UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

# 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

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

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

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

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

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

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 *water hammering* 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

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

Daftar Pustaka..... 168

Lampiran A Data Pembangkitan Listrik PT. Indonesia Power

Lampiran B Daftar Tabel dan Grafik

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

# 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 *Surge Tank* (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 | *Runner* 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 | |

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

| | | |
|---|---|---|
| | Penentuan Utama Ukuran Ukuran Pokok Turbin Francis (Informatif) | 62 |
| Gambar 4.3.7 | Segitiga Kecepatan Sisi Masuk *Runner* | 64 |
| Gambar 4.3.8 | Segitiga Kecepatan Sisi Keluar *Runner* | 67 |
| Gambar 4.4.1 | Aliran Air dari *Guide Vane* ke *Runner* | 72 |
| Gambar 4.4.2 | *Guide Vane* Pada Posisi Beban Puncak | 74 |
| Gambar 4.4.3 | Lebar yang Dibentuk Oleh *Guide Vane* Jika Ujung *Guide Vane* Berimpit dengan *Runner* | 75 |
| Gambar 4.4.4 | Gambar antara *Runner* dan *Guide Vane* | 77 |
| Gambar 4.4.5 | Posisi *Guide Vane* Ketika Menutup, Garis Putus-Putus Menunjukkan Ujung-Ujung *Guide Vane* Ketika dalam Beban Puncak | 79 |
| Gambar 4.5.1 | Gambar Posisi *Stay Vane* Terhadap *Guide Vane* | 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 *Punner* | 95 |
| Gambar 5.1.3 | Penampang Irisan *Runner* | 98 |
| Gambar 5.1.4 | Grafik Koefisien Gaya Radial Kr | 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 |

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**


| | | |
|---|---|---|
| Gambar 5.1.8 | Tejadinya *Buckling* antara Bantalan Antar dan *Thrust Bearing* | 109 |
| Gambar 5.2.1 | Dimensi *Guide Bearing Metal* | 116 |
| Gambar 5.2.2 | Gambar Batang Pada *Thrust Bearing* | 117 |
| Gambar 5.2.3 | Beban yang Terjadi Pada Batang | 117 |
| Gambar 5.2.4 | BMD Batang Pada *Thrust Bearing* | 118 |
| Gambar 5.2.5 | Balok Penghantar Pada *Thrust Bearing* | 119 |
| Gambar 5.2.6 | Analisis Resultan Gaya Pada *Thrust Bearing* | 119 |
| Gambar 5.2.7 | Gambar Dimensi Balok Penghantar | 121 |
| Gambar 5.3 | Kopling Flens Tempa | 123 |
| Gambar 5.4 | Pasak di antara *Runner* dan Poros | 130 |
| Gambar 6.2.1 | Blok Diagram Untuk *Closed Loop* | 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 *Surge Shaft* 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 |

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

| | | |
|---|---|---|
| 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 |

UNIVERSITAS
GADJAH MADA

**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

# 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

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

# 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 *guide vane*

$A_n$ = luas penampang dari setiap bagian pipa

$A_{pt}$ = luas penampang *tunnel*

$b_1$ = lebar sisi masuk ke *runner*

$b_1$' = lebar impeler termasuk ketebalannya, m

c = kecepatan air dalam saluran

$c_m$ = kecepatan rata-rata air

$c_{mr}$ = kecepatan masuk arah radial

$c_{m1}$ = kecepatan absolut arah radial

$c_1$ = kecepatan absolut sisi masuk

$c_2$ = kecepatan absolut sisi keluar

C = koefesien kehilangan tinggi terjun (*loss of head*)

$C_b$ = 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 *runner* sisi luar

E = modulus elastisitas poros

Ep = energi tekanan

Et = energi total

Ev = energi kecepatan

Ez = energi ketinggian

$E_t$ = tegangan pada terminal generator

f = faktor gesekan Darcy-Weissback

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

f = frekuensi

F = Gaya

$F_{ak}$ = gaya aksial

Ft = 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 reservoar 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

Km = faktor koreksi momen lengkung

$K_r$ = koefisien eksperimental yang harganya tergantung pada kapasitas dan kecepatan spesifik

Kt = 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

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

L = luas penampang *guide vane* yang mendapat tekanan

L = panjang *tunnel*

Le = 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

$r_1$ = radius dari masukan *runner* yang ditandai dengan (1)

R = jari-jari hidrolik

$R_h$ = jari-jari dari penampang pada *tunnel*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

$sf_f$ = faktor keamanan untuk flens

$sf_1$ = faktor keamanan untuk kelelahan puntir

$sf_2$ = 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 $D_{2i}$

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)

$\alpha_1$ = sudut masuk *runner*

$\varepsilon$ = cadangan tebal untu korosi dan abrasi

$\rho$ = massa jenis air

$\gamma_{svd}$ = sudut *stay vane* bagian dalam

$\gamma_{svl}$ = *sudut stay* vane luar

$\gamma$ = sudut yang dibentuk antara *guide vane* dengan arah tangensial putaran

$\eta$ = effisiensi

$\eta$ = koefisien kekasaran (*coefficient of roughness*)

$\eta_{Ts}$ = efisiensi total saluran

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Perancangan Ulang Turbin Francis Dengan Kapasitas 180 MW**
Agus Setiawan , Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.
**Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/**

$\sigma$ = tegangan

$\sigma_{cr}$ = tegangan yang diijinkan

$\tau_a$ = tegangan geser ijin bahan poros

$\tau$ = 0,9 penyempitan luas penampang bagian masuk

= sudut masuk *runner* = $\alpha_1$

$\tau_{sm}$ = tegangan geser yang terjadi

$\tau_{bp}$ = tegangan geser yang terjadi

$\theta$ = sudut posisi guide vane aktual

$\Delta P$ = perubahan daya

$\Delta f$ = perubahan frekuensi