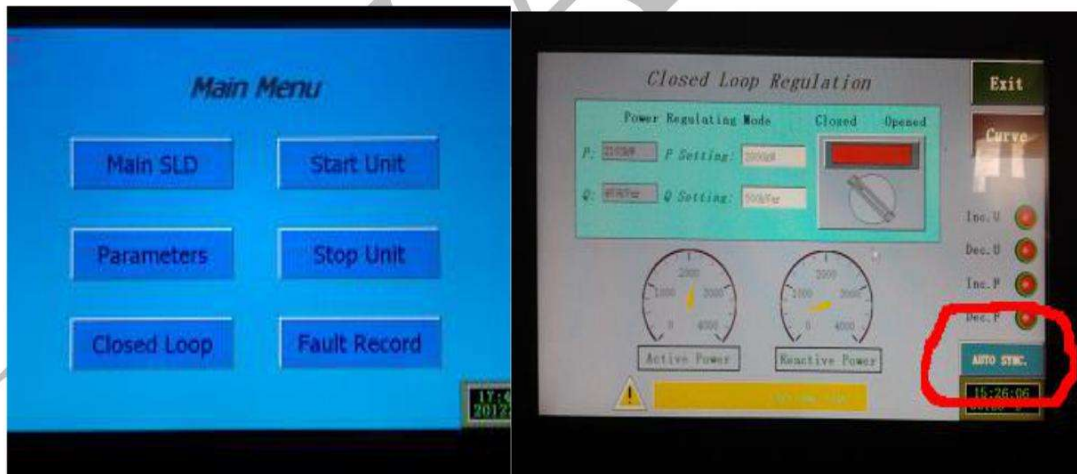
Cat : jika belum ada unit yang menyala / tidak ada tegangan dari PLN maka cb harus ditutup secara manual lewat GCP

sinkronisasi unit 1 dan 2

1. jika system dioperasikan secara otomatis. switch 20 KV VCB harus berada pada mode automatic



2. jika kita tidak memilih mode autosinkron ketika mengoperasikan system, maka autosinkron dapat dilakukan dengan cara menekan tombol autosync pada display gcp (pilih menu, tekan closed loop kemudian pilih autosync)



3. tunggu sampai led berwarna hijau menyala pada indicator autosinkron (cb akan otomatis terclosed)
4. jika system dioperasikan secara otomatis, maka terjadi sinkronisasi otomatis. Jika terjadi gagal sinkronisasi pada kondisi otomatis (time out) maka ulangi langkah 1-4 pada sop keadaan standby-beroperasi automatic melalui gcp. (lihat untuk keadaan shyncronization automatic)

sinkronisasi dengan pln

Sinkronisasi di PLTM malea

1. lakukan komunikasi lewat radio ke pln
2. LBS yang terpasang di pln harus ter-closed
3. DS yang terpasang di malea harus ter-closed
4. vcb pada panel NP4 20.5 KV switch gear harus ter-closed dengan cara memutar switch ke kanan (ditandai dengan lampu indicator hijau akan mati dan indicator merah akan menyala)



5. operasikan unit 1 sampai terjadi sinkronisasi dengan pln
6. operasikan unit 2 sampai terjadi sinkronisasi dengan pln

Sinkronisasi di pln

1. lakukan komunikasi lewat radio ke pln
2. LBS yang terpasang di pln harus ter-closed
3. DS yang terpasang di pltm malea harus ter-closed
4. operasikan salah satu unit atau kedua unit (lakukan sinkronisasi unit 1 dan 2)
5. close-kan vcb pada panel NP4 20.5 KV dengan cara memutar switch ke kanan (ditandai dengan lampu indicator hijau akan mati dan indicator merah akan menyala)



6. lakukan komunikasi dengan pln kembali

memutuskan sambungan ke pln

1. lakukan komunikasi dengan pln
2. turunkan daya yang dikirimkan dengan cara memutar switch freq. ke kiri (decrease) pada gcp. sampai daya yang dikirim bernilai nol pada indicator



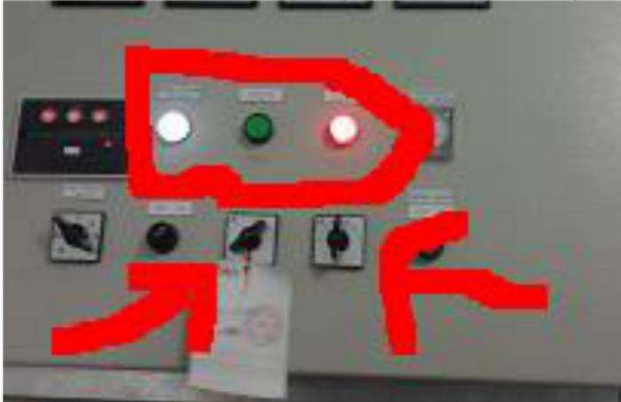
3. open vcb pada panel NP4 20.5 KV dengan cara memutar switch ke kiri (ditandai dengan lampu indicator merah akan mati dan lampu indicator hijau akan menyala)



4. open LBS pada sisi pln
5. open DS pada sisi pltm malea

keadaan beroperasi – standby (manual)

1. pada np 1, 20.5 KV switchgear putar switch ke posisi open dan lampu indicator hijau menyala. (np 2 , untuk unit 2)



2. pada display eksitasi pilih stop, tunggu hingga tegangan eksitasi dan keluaran generator nol



3. tekan tombol stop pada governor



4. pada panel temperature brake, lakukan pengereman ketika kecepatan putaran turbin mencapai 30% dari kondisi beroperasi sampai berhenti dengan cara memutar tombol brake ke kiri sampai governor berhenti (tombol diputar ke tengah)



kemudian putar tombol release ke kiri (kemudian ke tengah)

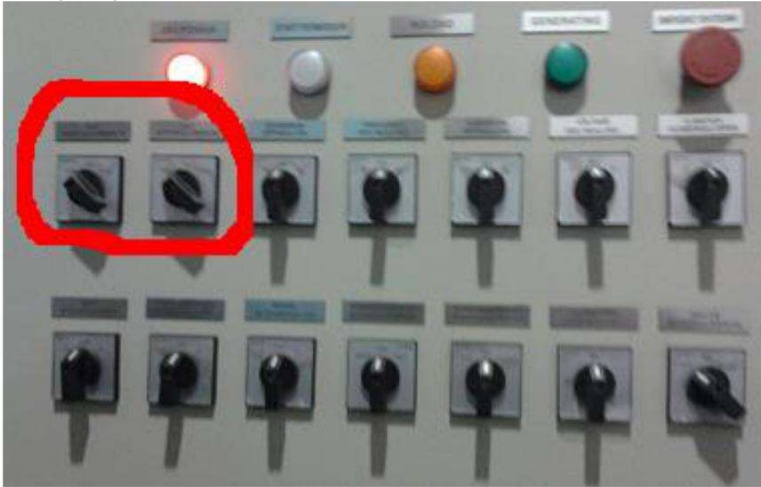


5. pada panel MIV tekan tombol close (warna hijau)



keadaan beroperasi – standby (automatic)

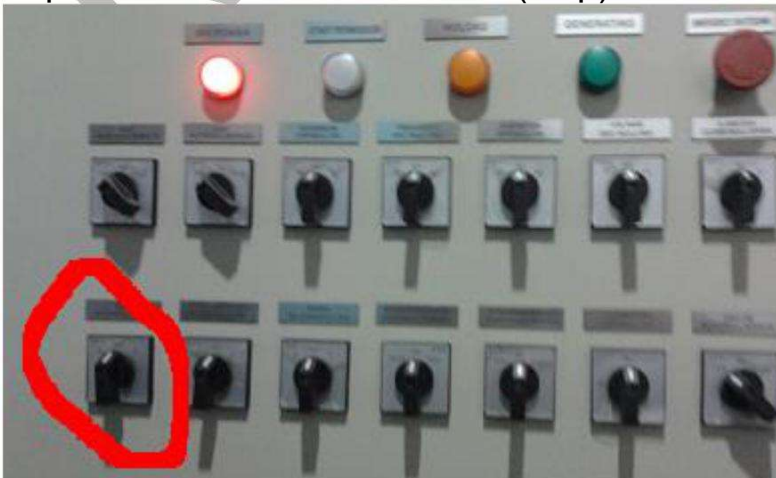
1. pada gcp Putar switch unit ke posisi local (kiri) dan automatic (kiri)



2. putar switch 20 KV CB ke automatic



3. putar tombol unit kearah kiri (stop)



4. pada keadaan darurat, pada gcp tekan tombol berwarna merah (emergency)



Keadaan standby - off

1. mengganti sumber tenaga menggunakan generator diesel jika kedua turbin berhenti beroperasi, dengan cara menyalakan generator diesel dan memutar change over switch ke kanan (panel NP 1 power distribution)



2. Jika salah satu unit masih beroperasi generator diesel tidak perlu dinyalakan dan Change over switch tidak perlu di putar
3. memastikan MIV sudah dalam keadaan tertutup. Jika belum lakukan dengan cara manual dengan menekan tombol berwarna hijau pada panel MIV
4. pada panel bypass tekan tombol close (warna hijau)



5. matikan pompa cooling water
6. Tutup valve cooling water yang menuju unit



7. tutup valve yang menuju ke radial guide bearing dan radial thrust bearing

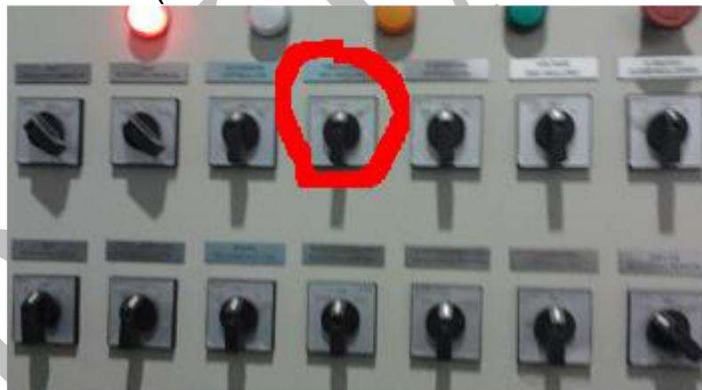


Cara menaikkan tegangan keluaran dan daya yang dikirim ketika tersambung ke pln

1. tegangan keluaran harus dijaga pada kisaran 10-10.5 KV dengan cara memutar switch voltage pada panel gcp ke kanan atau ke kiri (increase/decrease)

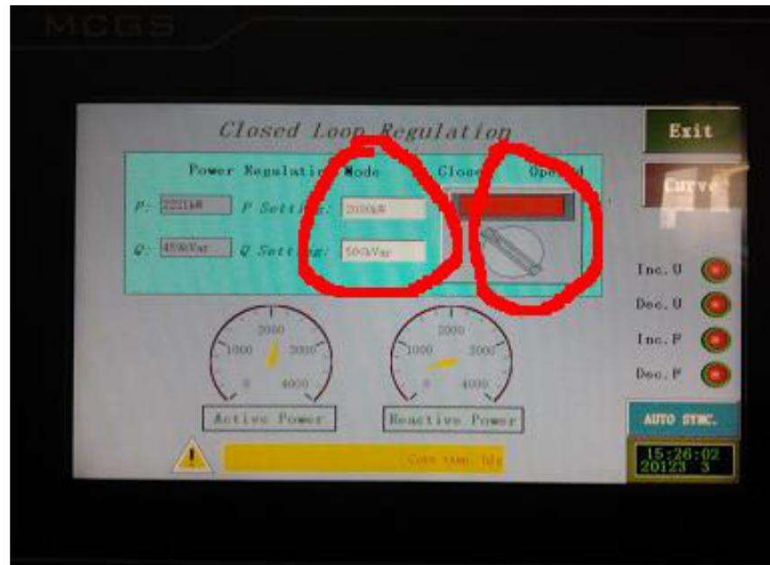


2. daya yang dikirim dapat dinaikan atau diturunkan dengan cara memutar switch freq pada panel gcp ke kanan atau kekiri (increase/decrease)



3. daya yang dikirim juga dapat juga dilakukan dengan cara memasukkan nilai pada display GCP.

Caranya adalah tekan gambar switch ke arah closed (lampu merah akan menyala) dan pilih menu closed loop dan menekan kolom active power dan reactive power lalu memasukkan nilai yang diinginkan



Sebaiknya menaikkan daya yang dikirimkan dilakukan dengan cara memutar switch freq, dengan tujuan daya naik sedikit demi sedikit sampai daya yang diinginkan kemudian menggunakan display untuk menguncinya.

Petunjuk Penting

Petunjuk sebelum pengoperasian :

1. pengecekan debit air pada waterway dan elevasi pada headpond. Pastikan debit air cukup dan ketinggian headpond berada pada ketinggian 720-722 m dari permukaan laut
2. Pengaturan bukaan intake dan Flushing Gate untuk mengatur debit air (Tergantung Keadaan Cuaca dan Sungai Saddang)
3. pengecekan panel dan switchgear.
4. pengecekan system pendingin , pompa dan pipa cooling water, kipas transformer dan generator ventilator
5. sumber tenaga bantuan (generator diesel) dapat berfungsi dengan baik
6. pengecekan system pelumasan pada bearing.
7. harus melakukan komunikasi ketika akan melakukan sinkronisasi dengan pln

Petunjuk selama beroperasi

1. selalu memperhatikan getaran dan bunyi mesin serta bau hangus
2. Mengawasi suhu tiap bagian mesin
3. memeriksa keadaan dan kedudukan sikat cincin penampung dan komutator
4. memeriksa indikator-indikator pada mesin, pipa, breaking panel dan governor
5. mengusahakan agar operasi berjalan dengan efisiensi yang tinggi

Petunjuk dalam penghentian operasi

1. Mesin tidak boleh dijalankan terlalu lama pada kecepatan putar rendah.
2. Rem harus dipakai pada keadaan kurang dari 35% kecepatan putar rata-rata. (jika pengereman otomatis tidak bekerja, segera lakukan dengan pengereman manual)
3. system pendingin harus dihentikan dan saluran udara generator tetap tertutup.

Maintenance

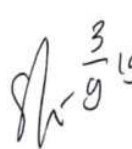
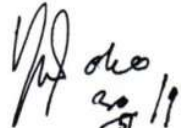
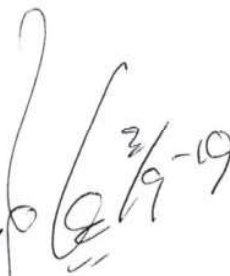
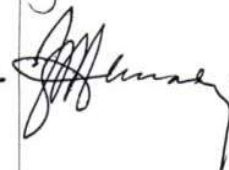
1. pergantian Oli bearing
 - diganti tiap 6 bulan sekali
 - Unit 1 menggunakan oli pertamina dan unit 2 menggunakan oli shell
2. Pemeriksaan pipa-pipa dan katup baik pada cooling water maupun pada turbin dilakukan tiap bulan
3. pemeriksaan dan pengencangan baut turbin, flywheel, generator, MIV dan bypass dilakukan tiap 6 bulan atau pada kondisi tertentu
4. Pengujian tahanan isolasi dilakukan tiap tahun atau pada kondisi tertentu
5. pemeriksaan cincin selip dan sikat komutator dilakukan tiap bulan
6. Pemeriksaan system pendingin generator dilakukan tiap 6 bulan
7. ketika dilakukan pergantian oli bearing, lakukan pengecekan kualitas oli governor.
8. pembersihan pipa cooling water pada bearing
 - secara berkala (dapat dilakukan ketika data menunjukkan suhu bearing berada diatas suhu rata-rata beroperasi)
 - pembersihan dilakukan dengan cara memasukan udara bertekanan tinggi dan air bersih secara bergantian ke dalam pipa
9. pembersihan waterway
 - dilakukan secara berkala setiap 3 bulan atau pada setelah keadaan cuaca ekstrim

LEMBAR REVISI JUDUL SKRIPSI

Nama : Roza Rizaldi Tobby / A. Khayrunnisa

NIM : 44215017 / 44215019

Catatan Daftar Revisi Penguji :

No	Nama	Uraian	Tanda Tangan
1.	Sri Sumasti, S.Si.MT.	<ul style="list-style-type: none"> - Faktor \geq yang mempengaruhi penurunan efisiensi? - Minta masukan data sebelum & sesudah perbaikan.? - Faktor maintenance? - Kesimpulan tentang turbin 2016 efisiensi 2016 dimasukkan. - Single line diagram? 	 $\frac{3}{9} 19$
2.	Muh. Yusuf Yunus	<ul style="list-style-type: none"> - SOP, IK, Working permit? - Arus generator? 	 $\frac{20}{11}$
3.	Ir. laode Muesa	<ul style="list-style-type: none"> - simbol Q akibat debit. - simbol Q akibat daya reaktif. - tabel hal 30 bukan luas. - tabel di cek salah rata-ratanya. - tabel hal 31 (punit5) & (punit6) - hal 38 diganti dgn L - hal 43 pg ganti dengan $\frac{1}{2} v. 1.000$ - efisiensi sistem ditambahkan. - tabel ditambahkan daya turbin dan daya mekanik. - liduga tabel di cek barmaya. 	 $\frac{2}{19} 19$
4.	Dr. Jumali Tampio	<ul style="list-style-type: none"> - Analisis data diperbaiki - Teknik penyimpulan data tidak ada studi literatur. 	

Makassar,
Ketua / Sekretaris Panitia Ujian Sidang,



Muh. Yusuf Yunus, S.ST., M.T.
NIP.

Catatan: Jika ada perubahan Judul Tugas Akhir konfirmasi secepatnya ke bagian Akademik.