



DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Lembar Persembahan	iii
Lembar Motto	iv
Kata Pengantar	v
Naskah Soal Tugas Akhir	vii
Abstract	viii
Daftar Isi	ix
Daftar Gambar	xiv
Daftar Tabel	xviii
Daftar Notasi	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Pengenalan Unit Bisnis Pembangkitan Saguling.....	3
1.3. Spesifikasi Waduk, Turbin, dan Generator PLTA Saguling.....	4
1.4. Dasar Perancangan.....	7
1.5. Batasan Masalah.....	8
1.6. Metode Perancangan.....	8
1.7. Ruang Lingkup Pembahasan.....	9
BAB II DASAR TEORI TURBIN AIR	12
2.1. Sejarah Turbin Air.....	12
2.2. Teori Dasar Aliran.....	14
2.3. Perubahan Bentuk Energi.....	19
2.4. Besar Gaya, Daya Yang Dihasilkan Turbin, Rumus Euler, Bentuk Sudu	22



	2.6. Kecepatan Spesifik	30
BAB III	PERENCANAAN UMUM PEMBANGKITAN LISTRIK.....	32
	3.1. Pendahuluan.....	32
	3.2. Tanggul Bendungan (Dam).....	32
	3.3. Headrace Tunnel dan Surge Tank.....	34
	3.4. Penstocks.....	38
	3.5. Powerhouse	40
	3.6. Pekarangan Hubung (switchyard)	41
	3.7. Hydrological Telemetering System dan Discharge Warning System	41
	3.8. Data Pembangkitan Listrik Tenaga Air Saguling	42
	3.9. Perhitungan Daya	44
	3.10 Perhitungan Kecepatan Putar Turbin	46
BAB IV	PERENCANAAN TURBIN FRANCIS	48
	4.1. Pendahuluan	48
	4.2. Perancangan Komponen Utama.....	53
	4.3. Sudu Gerak (Runner)	53
	4.3.1 Pemilihan Tipe Runner	55
	4.3.2 Dimensi Runner	57
	4.3.2.1 Penentuan diameter poros	58
	4.3.2.2 Menghitung diameter sisi masuk runner	60
	4.3.2.3 Menghitung lebar sisi masuk runner ...	62
	4.3.2.4 Menghitung diameter sisi keluar runner	65
	4.3.2.5 Menghitung jumlah impeller dari runner	68
	4.3.2.6 Menghitung tebal sudu runner	69
	4.4. Guide Vane	71
	4.5. Stay Vane	82
	4.5.1 Menentukan Sudut Keluar Stay Vane	83



	4.5.3 Menentukan Tebal Stay Vane	85
	4.5.4 Menentukan Sudut Masukan dari Stay Vane	85
	4.6. Spiral Case	86
BAB V	PERENCANAAN KOMPONEN PENDUKUNG	94
	5.1. Perencanaan Poros	94
	5.1.1 Konstruksi Poros Bawah.....	101
	5.1.2 Konstruksi Poros Atas.....	103
	5.1.3 Pemeriksaan Poros Terhadap Beban Arah Vertikal.....	106
	5.1.4 Pemeriksaan Poros Terhadap Momen Lengkung	107
	5.1.5 Pemeriksaan Poros Terhadap Tegangan Geser	107
	5.1.6 Pemeriksaan Poros Terhadap Buckling	109
	5.1.7 Pemeriksaan Poros Terhadap Defleksi Puntiran	110
	5.1.8 Pemeriksaan Poros Terhadap Defleksi Lengkungan	111
	5.2. Perencanaan Bantalan	113
	5.2.1 Klasifikasi Bantalan	113
	5.2.2 Pemilihan Bantalan	114
	5.2.3 Perencanaan Batang pada Thrust Bearing	116
	5.2.4 Pelumas Bantalan	121
	5.3. Perencanaan Kopling	122
	5.3.1 Pemeriksaan Kekuatan Flens Kopling	123
	5.3.2 Pemeriksaan Baut Flens antara Poros Atas dan Poros Bawah	124
	5.3.3 Pemeriksaan Baut Flens antara Poros Atas dan Poros Generator	126
	5.3.4 Pemeriksaan Baut Flens antara Runner dan	



5.4.	Perencanaan Pasak	129
5.4.1	Pemeriksaan Kekuatan Pasak untuk Runner	131
5.4.2	Pemeriksaan Kekuatan Pasak unruk Generator	131
BAB VI	GOVERNOR	133
6.1.	Pendahuluan	133
6.2.	Sistem Pengaturan	134
6.3.	Fasilitas Penyeimbang Governor	137
6.3.1	Fungsi Proportional-Integral Derivative (PID) ...	137
6.3.2	Pengaturan frekuensi dan Beban	139
6.3.3	Pengendalian Rangkaian Start dan Stop	140
6.3.4	Pemutusan dan Penolakan Beban	140
6.3.5	Pembatasan Beban	140
6.4.	Persyaratan Pengaturan Powerplant Air	141
6.4.1	Osilasi massa	141
6.4.2	Pengaruh tekanan akibat <i>water hammering</i> ditinjau dari waktu dan kecepatan	144
6.5.	Stabilitas Pengaturan	145
6.6.	Mekanisme Gerak Guide Vane	146
BAB VII	GENERATOR	
7.1.	Klasifikasi Generator	149
7.2.	Satuan Dasar	150
7.3.	Konstruksi Generator	152
7.4.	Efek Roda Gila	156
7.5.	Berat Generator Turbin Air	157
7.6.	Batas-Batas Pembuatan Generator	158
7.7.	Sistem Penguatan	158
7.8.	Prinsip Generator dengan Eksitasi Sendiri	162
7.9.	Karakteristik Generator Majemuk dengan Eksitasi Sendiri	164
BAB VIII	PENUTUP	166



Daftar Pustaka.....	168
Lampiran A	Data Pembangkitan Listrik PT. Indonesia Power
Lampiran B	Daftar Tabel dan Grafik

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.2.1	Bentuk Energi Pada Aliran Air	15
Gambar 2.3.1	Perubahan Energi di Dalam Pipa Saluran Tekan	19
Gambar 2.4.1	Terjadinya Gaya Pada Pembelokan Aliran Air	22
Gambar 2.4.2	Gaya yang Ditimbulkan Aliran Zat Cair di Dalam Bejana yang Bergerak dengan Kecepatan Konstan	23
Gambar 2.4.3	Segitiga Kecepatan Sisi Masuk dan Keluar	24
Gambar 2.4.4	Dengan Kelengkungan Sudut yang Lebih Tajam Pada Kapasitas Air yang Sama Didapatkan Daya yang Lebih Besar	25
Gambar 2.4.5	Gambar Hubungan Tinggi Air Jatuh H dan Bentuk Sudu Turbin	27
Gambar 2.5.1	Hubungan antara D_1 dan b_1 Pada Perencanaan Luas Penampang	29
Gambar 2.6.1	Daerah Penggunaan dari Beberapa Jenis Konstruksi yang Berbeda	31
Gambar 3.1	Gambar <i>Surge Tank</i> (Tangki Pendatar)	36
Gambar 3.2	Bagan Pembangkitan Listrik Tenaga Air	41
Gambar 4.1.1	Turbin Francis dengan Poros Horisontal	49
Gambar 4.1.2	Posisi Turbin di Bawah Generator	51
Gambar 4.1.3	Turbin Francis dengan Poros Vertical	51
Gambar 4.3.1	<i>Runner</i> Dilihat Pada Gambar Potongan	54
Gambar 4.3.2	Tipe Impeler Menurut Kecepatan Spesifik	56
Gambar 4.3.3	Impeler/Runner Turbin Francis	57
Gambar 4.3.4	Ukuran Utama Impeler	58
Gambar 4.3.5	Gambar Dimensi Runner Turbin Francis	60
Gambar 4.3.6	Harga Berdasarkan Pengalaman Untuk	

	Penentuan Utama Ukuran Ukuran Pokok Turbin Francis (Informatif)	62
Gambar 4.3.7	Segitiga Kecepatan Sisi Masuk <i>Runner</i>	64
Gambar 4.3.8	Segitiga Kecepatan Sisi Keluar <i>Runner</i>	67
Gambar 4.4.1	Aliran Air dari <i>Guide Vane</i> ke <i>Runner</i>	72
Gambar 4.4.2	<i>Guide Vane</i> Pada Posisi Beban Puncak	74
Gambar 4.4.3	Lebar yang Dibentuk Oleh <i>Guide Vane</i> Jika Ujung <i>Guide Vane</i> Berimpit dengan <i>Runner</i>	75
Gambar 4.4.4	Gambar antara <i>Runner</i> dan <i>Guide Vane</i>	77
Gambar 4.4.5	Posisi <i>Guide Vane</i> Ketika Menutup, Garis Putus-Putus Menunjukkan Ujung-Ujung <i>Guide Vane</i> Ketika dalam Beban Puncak	79
Gambar 4.5.1	Gambar Posisi <i>Stay Vane</i> Terhadap <i>Guide Vane</i>	84
Gambar 4.6.1	Bentuk Penampang Volut	87
Gambar 4.6.2	Komponen Arah Tangensial c_{u3} Dapat Diketahui	89
Gambar 4.6.3	Ukuran Utama Volut	90
Gambar 4.6.4	Hubungan K_{cv} dan f (ns) dengan Kecepatan Spesifik	91
Gambar 4.6.5	Lebar Sisi Masuk Volut	92
Gambar 5.1.1	Poros Bagian Bawah Turbin Francis	95
Gambar 5.1.2	Daerah Terjadinya Perbedaan Tekanan Pada <i>Punner</i>	95
Gambar 5.1.3	Penampang Irisan <i>Runner</i>	98
Gambar 5.1.4	Grafik Koefisien Gaya Radial K_r	100
Gambar 5.1.5	Konstruksi Poros	102
Gambar 5.1.6	Gambar Profil dari Poros Bagian Atas	105
Gambar 5.1.7	Gaya Radial yang Bekerja Pada Poros	107

Gambar 5.1.8	Tejadinya <i>Buckling</i> antara Bantalan Antar dan <i>Thrust Bearing</i>	109
Gambar 5.2.1	Dimensi <i>Guide Bearing Metal</i>	116
Gambar 5.2.2	Gambar Batang Pada <i>Thrust Bearing</i>	117
Gambar 5.2.3	Beban yang Terjadi Pada Batang	117
Gambar 5.2.4	BMD Batang Pada <i>Thrust Bearing</i>	118
Gambar 5.2.5	Balok Penghantar Pada <i>Thrust Bearing</i>	119
Gambar 5.2.6	Analisis Resultan Gaya Pada <i>Thrust Bearing</i>	119
Gambar 5.2.7	Gambar Dimensi Balok Penghantar	121
Gambar 5.3	Kopling Flens Tempa	123
Gambar 5.4	Pasak di antara <i>Runner</i> dan Poros	130
Gambar 6.2.1	Blok Diagram Untuk <i>Closed Loop</i>	135
Gambar 6.2.2	Governor Hidrolik dengan Menggunakan Pendulum	136
Gambar 6.2.3	Waktu Tanggap dari Penurunan Beban	137
Gambar 6.3.1	Penurunan Permanen dan Jarak Pengaturan	139
Gambar 6.3.2	Distribusi Beban dari Dua Unit yang Berbeda Penurunan Permanennya	139
Gambar 6.4.1	Tampilan Tinggi Jatuh Suatu PLTA	141
Gambar 6.4.2	Saluran Awal dan <i>Surge Shaft</i> dalam Kriteria Thoma	142
Gambar 6.6.1	Skema dari Sistem Governor Turbin	147
Gambar 6.6.2	Skema dari Kinematik Governor	148
Gambar 7.1	Klasifikasi Generator Menurut Posisi Bantalannya	150
Gambar 7.2	Generator Turbin Air Jenis Poros Vertikal	152
Gambar 7.3	Contoh Karakteristik Generator dengan Belitan Tunggal	154
Gambar 7.4	Hubungan antara GD^2 dan Berat Generator	156
Gambar 7.5	Batas Pembuatan Generator	158



Gambar 7.7	Respon Penguat Nominal	161
Gambar 7.8	Generator Bolak-Balik Majemuk dengan Eksitasi Sendiri	163
Gambar 7.9	Berbagai Sistem Generator Bolak-Balik Majemuk dengan Eksitasi Sendiri	164



DAFTAR TABEL

- Tabel 1 Populasi, Serta Proyeksi Kebutuhan Energi dan Tenaga Listrik
- Tabel 2 Produksi (GWh) per Jenis Pembangkit
- Tabel 3 PLTA-PLTA yang di Bawah UBP Saguling
- Tabel 4 Perubahan Energi
- Tabel 5 Tabel Penggolongan Bendungan
- Tabel 6 Hasil Rancangan Dimensi *Runner*
- Tabel 7 Tabel Rumus-Rumus *Guide Vane*
- Tabel 8 Hasil Rancangan Dimensi *Guide Vane*
- Tabel 9 Hasil Perhitungan Ukuran Utama Volut
- Tabel 10 Variasi Letak Bantalan Antar dan *Thrust Bearing*
- Tabel 11 Kecepatan Putar Sinkron dari Generator
- Tabel 12 Kelebihan Kapasitas Penguat



DAFTAR NOTASI

a	=	kecepatan propagasi dari gelombang hantaman air
A	=	luas yang terkena gaya geser
A_{ba}	=	luasan daerah penopang bantalan antar pada poros
A_{gv}	=	luas penampang yang dibentuk oleh <i>guide vane</i>
A_n	=	luas penampang dari setiap bagian pipa
A_{pt}	=	luas penampang <i>tunnel</i>
b_1	=	lebar sisi masuk ke <i>runner</i>
b_1'	=	lebar impeler termasuk ketebalannya, m
c	=	kecepatan air dalam saluran
c_m	=	kecepatan rata-rata air
c_{mr}	=	kecepatan masuk arah radial
c_{ml}	=	kecepatan absolut arah radial
c_1	=	kecepatan absolut sisi masuk
c_2	=	kecepatan absolut sisi keluar
C	=	koefisien kehilangan tinggi terjun (<i>loss of head</i>)
C_b	=	faktor koreksi tegangan lentur
d	=	diameter baut
d_{sh}	=	diameter poros
d'_h	=	diameter hub bagian belakang
$D = 2R$	=	diameter dimana baut dipasang
D_1	=	diameter <i>runner</i> sisi luar
E	=	modulus elastisitas poros
E_p	=	energi tekanan
E_t	=	energi total
E_v	=	energi kecepatan
E_z	=	energi ketinggian
E_t	=	tegangan pada terminal generator
f	=	faktor gesekan Darcy-Weissback



- f = frekuensi
- F = Gaya
- F_{ak} = gaya aksial
- F_t = gaya tangensial
- F_{total} = resultan gaya
- F_{tp} = luas penampang tangki pendatar
- g = gravitasi bumi
- G = modulus geser bahan poros
- h = $H_o - H$ = perbedaan head antara permukaan reservoir dan permukaan pada *surge shaft*
- h_B = tinggi permukaan air di bendungan
- h_{Tr} = tinggi permukaan air di *tailrace*
- H = tinggi air jatuh
- H = tekanan statis
- H = tekanan air maksimum di tempat air mendapat tekanan
- H_E = head efektif turbin
- H_n = nominal head
- H_o = head (beda elevasi antara bendungan dan *tailrace*)
- I = rotasi massa inersia
- I = gradien hidrolik
- J = momen enersia polar
- k = perbandingan r_i dengan r_o
- K_f = faktor koreksi untuk flens
- K_m = faktor koreksi momen lengkung
- K_r = koefisien eksperimental yang harganya tergantung pada kapasitas dan kecepatan spesifik
- K_t = faktor koreksi momen puntir
- K_t = faktor koreksi untuk tegangan kejut
- l_{gv} = lebar yang dibentuk sesuai dengan besar sudut sudu *guide vane*
- L = panjang poros yang mengalami puntiran
- L = panjang dari ujung batang ke cincin



- L = luas penampang *guide vane* yang mendapat tekanan
- L = panjang *tunnel*
- L_e = panjang ekuivalen
- m = massa air
- M = momen lengkung
- $\overset{\circ}{m}$ = massa per satu detik
- n = kecepatan putar
- n_e = jumlah baut efektif
- N = jumlah baut
- N = daya keluaran
- n_{sq} = kecepatan spesifik
- p = jumlah kutub dalam generator
- p = tekanan air
- p_{tc} = panjang *thrust collar*
- P = daya yang dihasilkan
- P_n = daya nominal
- Q = debit turbin air
- Q = debit pada *tunnel*
- Q_o = Debit rata-rata
- r_d = jari-jari bagian dalam
- r_{gv} = jari-jari ujung *guide vane* sisi dalam = jari –jari bagian luar *runner*
- r_{gv} = jari-jari ujung *guide vane* sisi dalam
- r_{pgv} = jari-jari poros *guide vane*
- r_o = radius dari keluaran *guide vane* yang ditandai dengan (o)
- r_{svd} = jari-jari *stay vane* bagian dalam
- r_{svl} = jari-jari *stay vane* bagian luar
- r_{tc} = jari-jari *thrust collar*
- r_l = jari-jari bagian luar
- r_l = radius dari masukan *runner* yang ditandai dengan (l)
- R = jari-jari hidrolik
- R_h = jari-jari dari penampang pada *tunnel*



- s_f = faktor keamanan untuk flens
- s_{f1} = faktor keamanan untuk kelelahan puntir
- s_{f2} = faktor keamanan untuk konsentrasi tegangan dan poros bertangga
- t = tebal pipa
- t_{gv} = tebal rata-rata *guide vane*
- T = torsi yang dipindahkan
- T = torsi atau momen puntir
- T = momen puntir
- T = momen tumpuan pada bangunan
- T_a = waktu percepatan rotasi massa dari unit
- T_w = waktu inersia konstan dari massa air dalam saluran
- v = kecepatan aliran air
- v_{gv} = kecepatan aliran pada sudut posisi *guide vane* tertentu
- v_m = kecepatan aliran rata-rata dalam pipa pesat (*penstock*)
- V = kecepatan rata-rata
- X_s = impedansi serempak
- Y = defleksi maksimum yang terjadi pada poros
- y = jarak minimal vertikal *runner* bagian atas antara posisi D_1 dan D_2
- z = jumlah sudu *guide vane*
- z = ketinggian/beda elevasi
- Z = permukaan air dalam tangki pendatar atas dasar keadaan muka air pada waktu tidak ada beban (arah ke bawah adalah positif)
- α_1 = sudut masuk *runner*
- ε = cadangan tebal untuk korosi dan abrasi
- ρ = massa jenis air
- γ_{svd} = sudut *stay vane* bagian dalam
- γ_{svl} = sudut *stay vane* luar
- γ = sudut yang dibentuk antara *guide vane* dengan arah tangensial putaran
- η = efisiensi
- η = koefisien kekasaran (*coefficient of roughness*)
- η_{rs} = efisiensi total saluran



- σ = tegangan
- σ_{cr} = tegangan yang diijinkan
- τ_a = tegangan geser ijin bahan poros
- τ = 0,9 penyempitan luas penampang bagian masuk
= sudut masuk *runner* = α_1
- τ_{sm} = tegangan geser yang terjadi
- τ_{bp} = tegangan geser yang terjadi
- θ = sudut posisi guide vane aktual
- ΔP = perubahan daya
- Δf = perubahan frekuensi