

3100096007790

**TUGAS AKHIR**

**NE 1701**

# **PERENCANAAN INSTALASI TURBIN BAWAH AIR DI SELAT BALI**

**STUDI TEKNIS PEMANFAATAN ARUS LAUT  
SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF**

RSke  
621.406  
Gur  
P-1  

---

1995



PERENCANAAN	
1995	
TEL. P.	1 5 400 1005
TOR.	H
J. A.	5073

Disusun oleh :

**R. O. SAUT GURNING**

**NRP. 4904200270**

**JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
1995**

APAPUN JUGA YANG HARUS KAMU PERBUAT, PERBUATLAH DENGAN SEGENAP HATIMU SEPERTI UNTUK TUHAN DAN BUKAN UNTUK MANUSIA... ( KOLOSE 3 : 23 )

SEBAB DAUD BERKATA TENTANG DIA :

AKU SENANTIASA MEMANDANG KEPADA TUHAN, KARENA IA BERDIRI DI SEBELAH KANANKU, AKU TIDAK GOYAH.

SEBAB ITU HATIKU BERSUKACITA DAN JIWAKU BERSORAK-SORAK, BAHKAN TUBUHKU AKAN DIAM DENGAN TENTERAM, .....

SEBAB ENKAU TIDAK MENYERAHKAN AKU KEPADA DUNIA ORANG MATI, DAN TIDAK MEMBIARKAN ORANG KUDUS-MU MELIHAT KEBINASAAN. ENKAU MEMBERITAHUKAN KEPADAKU JALAN KEHIDUPAN ;

ENKAU AKAN MELIMPAHI AKU DENGAN SUKACITA DIHADAPAN-MU.... ( KISAH PARA RASUL 2 : 25 - 28 )

*KUPERSEMBAHKAN BUAT BAPA DAN MAMA SERTA ADIK-ADIK KU ; SISKA, RITA DAN NITA YANG SELAMA INI TELAH MEMBANTU SAYA DALAM DOA, MENDORONG DALAM SEMANGAT, SERTA MENJADI WAHANA PENCURAHAN KASIH-KU SELAMA INI.....*

LEMBAR PENGESAHAN

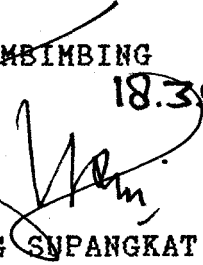
=====

JUDUL TUGAS AKHIR : PERENCANAAN INSTALASI TURBIN BAWAH  
AIR DI SELAT BALI  
STUDI TEKNIS PEMANFAATAN ARUS LAUT  
SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF

DIKERJAKAN OLEH : R.O. SAUT GURNING  
N.R.P. : 4904200270  
DOSEN PEMBIMBING : IR. BAMBANG SUPANGKAT

S U R A B A Y A, 13 MARET 1995

MENGETAHUI DAN MENYETUJUI

DOSEN PEMBIMBING  
18.395  
  
( IR. BAMBANG SUPANGKAT )  
N.I.P. 130 355 298

## A B S T R A K

Konsumsi masyarakat Indonesia akan kebutuhan energi, terutama sektor energi listrik semakin meningkat. Sedangkan di sisi lain persediaan minyak bumi kita semakin menipis.

Karena itu upaya pencarian energi pengganti untuk masa depan harus dilakukan. Solusi yang ditawarkan bagi Bangsa Indonesia adalah laut, mengingat luas lautannya adalah 80 % dari luas teritorialnya. Sumber energi alternatif dari lingkungan laut ini antara lain adalah arus laut.

Karena kondisi kecepatan arus laut di Selat Bali yang relatif besar, maka dijadikan lokasi studi pemanfaatan arus laut sebagai energi listrik.

Hasil perencanaan mengungkapkan besarnya daya yang dihasilkan dengan menggunakan satu unit turbin air sebagai obyek geraknya sebesar 3,5 MW, yang sebelumnya didahului dengan perencanaan tipe turbin, sistem transmisi, generator, juga bangunan lautnya.

Secara teknis pemanfaatan arus laut ini di Indonesia dapat dilakukan, namun terlebih dahulu perlu dilakukan pengukuran besarnya kecepatan arus laut yang lebih spesifik sehingga didapatkan daya listrik yang optimum, dan operasi instalasi yang akurat.

## K A T A   P E N G A N T A R

Dengan ucapan dan rasa syukur saya panjatkan kepada Bapa Surgawi, yang karena Kasih dan pimpinan-Nya membuat saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini tepat pada waktunya.

Tugas akhir yang berjudul ; PERENCANAAN INSTALASI TURBIN BAWAH AIR DI SELAT BALI STUDI TEKNIS PEMANFAATAN ARUS LAUT SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF, ini merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh untuk mencapai gelar kesarjanaan pada jurusan Teknik Permesinan Kapal, Fakultas Teknologi Kelautan , Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Surabaya.

Dalam kesempatan ini saya sampaikan ucapan terima kasih kepada ;

1. Bapak Ir. Bambang Supangkat, selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, pengarahan dan perhatian kepada saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Ir. S. Tondohartono, selaku Dekan FTK - ITS.
3. Bapak Ir. M. Orianto, BSE. MSc., selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal, FTK - ITS.
4. Bapak Ir. Tony Bambang, MSc., selaku Dosen Wali.
5. Bapak Ir. Arief Suroso, MSc., yang telah memberikan masukan dan pertimbangan dalam tugas

akhir ini.

6. Bapak Ir. Asjhar Imron, MSc., MSE., PED., selaku Kepala Laboratorium Komputer FTK - ITS .
7. Staf Pengajar dan karyawan di lingkungan FTK - ITS utamanya di jurusan Teknik Permesinan Kapal.

Juga kepada sahabat-sahabatku sejurusan Teknik Permesinan Kapal terutama angkatan '90 yang telah menjadi patner yang kompak, saling membantu dan mendorong dalam menyelesaikan tugas ini.

Kami menyadari di dalam usaha menyelesaikan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan dan keterbatasan saya untuk membuat tugas ini menjadi lengkap dan baik.

Untuk itu saya sangat mengharapkan adanya saran, masukan dan usaha perbaikan dari khalayak pembaca demi kesempurnaan tugas akhir ini.

Akhirnya penulis mengharapkan agar tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca khususnya, dan bagi ilmu pengetahuan dan teknologi pada umumnya.

SURABAYA, MARET 1995

R. O. SAUT. GURNING

# DAFTAR ISI

	Hal.
Lembar Persembahan .....	i
Lembar Pengesahan .....	ii
Abstrak .....	iii
Kata Pengantar .....	iv
Daftar Isi .....	v
Daftar Gambar .....	xii
Daftar Tabel .....	xiv
Daftar Notasi .....	xv
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1. Latar Belakang .....	1
2. Tujuan Penulisan .....	4
3. Manfaat Penulisan .....	4
4. Batasan Masalah .....	4
5. Metodologi Penelitian .....	5
<b>BAB II. DASAR TEORI</b>	
II.1. Arus Laut .....	7
II.1.1. Pengukuran Arus Laut Di Selat Bali ..	8
II.2. Turbin air .....	13
II.2.1. Daya Turbin .....	13
A. Kapasitas Air Laut .....	13
B. Tinggi Jatuh .....	14
II.2.2. Putaran Turbin .....	14
II.2.3. Putaran Spesifik Turbin .....	14

II.2.4. Turbin Air dan Tipe-tipenya .....	15
A. Berdasar Tekanan.....	17
B. Berdasarkan Tinggi Tekan .....	18
C. Berdasarkan Arah Aliran .....	19
D. Berdasarkan Debit .....	19
E. Berdasarkan Tenaga .....	20
F. Berdasarkan Kecepatan spesifik....	20
G. Berdasarkan Diameter .....	21
II.2.5. Turbin Kaplan .....	22
A. Penentuan Diameter Sudu Jalan dan Hub..	23
(i) Diameter Sudu Jalan .....	23
(ii) Diameter Hub .....	23
B. Perencanaan Sebuah Sudu Jalan.....	24
B.1. Perhitungan Kecepatan .....	24
B.1.1. Kecepatan Keliling Sudu Jalan.....	25
B.1.2. Kecepatan Air Keluar Sudu Jalan....	26
B.1.3. Kecepatan Keliling Spesifik .....	27
B.1.4. Kecepatan Absolut Spesifik .....	27
B.1.5. Penggambaran Segitiga Kecepatan ....	27
B.1.6. Perencanaan Bentuk Dan Ukuran	
Utama Sudu Jalan .....	30
a. Perhitungan Jarak Antara	
Dua Sudu (Pitch) .....	32
b. Perencanaan Chord- Spacing	
Ratio ( $l/t$ ) .....	32
c. Perhitungan Panjang Chord ( $l$ )....	33
d. Perhitungan harga koefisien	



Angkat (C1) .....	33
e. Perhitungan Koefisien Tahan (Drag), Cd .....	33
f. Perhitungan Titik - titik Koordinat Garis Bentuk Profil ...	35
g. Perbandingan $Y_{mak} / l$ .....	36
h. Penentuan Sudut Serang , $\alpha$ .....	36
B.1.7. Perhitungan Titik Berat Profil.....	37
B.1.8. Perhitungan Gaya-gaya yang Bekerja pada Sudu Profil .....	37
a. Gaya Aksial .....	38
b. Gaya Keliling .....	39
c. Gaya Sentrifugal .....	40
B.1.9. Perhitungan Momen Bengkok .....	41
a. Akibat Gaya Aksial .....	41
b. Akibat Gaya Keliling .....	42
B.1.10. Perhitungan Tegangan-tegangan yang terjadi pada kaki sudu .....	43
a. Akibat Momen bengkok .....	43
b. Akibat Gaya Sentrifugal .....	45
B.1.11. Perencanaan Bahan Sudu Jalan .....	46
II.2.6. Poros Turbin .....	48
A. Gaya-gaya yang Bekerja Pada Poros .....	49
(i) Gaya Keliling .....	49
(ii) Gaya Aksial .....	49
B. Tegangan yang terjadi pada poros.....	51
(i) Tegangan Geser .....	51

(ii) Tegangan Tarik .....	52
(iii) Tegangan Bengkok .....	53
C. Pemeriksaan Defleksi Puntiran .....	54
D. Putaran Kritis Poros .....	55
II.3. Dasar Perencanaan Sebuah Sudu Antar .....	55
A. Perhitungan Dimensi .....	57
II.4. Dasar Pemilihan Bahan Terhadap Korosi .....	59
II.5. Bio-Fouling .....	62
II.6. Dasar Pengaturan Kecepatan Turbin .....	63

### BAB III. PERENCANAAN

III.1. Dasar Perencanaan Lokasi .....	67
III.2. Perencanaan Daya Instalasi .....	68
III.2.1. Kapasitas Air laut .....	68
III.2.2. Tinggi Jatuh .....	69
III.3. Putaran Turbin .....	69
III.4. Putaran Spesifik Turbin .....	69
III.5. Tipe dan Cara Kerja Turbin yang Direncanakan .....	70
III.5.1. Pemilihan Tipe .....	70
III.5.2. Cara Kerja Turbin .....	70
III.6. Dimensi Turbin .....	71
III.6.1. Diameter Sudu Jalan .....	71
III.6.2. Diameter Hub .....	71
III.7. Perencanaan Sudu jalan .....	71
III.7.1. Perhitungan Kecepatan .....	73
A. Kecepatan Keliling Sudu Jalan...	73
B. Kecepatan Air Keluar Sudu Jalan	73

C. Kecepatan Keliling Spesifik ....	74
III.7.2. Penggambaran Segitiga Kecepatan ...	74
III.7.3. Contoh Perhitungan Bentuk Sudu .....	78
III.7.4. Perhitungan Titik Berat Profil Sudu	82
III.7.5. Perhitungan Gaya-gaya yang Bekerja pada Sudu Jalan .....	83
A. Gaya Aksial .....	83
B. Gaya Keliling .....	83
C. Gaya Sentrifugal .....	86
III.7.6. Perhitungan Momen Bengkok .....	87
A. Akibat Gaya Aksial .....	87
B. Akibat Gaya Keliling .....	88
III.7.7. Perhitungan Tegangan yang Terjadi pada Kaki Sudu .....	89
A. Akibat Momen Bengkok .....	89
B. Akibat Gaya Sentrifugal .....	92
C. Akibat Gaya Aksial .....	92
III.7.8. Perencanaan Bahan Sudu Jalan .....	93
III.8. Langkah Perencanaan Dimensi Sudu Antar .....	96
III.8.1. Pengaturan Sudu Jalan .....	97
III.8.2. Perhitungan Gaya yang bekerja pada Sudu Antar .....	97
III.9. Perencanaan Poros Turbin .....	100
III.9.1. Perencanaan Dimensi Poros .....	102
III.9.2. Gaya-gaya yang Terjadi pada poros	104
A. Gaya Keliling .....	104
B. Gaya Aksial .....	104

III.9.3.	Tegangan–tegangan yang terjadi.....	110
	A. Akibat Momen Torsi .....	111
	B. Akibat Gaya Aksial .....	112
	C. Tegangan Bengkok .....	114
	D. Tegangan Geser .....	114
III.9.4.	Pemeriksaan Kekuatan Bahan Poros...	115
III.9.5.	Perhitungan Kekuatan pada	
	Split Ring .....	116
	A. Tegangan Kompresi pada	
	Penampang I - I.....	116
	B. Tegangan pada Penampang II-II...	117
III.9.6.	Perhitungan Kekuatan Bahan Baut	
	Pengikat Poros Dengan Hub .....	118
	A. Tegangan Tarik Akibat	
	Gaya Total yang Diterima .....	118
	B. Tegangan Gabungannya .....	119
III.9.7.	Pemeriksaan Poros Terhadap	
	Defleksi Puntiran .....	119
III.9.8.	Putaran Kritis Poros .....	120
III.10.	Perencanaan Bantalan .....	122
	A. Reaksi pada Bantalan B .....	122
	B. Reaksi pada Bantalan A .....	123
III.11.	Pengatur Kecepatan Turbin .....	123
	A. Cara Kerja Pengatur Kecepatan	
	Sistem Hidrolik .....	124
	B. Pengaturan dengan Roda Gigi .....	126
III.12.	Generator .....	129

III.13. Bangunan Instalasi .....	130
III.14. Bagian-bagian Bangunan Instalasi .....	134
A. Umum .....	134
B. Ruangan .....	134
BAB IV. KESIMPULAN DAN SARAN	
IV.1. Kesimpulan .....	136
IV.2. Saran-saran .....	136
DAFTAR PUSTAKA .....	138
LAMPIRAN .....	140

## DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 1	: SITUASI MINYAK DUNIA .....	2
GAMBAR 2	: GRAFIK PRODUKSI MINYAK DALAM NEGERI .....	3
GAMBAR 3	: PETA LOKASI SELAT BALI .....	12
GAMBAR 4	: PENGGERAK DARI TIPE-TIPE TURBIN .....	16
GAMBAR 5	: KARAKTERISTIK TURBIN DENGAN EFISIENSI .....	18
GAMBAR 6	: ARAH ALIRAN DARI TIPE TURBIN .....	19
GAMBAR 7	: PROFIL TURBIN KAPLAN .....	22
GAMBAR 8	: SIRKULASI ALIRAN PADA SUDU .....	25
GAMBAR 9	: PENCARIAN KECEPATAN SPESIFIK .....	26
GAMBAR 10	: DIAGRAM BRAUN'S .....	29
GAMBAR 11	: BAGAN PROFIL SUDU .....	31
GAMBAR 12	: KOORDINAT PROFIL .....	35
GAMBAR 13	: GAYA-GAYA YANG BEKERJA PADA POROS .....	38
GAMBAR 14	: POSISI PERHITUNGAN MOMEN BENGKOK .....	42
GAMBAR 15	: SEGITIGA KECEPATAN SUDU ANTAR .....	56
GAMBAR 16	: PENAMPANG SUDU ANTAR .....	57
GAMBAR 17	: SUSUNAN SUDU ANTAR .....	64
GAMBAR 18	: DIAGRAM SEGITGA; PENGATURAN KECEPATAN .....	65
GAMBAR 19	: PEMBAGIAN SUDU JALAN .....	72
GAMBAR 20	: PENGAMBARAN SEGITIGA KECEPATAN BRAUN'S ...	75
GAMBAR 21	: PEMBAGIAN LUAS PROFIL .....	84
GAMBAR 22	: POSISI TITIK BERAT TERHADAP HUB .....	87
GAMBAR 23	: PENGAMBARAN RESULTAN MOMEN BENGKOK .....	88
GAMBAR 24	: RENCANA PENAMPANG SUDU ANTAR .....	99

GAMBAR 25	:	RANCANGAN UMUM SUDU JALAN DAN ANTAR .....	99
GAMBAR 26	:	DIMENSI POROS .....	103
GAMBAR 27	:	DIMENSI BATANG PENGATUR SUDU .....	105
GAMBAR 28	:	DIMENSI HUB .....	106
GAMBAR 29	:	DIMENSI TUTUP HUB .....	107
GAMBAR 30	:	DIMENSI KAKI SUDU JALAN .....	108
GAMBAR 31	:	DIMENSI KOPLING FLENS .....	109
GAMBAR 32	:	PENAMPANG I - I .....	111
GAMBAR 33	:	PENAMPANG II - II .....	113
GAMBAR 34	:	SPLIT RING .....	116
GAMBAR 35	:	PENAMPANG BAUT .....	118
GAMBAR 36	:	PERLENGKAPAN POROS .....	121
GAMBAR 37	:	PENGATUR KECEPATAN TURBIN .....	126
GAMBAR 38	:	RENCANA UMUM ; .....	128
GAMBAR 39	:	GENERATOR JENIS PAYUNG .....	129
GAMBAR 40	:	BANGUNAN LEPAS PANTAI .....	130
GAMBAR 41	:	KONSTRUKSI SEMI-SUBMERSIBLE .....	132
GAMBAR 42	:	GAMBARAN SECARA KESELURUHAN .....	133

## DAFTAR NOTASI

- A : Luasan yang terkena gaya,  $m^2$   
A<sub>i</sub> : Luasan bagian profil sudu,  $m^2$   
a : Panjang aksial sudu antar, m  
C : Jarak kerja tegangan terhadap pusat poros, mm  
c : Jarak terjauh penampang terhadap sumbu netral, m  
C<sub>1</sub> : Kecepatan air masuk sudu jalan, m/s  
C<sub>2</sub> : Kecepatan air keluar sudu jalan, m/s  
C<sub>s</sub> : Konstanta Kecepatan keluar spesifik  
C<sub>m</sub> : Konstanta Kecepatan Absolut spesifik ke arah meridian  
C<sub>u</sub> : Konstanta Kecepatan Absolut spesifik ke arah tangensial  
C<sub>L</sub> : Koefisien Angkat (lift)  
C<sub>D</sub> : Koefisien Drag  
D : Diameter sudu jalan, m  
D<sub>o</sub> : Diameter poros terluar, mm  
D<sub>i</sub> : Diameter poros dalam, mm  
d : Diameter sudu hub, m  
d' : Diameter poros, mm  
F : Gaya yang bekerja pada suatu peralatan, N  
F<sub>ak</sub> : Gaya aksial, Kg  
F<sub>s</sub> : Gaya Sentrifugal, Kg  
F<sub>v</sub> : Gaya Keliling, Kg  
f : Frekuensi, Hz  
f' : Faktor penebalan dan penipisan bentuk profil  
f<sub>c</sub> : Faktor koreksi transmisi poros  
g : Percepatan gravitasi bumi,  $m/s^2$



Gr : Gaya berat rotor, Kg  
 H : Tinggi jatuh, m  
 I : Momen Inersia penampang kaki sudu jalan,  $m^4$   
 Ip : Momen Inersia Polar,  $m^4$   
 k : Konstanta perbandingan D/d  
 kt : Faktor koreksi konsentrasi tegangan  
 l : Panjang chord sudu, m  
 M : Massa bilah sudu jalan, Kg  
 Ma : Momen bengkok akibat gaya aksial, Kg.m  
 Mb : Momen bengkok pada kaki sudu, Kg.m  
 Mt : Momen torsi poros, Kg.cm  
 Mv : Momen bengkok akibat gaya keliling, Kg.m  
 N : Daya poros, HP  
 Nc : Putaran kritis poros, Rpm  
 Ng : Putaran generator, Rpm  
 n : Putaran turbin, Rpm  
 ns : Putaran spesifik turbin, Rpm  
 n<sup>1</sup> : Faktor keamanan karena pembebanan  
 n<sup>2</sup> : Faktor keamanan ketidak-homogenan material  
 n<sup>3</sup> : Faktor keamanan karena kondisi pemakaian  
 n' : Faktor keamanan  
 P : Daya output efektif turbin, Watt  
 Pd : Daya poros yang telah dikoreksi, Watt  
 p : Jumlah kutub generator, pasang  
 Q : Kapasitas air laut,  $m^3/s$   
 Rt : Jarak titik berat sudu terhadap titik pusat hub, m  
 r : Radius sudu jalan tiap bagian silindris, m

**S** : Titik berat profil terhadap panjang Chord, %  
**T** : Momen puntir pada poros, Kg.mm  
**t** : Jarak antara dua sudu, m  
**U** : Kecepatan keliling sudu jalan, m/s  
**u** : Kecepatan keliling spesifik, m/s  
**V** : Kecepatan arus laut, m/s  
**V<sub>p</sub>** : Volume poros, m<sup>3</sup>  
**W** : Kecepatan sudu jalan, rad/s  
**W<sub>∞</sub>** : Kecepatan relatif spesifik rata-rata (sebenarnya), m/s  
**w<sub>∞</sub>** : Konstanta kecepatan relatif spesifik rata-rata  
**W<sub>p</sub>** : Berat poros, Kg  
**W<sub>b</sub>** : Momen tahanan bengkok, m<sup>2</sup>  
**w** : Berat perlengkapan pada poros, Kg  
**X<sub>a</sub>** : Jarak titik berat sudu dengan hub, m  
**(x,y)** : Koordinat profil sudu, mm  
 **$\bar{x}, \bar{y}$**  : Titik berat profil sudu, mm  
**Y<sub>mk</sub>** : Tinggi maksimum penampang airfoil, m  
**Z** : Jumlah sudu jalan  
**α** : Sudut serang, (°)  
**α<sub>2</sub>** : Sudut chord dari sudu antar, (°)  
**α<sub>3</sub>** : Sudut inklinasi dari sudu antar, (°)  
**β<sub>m</sub>** : Sudut kerja profil airfoil, (°)  
**β<sub>∞</sub>** : Sudut aliran relatif rata-rata, (°)  
**β<sub>200</sub>** : Sudut aliran fluida keluar dari sudu jalan, (°)  
**γ** : Berat spesifik fluida, kg/m<sup>3</sup>  
**φ** : Sudut kelengkungan sudu antar, (°)  
**ρ** : Massa jenis air laut, kgm/m<sup>3</sup>

- $\eta_t$  : Efisiensi total instalasi  
 $\eta_h$  : Efisiensi hidrolis  
 $\sigma$  : Tegangan tarik bahan,  $\text{Kg/cm}^2$   
 $\sigma_a$  : Tegangan tarik ke arah aksial,  $\text{N/m}^2$   
 $\sigma_b$  : Tegangan bengkok karena gaya keliling pada poros,  $\text{N/m}^2$   
 $\sigma_{tb}$  : Tegangan karena momen bengkok,  $\text{Kg/cm}^2$   
 $\sigma_{tc}$  : Tegangan karena gaya sentrifugal,  $\text{Kg/cm}^2$   
 $\sigma_g$  : Tegangan ijin bahan,  $\text{Kg/cm}^2$   
 $\tau_a$  : Tegangan geser yang diijinkan,  $\text{Kg/mm}^2$   
 $\tau_s$  : Tegangan geser,  $\text{Kg/cm}^2$   
 $\tau_s'$  : Tegangan geser setelah dikoreksi  $k_t$ ,  $\text{Kg/mm}^2$   
 $\theta$  : Defleksi puntiran poros, ( $^\circ$ )  
 $\lambda$  : sudut lancar, ( $^\circ$ )

## DAFTAR TABEL

TABEL 1	:	HASIL PENGUKURAN ARUS PADA MUSIM TIMUR .....	11
TABEL 2	:	HASIL PENGUKURAN ARUS PADA MUSIM BARAT .....	11
TABEL 3	:	ARAH ALIRAN DARI TIPE TURBIN .....	19
TABEL 4	:	PENGGOLONGAN TURBIN ATAS KEC. SPESIFIK .....	20
TABEL 5	:	HUBUNGAN PUTARAN SPESIFIK DENGAN TIPE .....	21
TABEL 6	:	DIAMETER DARI TIPE-TIPE TURBIN .....	21
TABEL 7	:	DAFTAR STANDAR PROFIL .....	34
TABEL 8	:	HUBUNGAN ANTARA JENIS TURBIN DAN KECEPATAN ..	41
TABEL 9	:	FAKTOR KEAMANAN MATERIAL .....	47
TABEL 10	:	FAKTOR KOREKSI DAYA .....	48
TABEL 11	:	FAKTOR KONSENTRASI TEGANGAN .....	52
TABEL 12	:	KANDUNGAN GARAM PADA AIR LAUT .....	59
TABEL 13	:	DAFTAR HARGA EMF LOGAM .....	61
TABEL 14	:	HASIL PERHITUNGAN UNTUK SUDU JALAN .....	81
TABEL 15	:	PERHITUNGAN LUAS PROFIL .....	82
TABEL 16	:	PERHITUNGAN VOLUME SUDU .....	85
TABEL 17	:	HARGA PUTARAN LIAR TIAP TIPE TURBIN .....	86
TABEL 18	:	HASIL PERHITUNGAN MOMEN INERSIA .....	91
TABEL 19	:	FAKTOR KEAMANAN MATERIAL .....	94

## BAB I. PENDAHULUAN

### 1). Latar Belakang

Kondisi Indonesia dengan luas 8,5 juta Km<sup>2</sup> mempunyai penduduk 147.400.289 jiwa (sensus 1980). Pada tahun 2000 diperkirakan bisa mencapai 223 juta jiwa.<sup>1)</sup>

Jumlah penduduk yang demikian besar berakibat meningkatnya konsumsi masyarakat akan kebutuhan energi, terutama energi listrik.

Sudah jelas bahwa salah satu masalah yang dihadapi oleh negara kita adalah penyediaan energi listrik. Kesenjangan antara penyediaan energi dan permintaan energi listrik semakin tahun semakin besar. Gejala krisis mulai terasa di Pulau Jawa dan Pulau Bali. Di Jawa Timur misalnya, PLN hanya mampu menambah kapasitas sebesar 5 % padahal kenaikan pertumbuhan permintaan mencapai 20 % pada tahun 1990.<sup>2)</sup>

Sementara itu di lain pihak kebutuhan energi dan persediaan energi konvensional (minyak dan gas bumi) menunjukkan hubungan yang tidak seimbang.

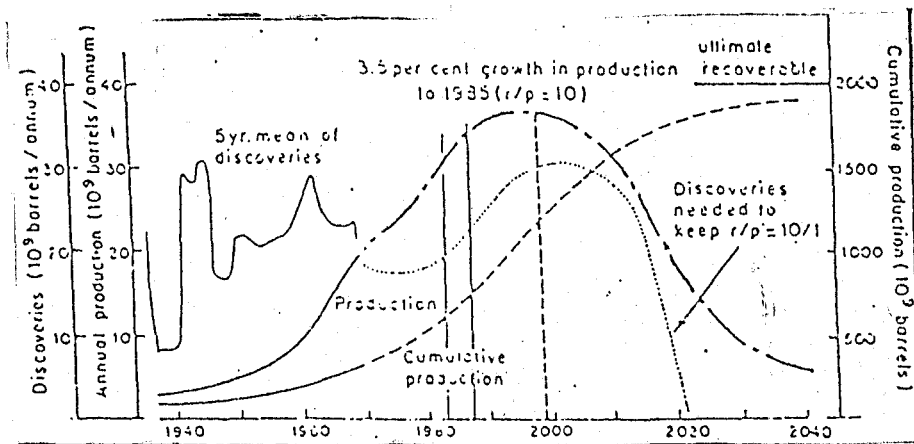
Gambar 1 di bawah ini memperlihatkan ramalan konsumsi

---

1. BIRO PUSAT STATISTIK, SENSUS PENDUDUK TAHUN 1980, BPS PUSAT, JAKARTA 1980.

2. SUYITNO. P., KEGIATAN EKSPLORASI MIGAS DAN PENGEMBANGANNYA KHUSUS DI INDONESIA BAGIAN TIMUR, HAL 25, PERTAMINA, JAKARTA, 1990.

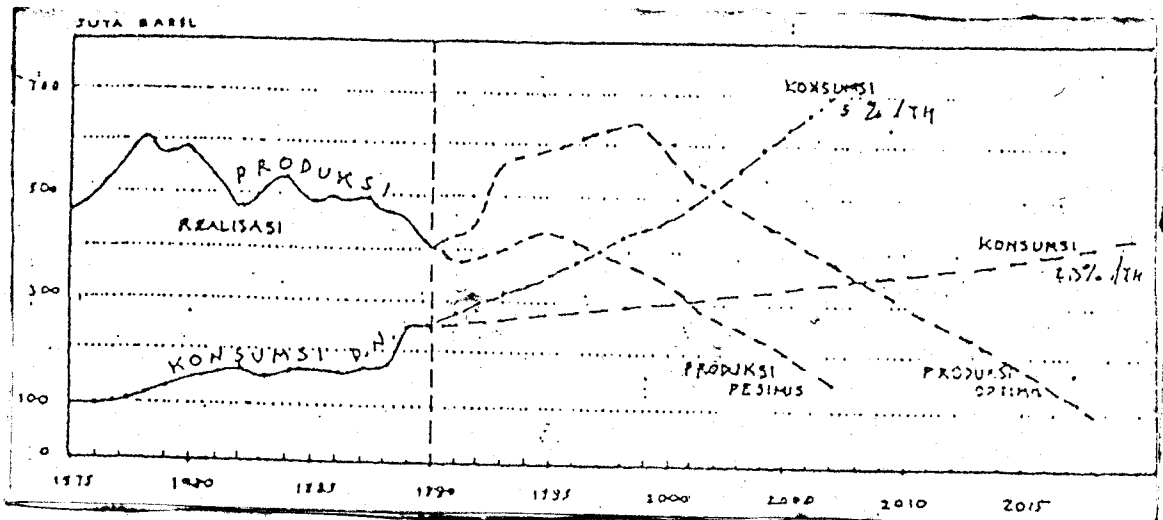
energi dunia sampai dengan tahun 2040.



Gambar.1 Situasi minyak dunia ;produksi dan penemuan sumber minyak bumi ( Sumber Pustaka 1)

Dari grafik tersebut terlihat bahwa kebutuhan energi pengganti setelah tahun 2000 sangat penting. Dikarenakan penemuan sumber minyak bumi telah tidak ada dan mengakibatkan produksi minyak bumi menurun secara drastis setelah tahun 2000.

Diperkirakan setiap tahun di negara kita mengalami kecepatan pertambahan konsumsi energi minyak sebesar 2,3 % per tahun untuk kondisi normal dan 5 % untuk konsumsi tinggi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2 di bawah ini.



Gambar.2 ; Grafik kemampuan produksi dengan minyak bumi di dalam negeri (Sumber Pustaka 2)

Oleh sebab itu mencari energi pengganti untuk masa depan adalah suatu keharusan bagi Indonesia. Suatu solusi yang ditawarkan bagi bangsa Indonesia adalah laut, mengingat luas lautannya adalah 80 % dari luas teritorial.

Laut Indonesia mempunyai potensi energi yang cukup besar, salah satunya adalah arus laut (sea current) yang memiliki potensi energi kinetis dari besarnya kecepatan arus laut tersebut. Salah satunya adalah Selat Bali yang memiliki besar kecepatan arus laut yang relatif besar.

---

## 2). Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan tugas akhir ini selain sebagai syarat kelulusan untuk mendapatkan gelar kesarjanaan pada jurusan Teknik Permesinan Kapal Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, juga mempunyai tujuan yaitu :

- Sebagai studi awal kemungkinan pemanfaatan potensi kelautan Indonesia, khususnya energi arus laut. Mengingat program Pemerintah bahwa Pembangunan Jangka Panjang 25 tahun tahap kedua diprioritaskan juga aspek Pembangunan Kelautan dan Indonesia Bagian Timur.
- Mengenalkan sistem pembangkit listrik arus laut, dan kemungkinannya untuk diterapkan di Selat Bali.

## 3). Manfaat Penulisan

Memberikan sumbangan pemikiran kepada Bangsa dalam menghadapi problema-problema pembangunan khususnya sektor energi.

## 4). Batasan Masalah

Dalam perencanaan ini diberikan beberapa batasan masalah sesuai dengan ruang lingkupnya, yaitu :

- Perencanaan disesuaikan dengan data-data lokasi



yang diperoleh dari hasil penelitian PUSLIT- ITS , dan beberapa data rujukan dari Direktorat Hidrografi dan Oceanografi, TNI Angkatan Laut.

- Kebanyakan langkah-langkah perencanaan seperti ; sudu jalan, sudu antar turbin, sistim transmisi, dan sistim pembangkit listrik, aspek konstruksi dan bagian-bagiannya, dilakukan secara umum. Jadi tidak mendetail.
- Tidak membahas aspek produksi dari peralatan-peralatan yang direncanakan.
- Aspek-aspek ekonomis dalam perencanaan ini tidak dibahas.

#### 5). Metodologi Penulisan

Penyusunan dari perencanaan ini adalah studi literatur, tidak dilakukan riset di lapangan. Pertimbangan ini mengingat dana dan waktu yang relatif singkat untuk suatu penelitian.

Adapun prosedur yang digunakan adalah :

- Mencari literatur yang berhubungan dengan sumber energi dari lautan khususnya arus laut.
- Mencari data-data pengukuran arus laut yang pernah dilakukan.
- Menghitung tenaga listrik yang dihasilkan dengan

input kecepatan arus, dengan menggunakan rumus dari literatur.

- Memperkenalkan konsep sistem perubah energi dari arus laut yang sesuai dengan kondisi topografi di Selat Bali ; dengan merencanakan tipe penggerak (turbin), sudu jalan, dan sudu antar turbin, sistem transmisi, sistem pembangkit listrik, aspek konstruksi dan bagian-bagiannya.

---

## BAB. II

### DASAR TEORI

#### 2.1. A R U S L A U T

Arus laut terjadi akibat perbedaan penyinaran matahari di berbagai tempat di lautan. Perbedaan ini menyebabkan perubahan temperatur dan kadar garam yang selanjutnya menyebabkan bodi air laut berbeda-beda sifatnya. Perbedaan-perbedaan ini mendapat tambahan maupun tidak dari gaya luar akan menimbulkan arus laut.

Arti dari arus laut meliputi segala kumpulan pergerakan dan pertukaran air laut yang sangat rumit antara daerah-daerah laut yang berbeda. Arah dan besarnya arus laut sifatnya bisa tetap atau berubah dan umumnya sulit diteliti karena tumpang tindih dengan sirkulasi lautan dari laut setempat.

Arus laut yang tetap dapat dibagi menjadi tiga kelompok :\*)

- a). Arus laut yang disebabkan karena Thermo Haline Convection karena adanya temperatur permukaan air laut yang dingin di daerah kutub.

---

\*) CONSTANS. J. , MARINE SOURCE OF ENERGY, PERGAMON PRESS,  
NEW-YORK, 1979, HAL 126.

- b). Arus laut yang disebabkan oleh lebih besarnya curah hujan daripada penguapan atau sebaliknya (ini hanya terjadi pada tempat-tempat tertentu di lautan)
- c). Arus laut yang disebabkan oleh transfer energi dari angin yang konstan ke permukaan air laut.

Tiap jenis arus laut dipengaruhi oleh perputaran bumi dan juga bentuk geometri cekungan dasar laut.

#### 2.1.1. Pengukuran Arus Laut Di Selat Bali

Gambaran sepintas wilayah Banyuwangi, seperti terlihat pada gambar 3 menunjukkan Selat Bali berada di sebelah Timur wilayah Banyuwangi. Di sebelah barat adalah daerah pegunungan dengan puncak tertingginya Gunung Raung (3332 m).

Wilayah tengah berupa lembah landai yang menyempit ke arah utara dan melebar ke arah selatan.

Iklim Banyuwangi berkisar type C dan D. Curah hujan rata-rata bulanan terkecil 3 mm terjadi pada bulan September 1986 dan terbesar 356 mm pada bulan Desember 1987. Suhu berkisar antara  $22^{\circ}\text{C}$  sampai  $32^{\circ}\text{C}$ . Kelembaban rata-rata per bulan berkisar antara 72,3% sampai 85,1%. Kecepatan angin rata-rata bulanan tertinggi 2,55 m/detik terjadi pada bulan Agustus dan

terendah 0,4 m/detik terjadi pada bulan April. Arah angin tersering (prevalent) adalah selatan, terjadi pada bulan April sampai Desember. Selama periode Januari dengan Maret arah angin bervariasi antara Utara dan Tenggara. Penyinaran matahari rata-rata bulanan terkecil 25,9% terjadi pada bulan Juli sedangkan terbesar 93% terjadi pada bulan Oktober.

Di Selat Bali banyak terdapat muara sungai dari yang kecil sampai yang besar yang mengalir dari kabupaten Banyuwangi seperti; Kali Baru, Kali Setail, Kali Tambang, Kali Binau, Kali Bajulmati, Kali Baru Manis. Di samping itu banyak terdapat sungai-sungai kecil, diantaranya Kali Sukowidi (lihat gambar).

Selat Bali menghubungkan laut Jawa di sebelah Utara dengan Samudera Hindia di sebelah selatan. Penampang Selat Bali menyempit di sebelah utara dan melebar di sebelah selatan

Arus Selat Bali berubah arah menurut pasang Surut. Pada waktu air pasang, arah arus menuju ke utara (ke Laut Jawa) dan pada waktu surut arahnya ke selatan (ke Samudera Hindia). Namun demikian arus Selat Bali dipengaruhi kuat oleh musim angin, dimana pada musim

Selat Bali mengalir ke Utara (ke Pulau Jawa) dan pada waktu musim angin Timur, yaitu bulan April hingga bulan September arus Selat Bali mengalir ke selatan (ke Lautan Hindia).

Data-data yang dipergunakan untuk menyusun tugas ini diperoleh dari hasil pengukuran arus Selat Bali yang dilakukan oleh Pusat Penelitian ITS. Dimana pengukuran tersebut dilakukan dengan menggunakan Current Meter dan perahu. Pengukuran dilaksanakan pada saat angin Barat dan angin Timur dengan mengambil beberapa titik.

Pengukuran dilakukan di sebelah utara dan selatan pelabuhan Ketapang dan pada 1 Km sampai 2 Km dari pantai, dengan lokasi sebagai berikut :

1. Lokasi Banyuwangi
2. Lokasi Manyar
3. Lokasi ketapang
4. Lokasi Watu Dodol

Data kecepatan arus pada musim angin Timur di Bulan Juli seperti pada tabel.1

Tabel 1 Hasil Pengukuran Pada musim Timur

Lokasi	Kecepatan arus (m/detik)
1	0,6
2	1,2
3	1,6
4	1,8

( Sumber Pustaka 4 )

Data kecepatan arus pada musim barat di bulan Desember dapat dilihat pada tabel.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Pada Musim Barat.

Lokasi	Kecepatan arus (m/detik)
1	0,9
2	2,1
3	2,9
4	4,2

( Sumber Pustaka 4 )

Pengukuran arus laut dilakukan dengan menempatkan perahu pada suatu titik. Perahu dijangkar dan ditunggu sampai tidak bergerak, kemudian dilakukan pengukuran kecepatan arus dengan menggunakan Current Meter yang diletakkan pada kedalaman  $\pm 5$  m.





## 2.2. TURBIN AIR

### 2.2.1. Daya Turbin

Besarnya tenaga kuda yang dihasilkan oleh sebuah turbin dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (\text{Watt}) \quad \dots\dots\dots (\text{Pers. 1})$$

dimana,

$P$  = daya output efektif, Watt

$\rho$  = massa jenis air laut,

$Q$  = kapasitas air laut,  $\text{m}^3/\text{s}$

$H$  = tinggi jatuh, m

$\eta_t$  = efisiensi total instalasi,

#### A. Kapasitas Air laut, (Q)

Besarnya kapasitas air laut dihitung berdasar jumlah massa air yang melalui sudu turbin.

Dengan rumus:

$$Q = \pi/4 \cdot D^2 \cdot V \quad (\text{m}^3/\text{s}), \quad \dots\dots\dots (\text{Pers. 2})$$

dimana,

$D$  = Diameter sudu turbin, m

$V$  = Kecepatan arus laut, m/s

### B. Tinggi jatuh, (H)

Karena sumber energi kinetis turbin didapat dari pergerakan arus laut, sehingga tinggi jatuh (head) yang terjadi adalah akibat kecepatan aliran arusnya.<sup>2)</sup> Dengan rumus:

$$H = V^2/2g \quad (\text{m}), \dots\dots\dots(\text{Pers. 3})$$

dimana  $g$  = gravitasi bumi,  $9,8 \text{ m/s}^2$

### 2.2.2. Putaran Turbin

Untuk merencanakan putaran turbin terlebih dahulu kita ketahui besarnya putaran generator yang akan digunakan. Putaran ini juga menjadi putaran turbin yang direncanakan.

Putaran generator ditentukan dengan persamaan :

$$N_g = 60 \cdot f / P \quad (\text{Rpm}), \dots\dots\dots(\text{Pers. 4})$$

dimana,

$f$  = Frekuensi generator

$P$  = Jumlah kutub generator, direncanakan

### 2.2.3. Putaran Spesifik Turbin

Putaran spesifik turbin dapat didefinisikan sebagai putaran yang terjadi pada turbin model (turbin dengan bentuk sama tetapi skala berlainan) yang bekerja pada

tinggi jatuh (head) 1m dan menghasilkan daya sebesar 1 metrik HP<sup>3)</sup>. Dengan menggunakan rumus :

$$n_s = n \cdot (P)^{0,5} \cdot (gH)^{5/4} \text{ (Rpm), .....(Pers.5)}$$

dimana,

$n$  = putaran turbin, Rpm

$P$  = Daya Output turbin, HP

$H$  = tinggi jatuh, m

$g$  = percepatan gravitasi bumi,  $m/s^2$

#### 2.2.4. Turbin Air dan Tipe-tipenya

Turbin air atau disebut juga dengan turbin hidraulik adalah mesin fluida yang mengubah energi air menjadi tenaga listrik. Dimana air mengalir melalui turbin, memberi tenaga pada penggerak (runner) dari turbin dan membuatnya berputar, kemudian ditransmisikan dengan poros penggerak yang berhubungan langsung dengan generator.

Menurut sejarahnya turbin hidraulik sekarang ini berasal dari kincir-kincir air pada zaman pertengahan yang dipakai untuk memecah batubara dan keperluan pabrik gandum.

Tetapi di samping pemikiran dasar, ada perbedaan

---

1,2,3) B. S. MASSEY, MECHANICS OF FLUIDS, VAN NISTRAND

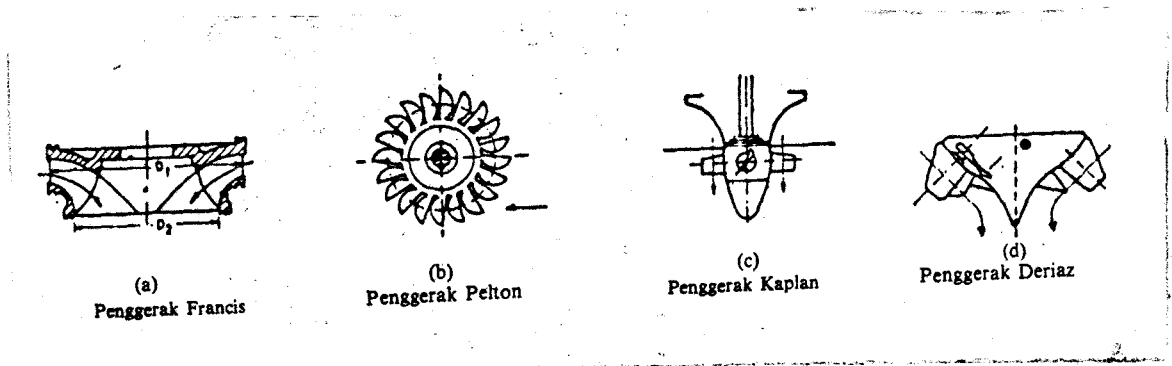
REINHOLD COMPANY LTD, ENGLAND, 1980, HAL. 227-228

antara turbin-turbin saat ini dengan kincir-kincir air zaman dahulu.

Dimana turbin modern saat ini merupakan kemenangan dari kemajuan teknologi dari cabang-cabang bidang teknik seperti mekanika zat cair, ilmu logam dan mekanika teknik.

Jenis-jenis utama turbin yang dipergunakan untuk hidrolistrik pada saat ini adalah :

- (i) Turbin Francis 1849,
- (ii) Turbin Pelton 1889,
- (iii) Turbin baling-balin dan Kaplan 1913, dan
- (iv) Turbin Deriaz 1945



Gambar.4. Penggerak dari tipe-tipe turbin

( Sumber Pustaka 3 )

---

Keempat turbin saling berlainan dalam berbagai hal walaupun pola dasarnya sama untuk masing-masing. Masing-masing turbin terdiri dari penggerak (runner) dengan bilah-bilah lengkung atau baling-baling yang disusun sedemikian rupa sehingga air dapat mengalir melalui penggerak ini.

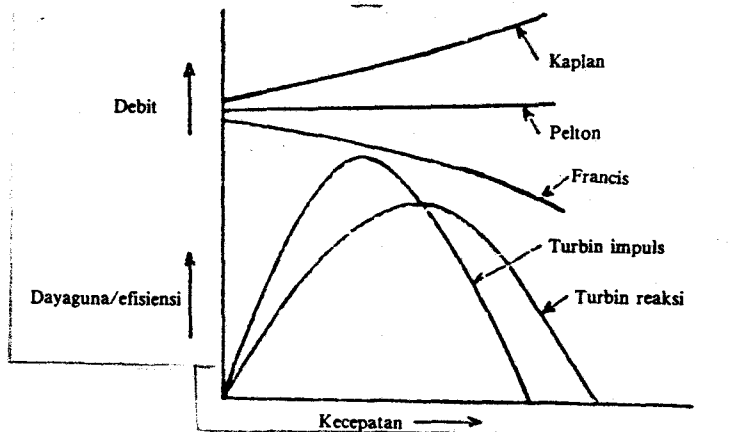
Dalam membedakan kehandalan (performance) turbin-turbin ini, segi-segi hidraulik seperti tekanan, ketinggian, arah aliran, kecepatan, dan tenaga akan dipergunakan sebagai elemen-elemen pembandingnya.

#### A. Penggolongan Berdasarkan Tekanan

Turbin Baling-baling, Kaplan, Francis dan Deriaz disebut dengan turbin reaksi atau turbin tekan, dimana penggerak turbin secara langsung mengubah tenaga kinetik juga tekanan secara bersamaan menjadi tenaga mekanik.

Sedangkan turbin Pelton dikategorikan dalam turbin impuls atau turbin tanpa tekanan, dimana tekanan air keluar melalui mulut pipa pemancar (nozzles) dan mengenai sudu-sudunya.

Pengelompokkan kedua jenis turbin ini berhubungan dengan daya guna (efisiensi) turbin terhadap kecepatan turbinnya.



Gambar.5. Karakteristik Turbin terhadap efisiensi dan debit  
( Sumber Pustaka 3 )

Dari gambar.5, dapat dilihat bahwa turbin reaksi memiliki efisiensi yang relatif besar dibanding turbin impuls.

#### B. Penggolongan Berdasarkan Tinggi Tekan

Tinggi tekan dapat dibedakan menjadi :

Tinggi tekan rendah	1 - 15 m
Tinggi tekan sedang	16 - 70 m
Tinggi tekan tinggi	71 - 500 m
Tinggi tekan sangat tinggi	> 500 m

Dari penggolongan ini untuk tinggi tekan rendah hanya turbin Baling/Kaplan yang dipergunakan.

Untuk tinggi tekan sedang, selain turbin Kaplan dapat dipergunakan juga turbin Francis.

Untuk tinggi tekan yang tinggi, dipergunakan turbin Francis atau Pelton.

Untuk tinggi tekan sangat tinggi, dipergunakan turbin Pelton .

### C. Penggolongan Berdasarkan Arah Aliran

Penggolongan ini dapat dilihat pada tabel.3.

Tabel.3. Arah Aliran dari tipe turbin

Jenis turbin	Arah aliran
Francis	Radial atau gabungan
Pelton	Tangensial
Baling-baling/Kaplan	Aksial
Deriaz	Diagonal

The diagram illustrates three flow patterns in turbines: (a) Axial flow, where water flows parallel to the axis of rotation; (b) Mixed flow, where water flows at an angle to the axis; and (c) Centrifugal flow, where water is drawn into the center and thrown outwards perpendicular to the axis.

Gambar 6. ( Sumber Pustaka 11 )

### D. Penggolongan Berdasarkan Debit

Turbin dapat juga disebut sebagai turbin debit rendah, sedang dan tinggi, hal ini hanya merupakan terminologi kualitatif. Dari gambar.5., dapatlah dilihat bahwa turbin Pelton, untuk ukuran perbandingan, adalah turbin dengan debit relatif rendah. Turbin Kaplan merupakan turbin dengan debit tinggi, sementara itu turbin Francis menempati kedudukan pertengahan.

### E. Penggolongan Berdasarkan Tenaga

Besarnya tenaga kuda (HP) yang dihasilkan oleh sebuah turbin dapat dinyatakan sebagai berikut :

Turbin Pelton	> 330.000 HP
Turbin Kaplan	> 150.000 HP
Turbin Francis/Deriaz	> 820.000 HP

### F. Penggolongan Berdasarkan Kecepatan Spesifik

Penggolongan tersebut dapat dilihat pada 2 tabel berikut;

Penggerak	Kecepatan khusus (putaran dalam semenit, rpm)		
	Lambat	Sedang	Cepat
Pelton	4—15	16—30	31—70
Francis	60—150	151—250	251—400
Kaplan	300—450	451—700	701—1100

( Sumber Pustaka 3 )

Tabel.4. Penggolongan Turbin atas kecepatan spesifik



Ns	Turbine type
4 to 35	Pelton with 1 nozzle
17 to 50	Pelton with 2 nozzles
24 to 70	Pelton with 4 nozzles
80 to 120	Francis turbine, low speed
120 to 220	Francis turbine, normal
220 to 350	Francis turbine, high speed
350 to 430	Francis turbine, express
300 to 1000	Propeller and Kaplan

Tabel.5. Hubungan Putaran Spesifik dan Tipe.  
( Sumber Pustaka 7 )

#### G. Penggolongan Berdasarkan Diameter

Kecenderungan sekarang ialah hendak menggunakan turbin yang makin besar. Salah satu alasan pokok atas kecenderungan ini ialah efisiensi hidraulik yang semakin meningkat karena ukurannya (menghasilkan daya yang semakin besar). Besarnya diameter untuk tiap-tiap turbin dapat dilihat pada tabel berikut ;

Tabel.6., Diameter dari tiap tipe turbin

Jenis penggerak	Maks. ketinggian dalam m	Maks. tenaga dalam tk	Maks. diameter roda, dalam m	Kecepatan khusus
Pelton	300-2000	3.30.000	5,5	4-70
Francis	30-500	9.60.000	10	60-400
Kaplan	2-70	300.000	10	300-1100

( Sumber Pustaka 3 )

### 2.2.5. Turbin Kaplan

Turbin ini merupakan turbin aksial, dimana penggeraknya menyerupai sebuah ulir atau sebuah baling-baling .

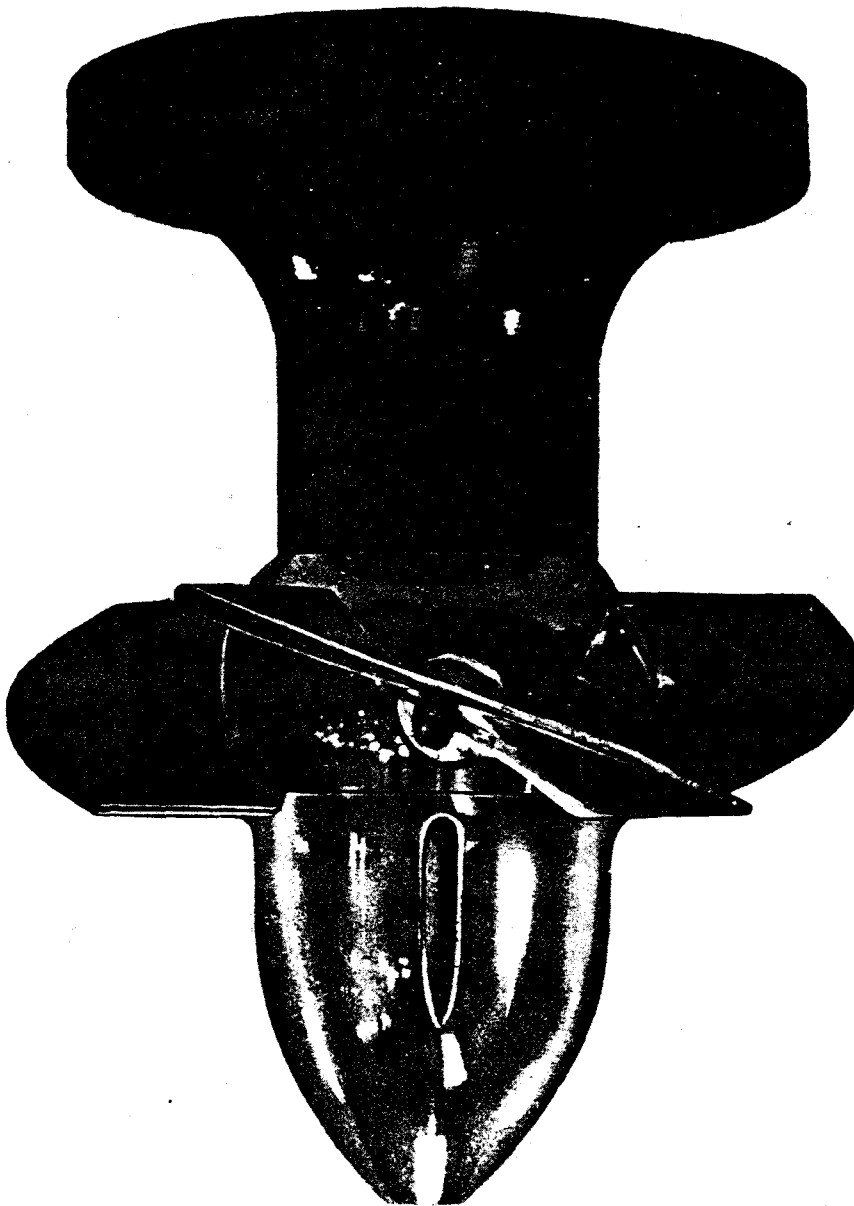


FIG. 14.16 Runner of Kaplan turbine  
(By courtesy of the Armfield Hydraulic Engineering Co., Ltd.)

Gambar . 7. Profil Turbin Kaplan

( Sumber Pustaka 12 )

Sudu-sudu pada turbin Kaplan dikelompokkan dalam 2 bagian yaitu sudu jalan dan sudu antar. Dimana air masuk melalui sudu antar yang tidak bergerak, mengarahkan arah aliran air untuk mengenai sudu jalan yang bergerak, sehingga mencapai efisiensi yang optimum.

#### A. Penentuan Diameter Sudu Jalan Dan Sudu Antar

##### (i). Diameter Sudu Jalan (D)

Diameter sudu jalan turbin ditentukan dari data-data proyek pembangkit listrik tenaga air yang telah dibangun selama ini. Seperti tertera pada tabel.6.

##### (ii). Diameter Hub (d)

Diameter hub sudu jalan ditentukan dengan menggunakan rumus perbandingan berikut :

$$d/D = k, \text{ untuk head } < 5 \text{ m}, \dots\dots\dots (*) \text{ (Pers. 6)}$$

$d/D = 0,3$	jumlah blade; 3 buah
$d/D = 0,4$	jumlah blade; 4 buah
$d/D = 0,5$	jumlah blade; 5 buah
$d/D = 0,55$	jumlah blade; 6 buah
$d/D = 0,6$	jumlah blade; 8 buah
$d/D = 0,7$	jumlah blade; 10 buah

dimana,

$d$  = diameter hub, m

$D$  = diameter sudu jalan, m

## B .Perencanaan Sebuah Sudu Jalan

Pada saat aliran air mengena sudu jalan turbin maka akan terjadi dua gaya angkat (lift) yang bersifat menguntungkan karena gaya ini yang menimbulkan putaran turbin, dari gaya tahan (drag) yang merugikan karena gesekan fluida dengan sudu jalan yang mengakibatkan kerugian hidrolis, oleh karenanya gaya tahan ini diusahakan sekecil mungkin.

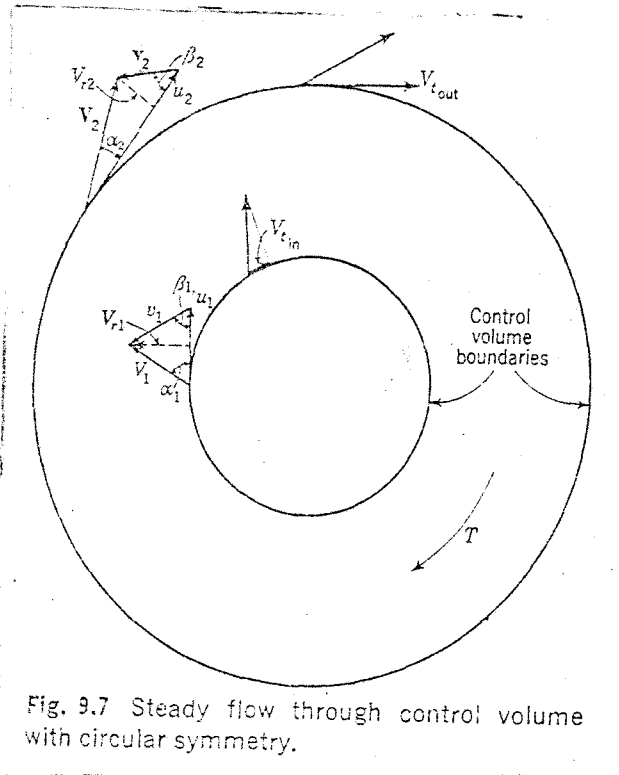
Untuk maksud di atas maka bentuk sudu jalan diharapkan streamline dan penghalus dan sudu jalan dengan derajat tinggi untuk memperoleh efisiensi tinggi. Sehingga profil sudu jalan mengikuti bentuk aerofoil yang diharapkan mencapai maksud di atas serta lebih menjamin kekuatan mekanik sudu.

Untuk memudahkan hasil perhitungan dan penggambaran dari sudu jalan yang akurat serta mudah, maka penganalisaannya sebaiknya dengan membagi menjadi beberapa bagian .

### B.1. Perhitungan Kecepatan

Yang dimaksud perhitungan kecepatan di sini adalah untuk mendapatkan antara lain ; kecepatan relatif rata-rata, sudut aliran masuk, sudut aliran keluar, dan sudut kecepatan relatif rata-rata yang mana

besaran-besaran di atas dapat ditentukan dari segitiga kecepatan .



**Gambar B. Gambar sirkulasi aliran pada sudu**  
( Sumber Pustaka 15 )

### B.1.1. Kecepatan Keliling Sudu jalan (U)

Ditentukan dengan menggunakan rumus ;

$$U = W \times r \quad (\text{m/s}), \dots \dots \dots (\text{Pers. 7})$$

dimana,

U = kecepatan keliling sudu jalan, m /s

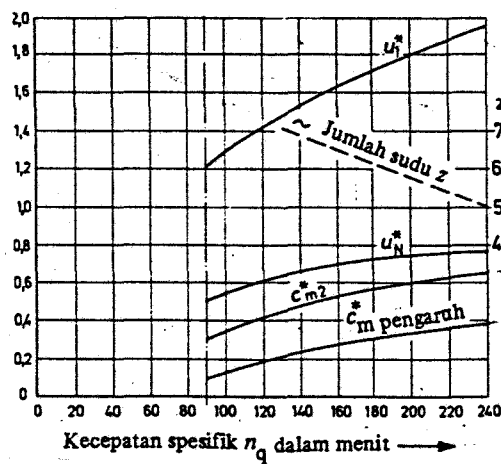
r = radius dari sudu jalan untuk tiap

bagian silindris.

$$W = 2\pi N_g/60, \text{ kecepatan sudu jalan, rad/s}$$

### B.1.2. Kecepatan Air Keluar Sudu Jalan (C2)

Diasumsikan sama dengan kecepatan air saat memasuki sudu antar menuju luar.



Gambar 9. Pencarian Kecepatan Spesifik

(Sumber Pustaka 6)

Maka kecepatan air keluar yang sebenarnya didapatkan dengan rumus :

$$C2 = Cs (2gH)^{0,5}, \dots (\text{Pers. 8})$$

### B.1.3. Kecepatan Keliling Spesifik (u)

Kecepatan keliling spesifik turbin di bagian masuk sudu maupun keluar sudu sama besarnya, yaitu ;

$$u = U / (2gH)^{0,5}, \dots (\text{Pers. 9})$$

### B.1.4. Komponen kecepatan absolut spesifik ke arah tangensial ( $Cu1$ )

Harga kecepatan absolut spesifik ke arah tangensial dapat ditentukan dengan persamaan Euler:

$$[(U1.Cu1) - (U2.Cu2)] / 2gH = \eta_h / 2$$

sehingga,

$$(U1.Cu1) - (U2.Cu2) = \eta_h / 2, \dots (\text{Pers. 10})$$

untuk turbin aksial  $U1 = U2$  dan untuk mencapai output yang maksimum  $Cu2 = 0$ , maka persamaan menjadi;

$$U1.Cu1 = \eta_h / 2, \dots (\text{Pers. 11})$$

dimana  $\eta_h$  adalah efisiensi hidrolik yang besarnya berkisar 0,85 - 0,9,

### B.1.5. Penggambaran Segitiga Kecepatan

Dari perhitungan kecepatan spesifik untuk

kecepatan kelilingnya serta kecepatan absolut spesifik maka dapat digambarkan segitiga kecepatan dengan metode Braun's.

Diagram dimana kecepatan absolut spesifik ke arah meridian ( $C_m$ ) pada turbin aksial sama dengan kecepatan keluar spesifik ;

$$C_m = C_{m1} = C_{m2} = C_2, \dots \text{(Pers. 12)}$$

Untuk penggambaran dengan diagram Braun perlu diketahui besar  $C_1$  (kecepatan indikatif) dengan rumus ;

$$\eta_h = C_1^2 - C_2^2 - W_z^2, \dots \text{(Pers. 13)}$$

dimana,

$\eta_h$  = efisiensi hidrolik

$C_2 = C_m$  = merupakan kecepatan spesifik ke arah meridian

$W_z$  = specific-shock velocity

sehingga,  $\eta_h = C_1^2 - C_2^2$

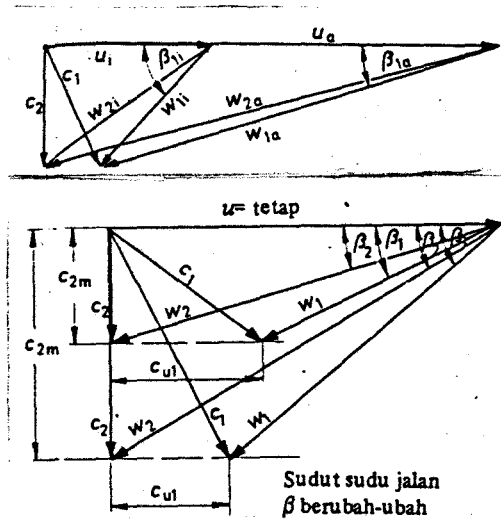
$$\longleftrightarrow C_1 = (\eta_h + C_2^2)^{0,5}, \dots \text{(Pers.14)}$$

Setelah didapatkan besaran-besaran yang diperlukan maka segitiga kecepatan dapatlah



digambarkan dengan memberikan skala tertentu pada segitiga kecepatan tersebut.

Berikut adalah penggambaran dari diagram Braun's;



Gambar 10. Diagram Braun's  
( Sumber Pustaka 6 )

Dari diagram Braun akan didapatkan :

- i). Kecepatan absolut ke arah tangensial ;  
Dengan diketahuinya kecepatan spesifiknya maka kecepatan absolut ke arah tangensial
- ii). Kecepatan relatif spesifik rata-rata untuk tiap bagian sudu jalan menggunakan persamaan :

$$W_2^2 = C_m^2 + [u - (c_{u1} + c_{u2})/2]^2, \dots (\text{Pers. 15})$$

karena  $c_{u2} = 0$  maka persamaan menjadi

$$W_2 = [C_m^2 + (u - c_{u1}/2)^2]^{0,5}, \dots (\text{Pers. 16})$$

iii). Sudut aliran relatif rata-rata ( $\beta_2$ )

Sudut aliran relatif dapat dicari dengan menggunakan

rumus :

$$\text{tg } \beta_2 = C_m / [u - (c_{u1} + c_{u2})/2], \dots (\text{Pers. 17})$$

dimana,  $c_{u2} = 0$  dan  $C_m = C_2$ , sehingga

$$\beta_2 = \text{arc tg } [C_2 / (u - c_{u1}/2)], \dots (\text{Pers. 18})$$

iv). Sudut Aliran Keluar ( $\beta_{2A}$ )

Dengan diagram Braun didapat sudut aliran fluida keluar dari sudu.

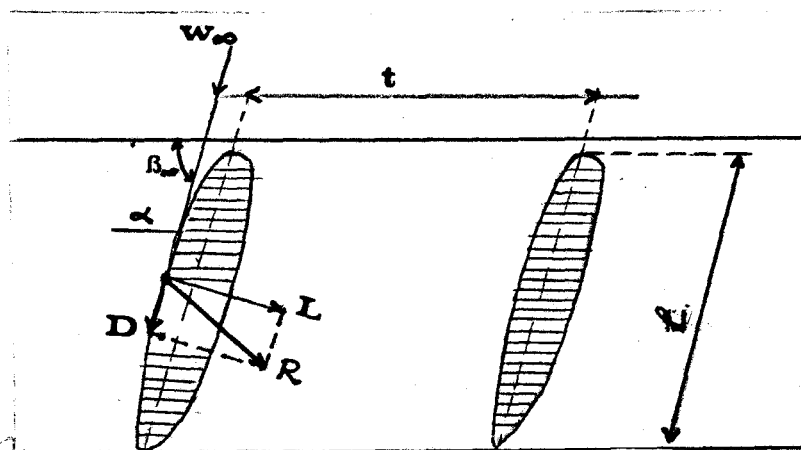
#### B.1.6. Perencanaan Bentuk Dan Ukuran Utama Sudu Jalan

Dalam perencanaan seperti yang diketahui sudu jalan dibagi menjadi beberapa bagian penampang silindris. Dan dari perhitungan kecepatan aliran relatif rata-rata yang didapat dari segitiga kecepatan Braun ternyata berbeda untuk tiap penampang.

Hal ini dapat dikatakan bahwa setiap penampang mempunyai profil airfoil yang berbeda baik bentuk maupun posisinya. Oleh karenanya untuk menentukan

bentuk dan ukuran utama sudu jalan dilaksanakan untuk setiap penampang silindris yang ditinjau.

Untuk jenis profil airfoil yang dipakai sebagai bentuk penampang silindris maka beberapa faktor perencanaan harus dihitung dulu. Untuk itu diketahui terlebih dahulu penampang profil dan hubungannya dengan besaran yang akan ditentukan.



Gambar 11. Bagan Profil Sudu

Pada gambar di atas terjadi dua gaya, yaitu :

- Gaya Angkat (lift) :  $L = C_l \cdot \gamma \cdot w_\infty^2 \cdot b \cdot l / 2g$  (Pers.19)
- Gaya Tahan (Drag):  $D = C_d \cdot \gamma \cdot w_\infty^2 \cdot b \cdot l / 2g$  (Pers.20)

dimana,

$C_l$  = koefisien lif

$C_d$  = koefisien drag

- $\gamma$  = berat spesifik fluida  
 $g$  = percepatan gravitasi bumi  
 $b.l.$  = luasan rata-rata yang terkena fluida  
 $w_s$  = kecepatan relatif rata-rata fluida

#### A. Perhitungan Jarak Antara Dua Sudu (pitch)

Jarak antara dua sudu (pitch) pada setiap penampang silindris sudu jalan dapat dihitung dengan rumus:

$$t = \pi.d / z , (mm)....(pers.21)$$

dengan,

$d$  = diameter setiap penampang silindris sudu, mm

$z$  = jumlah sudu jalan

#### B. Perencanaan Chord-Spacing Ratio ( $l/t$ )

Adalah perbandingan antara chord sudu ( $l$ ) dengan jarak antara dua buah sudu ( $t$ ). Harga perbandingan ( $l/t$ ) ini bervariasi sepanjang radius sudu jalan dan ke arah hub harganya semakin besar.

Perencanaan perbandingan ini ditentukan dengan coba-coba (trial and error) hingga mencapai harga yang diinginkan dan sesuai dengan perhitungan besaran yang lain.

### C. Perhitungan Panjang Chord (l)

Panjang chord sudu (l) dari setiap penampang silindris sudu jalan dapat dihitung berdasar hubungan :

$$l = (l/t) \cdot t \quad (\text{mm}) \dots (\text{Pers.22})$$

dimana,

l = panjang chord, mm

(l/t) = perbandingan panjang chord dengan pitch rencana

t = jarak antara dua sudu (pitch) pada setiap penampang sudu jalan, mm

### D. Perhitungan Harga Koefisien Angkat, Cl

Untuk menentukan besarnya Cl didapat dengan hubungan :

$$Cl = [Cl \cdot (l/t)] / (l/t) \dots (\text{Pers.23})$$

dengan harga [Cl.(l/t)] yang besarnya dapat ditentukan dari perumusan;

$$[Cl \cdot (l/t)] = 2 \cdot g \cdot H_h \cdot C_m / [W_a^2 \cdot U \sin (\beta_a - \lambda)]$$

jadi besarnya koefisien angkat,

$$Cl \cdot (l/t) = 2 \cdot g \cdot H_h \cdot C_m / [l/t \cdot W_a^2 \cdot U \sin (\beta_a - \lambda)] \dots (\text{Pers.24})$$

### e. Perhitungan Koefisien Tahan, Cd

$$\text{tg } \lambda = D/L = Cd/Cl ; \text{ ---- } Cd = Cl \cdot \text{tg } \lambda$$

$$\dots (\text{Pers.24})$$

dimana,

$\lambda$  = besar sudut lancar (gliding angle), semakin kecil  
harga sudut kamar maka profil airfoil lebih baik

Dari perhitungan-perhitungan di atas maka dapat  
ditentukan jenis profil sudu yang direncanakan berdasar  
standar profil dari Aerodynamic Institut in Gottingen.

Dimana untuk pemilihannya berdasar pada harga  $C_l$  dan  $C_d$ .

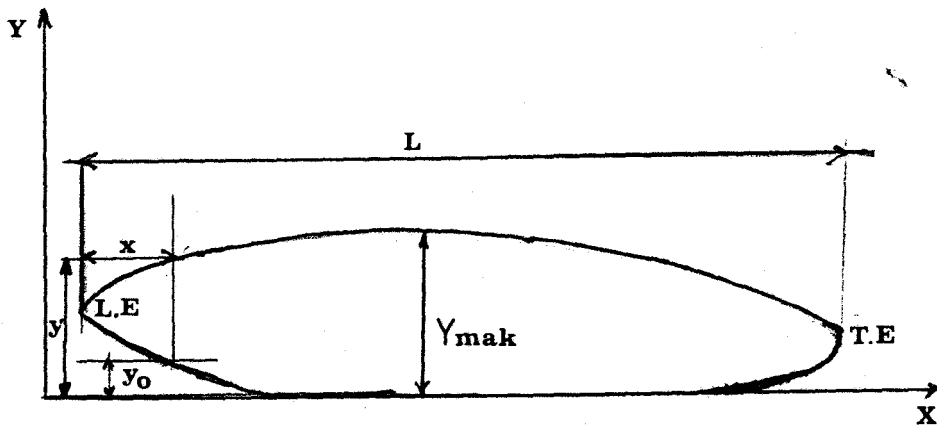
		DIMENSIONS OF AERODYNAMIC PROFILES																
Profile No.	$x\%$	0	1-25	2-5	5-0	7-5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
387	$y$	3-2	6-25	7-65	9-4	10-85	11-95	13-40	14-40	15-05	14-6	13-35	11-35	8-90	6-15	3-25	1-75	0-15
	$y_0$	3-2	1-50	1-05	0-55	0-25	0-10	0-00	0-00	0-20	0-40	0-45	0-50	0-45	0-30	0-15	0-05	0-15
490	$y$	2-00	3-60	4-60	5-95	7-00	7-70	8-65	9-20	9-60	9-05	8-55	7-45	6-05	4-40	2-50	1-45	0-15
	$y_0$	2-00	0-85	0-50	0-15	0-00	0-00	0-20	0-40	0-95	0-80	0-80	0-60	0-40	0-15	0-00	0-05	0-15
623	$y$	3-25	5-45	6-45	7-90	9-05	9-90	10-95	11-55	12-00	11-70	10-65	9-15	7-35	5-15	2-80	1-60	0-30
	$y_0$	3-25	1-95	1-50	0-90	0-35	0-20	0-10	0-05	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00
624	$y$	4-00	7-15	8-50	10-40	11-75	12-85	14-35	15-30	16-00	15-40	14-05	12-00	9-50	6-60	3-55	2-00	0-50
	$y_0$	4-00	2-25	1-65	0-95	0-60	0-40	0-15	0-05	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00	0-00
Munk 6	$y$	0-00	1-98	2-81	4-03	4-94	5-71	6-82	7-55	8-22	8-05	7-26	6-03	4-58	3-06	1-55	0-88	0-00
	$y_0$	0-00	-1-76	-2-20	-2-73	-3-03	-3-24	-3-47	-3-62	-3-70	-3-90	-3-94	-3-82	-3-48	-2-83	-1-77	-1-08	0-00
NACA 23012	$y$	0-00	2-67	3-61	4-91	5-80	6-43	7-19	7-50	7-55	7-14	6-41	5-47	4-36	3-08	1-68	0-92	0-00
	$y_0$	0-00	-1-23	-1-71	-2-26	-2-61	-2-92	-3-50	-3-97	-4-46	-4-48	-4-17	-3-67	-3-00	-2-16	-1-23	-0-70	0-00
443	$y$																	
	$y_0$	0-00	0-60	0-85	1-15	1-45	1-60	1-90	2-15	2-50	2-50	2-35	2-05	1-60	1-15	0-65	0-30	0-00

Tabel.7. Daftar Standar Profil

( Sumber Pustaka 7 )

#### f. Perhitungan Titik-titik Koordinat Garis Bentuk Profil

Untuk dapat menggambar bentuk profil airfoil dari setiap penampang silindris sudu jalan maka harus dihitung dulu titik-titik koordinat garis bentuk profil.



Gambar. 12. . Koordinat Profil.

Dari gambar. 12) titik-titik koordinat dapat dihitung dengan

rumus :

$$X' = (x/100).l. \dots\dots (Pers.25)$$

$$Yo' = (Yo/100).l.f' \dots\dots (Pers.26)$$

$$Y' = (x/100).l.f' \dots\dots (Pers.27)$$

dimana,

- $(x',y')$  dan  $(x',yo')$  adalah titik koordinat dari bentuk profil yang direncanakan.
- $(x,y)$ , dan  $(xo',yo')$  adalah titik koordinat dari profil standar yang dinyatakan dalam % panjang dan dapat

dilihat pada tabel dimensi profil aerodynamic tabel.7.

- $f'$ , faktor penebalan dan penipisan bentuk profil,  
dimana

$$f' = (Y_{mak}/l)' / (Y_{mak}/l)_{standar} \dots (Pers.28)$$

#### G. Perbandingan $Y_{mak}/l$

Harga perbandingan  $Y_{mak}/l$  adalah perbandingan antara tinggi maksimum penampang airfoil terhadap panjang chord.  $Y_{mak}/l$  standar dapat dilihat pada tabel dimana aerodynamic profil. Sedangkan  $(Y_{mak}/l)'$  yang direncanakan, biasanya akan semakin kecil dengan bertumbuhnya radius penampang silindris sudu jalan.

#### H. Penentuan Sudut Serang, $\alpha$

Sudut serang (angle of attack) adalah sudut antara chord airfoil dengan arah kecepatan relatif rata-rata fluida ( $W_{\infty}$ ). Besar sudut serang untuk setiap profil dari potongan silindris sudu dapat dihitung dengan rumus ;

$$Cl = 4,4 (Y_{mak}/l) + 0,092 \alpha \dots (Pers.29)$$

sedangkan posisi kerja profil airfoil ditentukan besarnya sudut yang terbentuk oleh kecepatan relatif rata-rata fluida masuk profil dikurangi sudut serangnya, yaitu  $\angle \beta_{\infty} - \alpha$



### B.1.7. Perhitungan Titik Berat Profil Sudu

Penentuan titik berat profil dimaksud untuk penempatan kaki sudu jalan yang menempel pada hub agar seimbang. Secara keseluruhan sumbu sudu adalah tempat kedudukan titik berat airfoil dari masing-masing penampang silindris. Karena tipe profil airfoil yang digunakan masing-masing penampang silindris sudu jalan mempunyai bentuk yang sebangun, sehingga dapat dianggap posisi titik berat profil airfoil untuk masing-masing penampang silindris tersebut mempunyai harga perbandingan yang sama. Analisa perhitungannya dengan membagi profil menjadi beberapa bagian yang berbentuk segiempat. Dimana tiap segiempat mempunyai luasan  $A$  dengan titik berat pada daerah segiempat tersebut. Maka untuk titik berat seluruhnya dengan menggunakan rumus :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \dots\dots(\text{Pers.29})$$

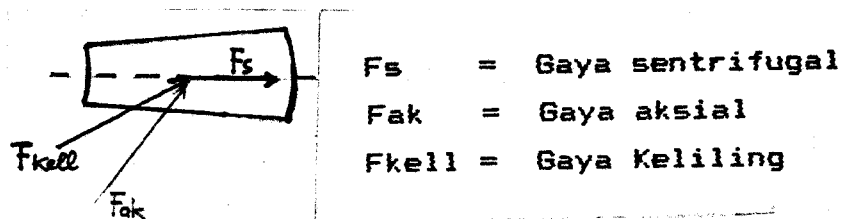
### B.1.8. Perhitungan Gaya-gaya yang bekerja pada Sudu Jalan

Maksud dari perhitungan gaya-gaya ini adalah untuk mengetahui kekuatan sudu jalan dalam hal tegangan-tegangan yang timbul saat operasi. Jika diperhatikan maka tegangan yang terbesar akan terjadi

pada bagian kaki sudu yang berhubungan dengan penampang silindris, karena bagian ini yang terpasang pada hub (yang terasir).

Adapun gaya-gaya yang bekerja pada sudu jalan adalah :

- Gaya Aksial ( $F_a$ )
- Gaya Keliling ( $F_u$ )
- Gaya Sentrifugal ( $F_c$ )



Gambar. 13 Gaya-gaya yang bekerja

Dari gambar 11. dapat dilihat gaya yang bekerja dan arahnya pada sudu jalan dengan asumsi bahwa gaya-gaya tersebut bekerja pada titik berat sudu jalan.

#### A. Gaya Aksial

Gaya aksial yang bekerja pada sudu ditimbulkan oleh

adanya tekanan fluida. Besar gaya aksial pada tiap sudu dapat dihitung berdasar rumus ;

$$F_a = \pi \cdot \gamma_{air} \cdot (D^2 - d^2) \cdot H_{max} / (4 \cdot Z) \cdot (kg)$$

.....(Pers.30)

dimana,

D = diameter sudu jalan, m

d = diameter hub, m

H = tinggi jatuh maksimum, m

Z = jumlah sudu jalan

$\gamma$  = berat spesifik air,  $kg/m^3$

#### B. Gaya Keliling ( $F_u$ )

Gaya keliling disebabkan karena momen torsi,

$$F_u = 716,2 \cdot P / (Z \cdot R_t \cdot n) \cdot (kg) \dots(Pers.31)$$

dengan ,

Z = Jumlah bilah sudu jalan

P = Daya Output Turbin

n = Putaran Turbin , Rpm

$R_t$  = Jarak titik berat sudu terhadap sumbu hub.

Untuk menentukan  $R_t$  maka pada sudu jalan , dilakukan perhitungan dengan analisa pendekatan yaitu dengan analisa volume sudu. Untuk mendapatkan volume satu sudu jalan, terlebih dahulu dihitung masing-masing penampang silindris,

dengan cara membagi masing-masing penampang profil atas segiempat-segiempat kecil

Jarak titik berat sudu terhadap hub didapat dengan ;

$$R_t = \frac{\sum_{i=1}^n V_i (R + \Delta R/2 + (i-1) \cdot \Delta R)}{\sum_{i=1}^n V_i} \dots (\text{Pers.32})$$

dimana,

$R_t$  = jarak titik berat sudu terhadap pusat hub, m

$V_i$  = volume bagian sudu antara profil airfoil penampang silinder ke-i,  $m^3$ , dan penampang silindris ke  $i + 1$

$\Delta R$  = jarak antara tiap-tiap penampang silindris, m

$R$  = jari-jari hub, m

Perhitungan volume dan jarak titik berat volume terhadap sumbu hub untuk masing-masing volume diantara penampang silindris.

### C. Gaya Sentrifugal ( $F_c$ )

Gaya sentrifugal timbul akibat adanya putaran turbin. Gaya ini akan menjadi lebih besar saat turbin mengalami putaran liar, dimana putaran turbin mencapai 2,5 - 3 kali putaran normalnya.

Tabel.8. Hubungan antara jenis turbin dan kecepatannya

Jenis Turbin	Kecepatan liar (% Kecepatan kerja)
Kaplan	250 - 300
Francis	200
Pelton	kurang 200

Besar gaya sentrifugal diperoleh dari persamaan ;

$$F_c = M \cdot R_t \cdot W^2 \text{ (kg)} \dots \text{(Pers.33)}$$

dimana,

M = massa bilah sudu jalan, kg

W = kecepatan sudu jalan =  $2\pi n/60$  rad/s

R<sub>t</sub> = jarak titik berat sudu terhadap hub, m

Massa bilah sudu jalan dihitung dengan cara mengalikan volume sudu dengan massa jenis bahan sudu.

#### B.1.9. Perhitungan Momen Bengkok

Momen bengkok maksimum akan terjadi pada kaki sudu yang berhubungan dengan potongan silindris .

Momen Bengkok ini disebabkan oleh adanya gaya-gaya yaitu, gaya aksial dan gaya keliling.

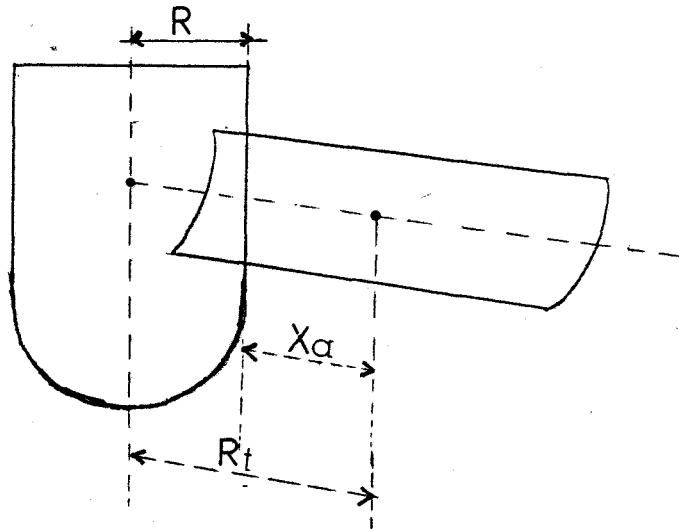
a. Momen Bengkok akibat gaya aksial (F<sub>a</sub>)

$$M_a = F_a \cdot X_a \text{ (kg.m)} \dots \text{(Pers.34)}$$

dimana,

$X_a$  = Jarak titik berat sudu dengan hub,  
seperti pada gambar.

dimana  $X_a = R_t - R$  (m) ;  $F_a$  = Gaya Aksial, (kg)



Gambar 14. Posisi Perhitungan Momen Bengkok

b. Momen Bengkok akibat Gaya Keliling

Momen bengkok yang diakibatkan oleh gaya keliling dapat dinyatakan dengan :

$$M_v = F_v \cdot X_a \text{ (kg.m)} \dots\dots \text{(Pers.35)}$$

dimana,

$F_v$  = gaya keliling, kg

$X_a$  = jarak titik berat sudu dengan hub, m

Resultan momen bengkok dapat dinyatakan dengan hubungan :

$$M_b = M_a \cdot \cos(\beta_m) + M_v \cdot \sin(\beta_m), \text{ kg.m ... (Pers.36)}$$

dimana,  $\beta_m =$  sudut kerja profil airfoil,  $\beta_m = \alpha$

B.1.10. Perhitungan Tegangan-tegangan yang terjadi pada kaki sudu

a. Perhitungan Tegangan karena momen bengkok

Tegangan bengkok yang terjadi pada kaki sudu penumpu beban dapat dihitung berdasarkan persamaan :

$$\sigma_b = M_b \cdot c / I, \text{ kg/cm}^2 \text{ ..... (Pers.37)}$$

dimana,

$M_b =$  momen bengkok yang terjadi pada kaki sudu penumpu beban, kg.m

$c =$  jarak terjauh penampang terhadap sumbu netral diukur secara tegak, m

$I =$  momen inersia luas penampang kali sudu jalan, ( $\text{m}^4$ )

Untuk menghitung momen inersia luasan penampang kaki sudu yang menumpu beban, maka momen inersia luas penampang diperhitungkan terhadap garis sumbu yang tegak lurus dengan posisi kerja momen bending ( $M_b$ ).

Untuk mempermudah perhitungan dan mencapai ketelitian maka luasan penampang dibagi menjadi luasan kecil segiempat yang masing-masing mempunyai vektor gaya bertitik tangkap pada sumbu sudu tempat kedudukan titik berat luasan profil

penampang silindris.

Karena yang berhubungan dengan kaki sudu jalan adalah profil silindris maka perhitungan momen inersinya juga pada potongan silindris profil .

Adapun rumus yang dipakai untuk menentukan momen inersia terhadap :

$$\text{- sumbu x ; } I_x = \int y^2 \cdot dA \text{ atau } I_x = \sum_{i=1}^n A_i \cdot Y_i^2$$

.....(Pers.38)

$$\text{- sumbu y ; } I_y = \int x^2 \cdot dA \text{ atau } I_y = \sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i^2$$

.....(Pers.39)

$$\text{- sumbu xy ; } I_{xy} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i \cdot Y_i \text{ .....(Pers.40)}$$

dimana,

$Y_i$  = ordinat dari segiempat ke-i terhadap sumbu Y

$X_i$  = absis dari segiempat ke-i terhadap sumbu X

$A_i$  = luasan segiempat ke-i, dalam analisa perhitungan luasan dibagi beberapa bagian luas segiempat

Pada diagram luas penampang kaki sudu yang menahan beban, momen inersia dihitung terhadap sumbu netral X, dan rumus yang digunakan :

$$I = I_x' \cdot \cos^2 \beta_m + I_y' \cdot \sin^2 \beta_m - 2I_{xy}' \cdot \sin \beta_m \cdot \cos \beta_m$$

.....(Pers.41)



dimana,

$$I_{x'} = I_x - A(\bar{Y})^2 ; I_{x'y'} = I_{xy} - A\bar{x}\bar{y}$$

$$I_{y'} = I_y - A(\bar{X})^2 ; A = \sum_{i=1}^n A_i, \text{ adalah luas total segiempat}$$

dimana ;

$I_{x'}$  dan  $I_{y'}$  adalah Momen Inersia terhadap Sumbu  $X'$  dan  $Y'$

$\bar{Y}$  adalah ordinat titik berat profil terhadap sumbu  $XY$

$\bar{X}$  adalah absis titik berat profil terhadap sumbu  $XY$

$\beta_m$  adalah sudut kerja momen bending atau sudut kerja profil sehingga Momen Inersia :

$$I = I_{x'} \cdot \cos^2 \beta_m + I_{y'} \cdot \sin^2 \beta_m - 2I_{x'y'} \cdot \sin \beta_m \cdot \cos \beta_m$$

sedangkan  $c$  : jarak terjauh penampang terhadap sumbu netral diukur secara tegak lurus.

Jadi tegangan tarik karena momen bending :

$$\sigma_{tb} = M_b \cdot c / I , \text{ kg/cm}^2 \dots (\text{Pers.42})$$

#### b. Tegangan Tarik karena Gaya Sentrifugal

Pada kaki sudu penumpu beban yang terjadi gaya sentrifugal, dimana besarnya tegangan tarik diperoleh dari rumus :

$$\sigma_{tc} = F_c / A , \text{ kg/cm}^2 \dots (\text{Pers.43})$$

dimana,

$F_c$  = gaya sentrifugal untuk amannya dipilih saat turbin mengalami putaran liar.

$A$  = luas penampang kaku sudu penampang beban

### c. Perhitungan Tegangan Geser

Tegangan geser terjadi karena gaya aksial dan gaya keliling dalam hal ini resultannya :

$$\tau_s = Fr / A, \text{kg/cm}^2 \dots (\text{Pers.44})$$

$$\text{dimana } Fr = [ Fa^2 + Fu^2 ]^{0,5}$$

### B.1.11. Perencanaan Bahan Sudu Jalan

Ada dua hal yang harus dipertimbangkan dalam memilih bahan sudu jalan , yaitu :

1. Harus mampu mengatasi besarnya gaya-gaya yang terjadi pada setiap bilah sudu jalan sehingga aman dalam kondisi operasi.
2. Tahan terhadap korosi yang terjadi akibat berada pada lingkungan laut yang bersifat korosif, terutama air laut.
3. Pengaruh Bio-fouling, yang terdapat pada ekologi laut

Untuk mengetahui kekuatan ijin dari bahan terhadap tegangan tarik maka ,  $[\sigma]_{\text{bahan}} = \sigma / n' \dots (\text{Pers.45})$

dimana,

$\sigma$  = tegangan tarik bahan =

$n'$  = faktor keamanan =  $n_1 \cdot n_2 \cdot n_3$

-  $n_1$  = faktor keamanan karena pembebanan, 1-1,5

-  $n_2$  = faktor keamanan karena ketidak-homogenan

material, dapat dilihat pada tabel. 9 .

Tabel.9. Faktor keamanan material ( Sumber Pustaka 8 ):

$\sigma_y / \sigma_u$	0,45-0,55	0,55-0,70	0,70-0,90	cast parts
$n_2$	1,20-1,50	1,40-1,80	1,70-2,20	1,60-2,50

untuk harga  $\sigma_y/\sigma_u$  tertentu, dari tabel.9. dapat ditentukan harga  $n_2$ .

-  $n_3$  = faktor keamanan karena kondisi pemakaian, 1-1,5

Keamanan pemakaian tentunya harus dibandingkan dengan tegangan-tegangan yang terjadi. Tegangan tarik total yang diakibatkan momen bending dan gaya sentrifugal,  $\sigma$  adalah ;

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_c \dots\dots(\text{Pers.46})$$

Tegangan gabungan antara tegangan tarik dan tegangan geser diperoleh dengan rumus di bawah, dimana penggabungan ini dianggap sebagai tegangan tarik pada luasan penampang kaki sudu.

$$\sigma_g = [ \sigma^2 + 3\sigma_s^2 ]^{0,5} \dots\dots(\text{Pers.47})$$

Dari hasil perhitungan tegangan yang terjadi pada kaki sudu dan tegangan ijin bahan ternyata ;

$$\sigma_g < [ \sigma ] \dots\dots(\text{Pers.48})$$

maka bahan dapat dikatakan aman dalam kondisi operasi.

### 2.2.6. Poros Turbin

Sebagai transmisi putaran dan daya dari turbin ke generator digunakan poros dengan posisi vertikal maupun horisontal, tergantung dari kondisi operasionalnya .

Akibat daya dan putaran operasionalnya akan terjadi torsi pada poros. Besarnya torsi yang terjadi dapat dihitung dengan rumus ;

$$M_t = 71.620 \frac{N}{n} , \text{ Kg.cm , .....(Pers.49)}$$

dimana

- N, adalah daya yang dihasilkan poros turbin (HP), pada perencanaan digunakan faktor koreksi daya transmisi yang dapat dilihat pada tabel

Tabel.10. Harga Faktor koreksi

Daya yang akan ditransmisikan	$f_c$
Daya rata-rata yang diperlukan	1,2-2,0
Daya maksimum yang diperlukan	0,8-1,2
Daya normal	1,0-1,5

( Sumber Pustaka 9 )

Harga N dapat diketahui dengan rumus ;

$$N = P \cdot f_c, \text{ (HP) .....(Pers.50)}$$

dimana ;

$f_c$  = faktor koreksi pada tabel.10.

$P$  = daya output turbin (HP)

- $n$ , adalah putaran turbin. Ada 2 macam putaran yang terjadi yaitu putaran normal dan saat putaran liar.

Pada poros juga bekerja gaya-gaya akibat momen torsi, maupun akibat berat perlengkapan pada poros, yang akan menghasilkan tegangan-tegangan pada poros

A. Gaya-gaya yang bekerja pada poros adalah ;

i). Gaya Keliling

Gaya ini diakibatkan oleh adanya momen torsi pada poros, besarnya dapat dihitung dengan rumus;

$$F_{kell} = M_t / 0,5.d \text{ , (Kg)....(Pers.51)}$$

dimana,

$M_t$  = Momen Torsi pada poros, Kg.mm

$D$  = Diameter Poros, mm

ii). Gaya Aksial

Gaya ini ada dua macam yaitu akibat aliran air dan berat rotor (sudu) sendiri,

$$F_{ak} = F_a + G_r \text{ , (Kg).....(Pers.52)}$$

dimana,



$F_a$  = gaya aksial karena aliran air, Kg

$G_r$  = gaya berat rotor, Kg

Untuk berat rotor terdiri atas ;

1) Berat poros

Dimana berat poros dihitung dengan rumus :

$$W_p = V_p \cdot m_j \cdot g, \text{ (Kg)....(Pers.53)}$$

dengan,

$$V_p = \text{Volume poros, m}^3$$

$$m_j = \text{massa jenis poros untuk bahan, Kg/m}^3$$

$$g = \text{percepatan gravitasi bumi, 9,8 m/s}^2$$

Dengan diketahuinya dimensi poros maka dapat dihitung volume dan berat poros.

2) Berat pengatur sudu, Kg

3) Berat Hub, Kg

4).Berat Tutup Hub, Kg

5).Berat Sudu Jalan, Kg

6) Berat Kopleng Flens, Kg

7) Berat Baut Pengikat Poros dengan Hub, Kg

Gaya aksial karena aliran air dari perhitungan adalah : $F_a$ , maka gaya aksial total yaitu ;

$$F_a = F_a + G_r, \text{ (kg).....(Pers.54)}$$

$$= F_a + W_p + W_b + W_h + W_{th} + W_s + W_{ks} + W_f + W_{bt}$$

Dengan diketahuinya gaya aksial yang bekerja pada poros maka dilakukan pemeriksaan terhadap kekuatan poros dengan dimensi yang direncanakan.

#### B. Tegangan-tegangan yang terjadi pada Poros

Pada penampang I-I merupakan penampang poros dengan diameter poros yang terkecil yang akan terjadi tegangan terbesar dari diameter lainnya.

##### i). Tegangan geser

Tegangan yang diakibatkan oleh momen torsi.

Besarnya dapat dihitung dengan rumus ;

$$\tau_s = T \cdot C / I_p, \text{kg/mm}^2 \dots \dots \text{(Pers.55)}$$

dimana,

T = momen torsi yang terbesar yaitu pada saat turbin bekerja pada putaran normal, Kg.mm

C = Jarak kerja tegangan terhadap pusat poros, mm

$I_p = \text{Momen Inersia Polar} = \pi (d_o^4 - d_i^4) / 32$

Karena adanya perubahan diameter poros maka perlu diperhitungkan adanya konsentrasi tegangan sehingga tegangan menjadi :

$$\tau_s' = k_t \cdot \tau_s, (\text{kg/mm}^2) \dots \dots \text{(Pers.56)}$$

dimana,

$k_t$  ; faktor konsentrasi tegangan poros yang dapat dilihat pada tabel.11 (juga dapat dilihat pada lampiran gambar 3 )

Tabel.11. Harga Faktor konsentrasi tegangan

D/d	1.5	1.2	1.1	1.1	1,05	1.05	1.02	1.02	1.01	1.01
r/d	0.12	0.08	0.1	0.17	0.08	1.4	0.05	0.16	0.04	0.10
$k_t$	1.8	1.8	1.55	1,4	1.5	0.12	1.45	1.25	1.4	1.25

( Sumber Pustaka 8 )

ii). Tegangan Tarik

Akibat gaya ke arah aksial , dimana besarnya didapat dengan rumus ;

$$\sigma = F / A , (N/m^2) \dots\dots (Pers.57)$$

dimana,

F = gaya yang bekerja pada poros, (N)

A = luasan yang terkena gaya,  $\pi/4 D^2$ ,  $m^2$

tegangan tarik ini akan dipengaruhi oleh faktor konsentrasi akibat perubahan diameter poros, oleh faktor D/d dan r/d .



Tegangan gabungannya adalah :

$$\sigma_g = [ (\sigma')^2 + 3 (\tau_s')^2 ]^{0,5}, \text{ N/mm}^2 \dots (\text{Pers.58})$$

iii).Tegangan Bengkok

Tegangan ini diakibatkan oleh gaya keliling pada poros. Dimana tegangan ini besarnya,

$$\sigma_b = Mb/W_b, (\text{N/m}^2) \dots (\text{Pers.59})$$

dimana,

$M_b$  = momen bengkok,  $0,5 \cdot F \cdot D$ , (N)

$W_b$  = momen tahanan bengkok =  $\pi/6 \cdot D \cdot t^2$ , ( $\text{m}^2$ )

Untuk mencari diameter poros yang diijinkan didapat dengan rumus:

$$d' = [ 5,1/\tau_a \times K_t \times C_b \times T ]^{1/3}, (\text{mm}) \dots (\text{Pers.60})$$

dimana,

$\tau_a$  = Tegangan geser yang diijinkan,  $\text{kg/mm}^2$

$$= \sigma_b / (Sf_1 \times Sf_2), \dots (\text{Pers.61})$$

dimana  $\sigma_b$  ; tegangan ultimate bahan  $\text{kg/mm}^2$

$Sf_1$  ; koreksi bahan, untuk baja = 6

$Sf_2$  ; koreksi konsentrasi tegangan

( berkisar 1,3-3 )

$K_t$  = Faktor koreksi momen puntir, berkisar 1,0-1,3

$C_b$  = Faktor koreksi beban lentur, berkisar 1,2-2,3

$T$  = Momen Puntir pada poros,  $\text{Kg.mm}$

$$= 9,74 \cdot 10^5 \text{ Pa} / n \dots (\text{Pers.62})$$

dimana ;  $P_d$  = Daya yang telah dikoreksi

$$= P \cdot f_c, , (KW)$$

dengan P ; daya turbin, KW

F<sub>c</sub>; koreksi faktor daya

### C. Pemeriksaan Poros Terhadap Defleksi Puntiran

Panjang dan diameter poros berpengaruh pada harga defleksinya jika poros beroperasi, untuk pemeriksaan digunakan rumus ;

$$\theta = 584 \cdot T \cdot l / ( D_o^4 [1 - (D_i/D_o)^4] \cdot G )$$

.....(Pers.63)

dimana,

$\theta$  = derajat defleksi puntiran, diisyaratkan 0,25-0,3 °/m

T = momen torsi, kg.mm

l = panjang poros, mm

G = modulus geser bahan untuk baja, 8,3 kg/m<sup>2</sup>

D<sub>o</sub> = diameter poros terluar, mm

D<sub>i</sub> = diameter poros dalam, mm

### D. Putaran Kritis Poros

Jika pada turbin terjadi penurunan beban yang tiba-tiba maka akan terjadi putaran liar. Bila terjadi hal demikian terus menerus maka tertentu dan dapat terjadi getaran yang luar biasa pada poros. Putaran ini disebut putaran kritis. Hal ini akan mengakibatkan kerusakan pada poros dan

bagian-bagian pendukungnya. Oleh sebab itu poros harus direncanakan sedemikian rupa, sehingga putaran kerjanya tidak melebihi putaran kritisnya.

Perhitungan putaran kritis dengan persamaan ;

$$N_c = 52.700 \cdot d_s^2 \cdot (1/w)^{0,5} / (l_1 \cdot l_2)$$

.....(Pers.64)

dimana,

- Nc = putaran kritis, Rpm
- ds = diameter poros seragam, mm
- l1 = jarak benda pada poros terhadap bantalan 1, mm
- l2 = jarak benda pada poros terhadap bantalan 2, mm
- l = panjang poros diantara dua bantalan, mm
- w = berat benda pada poros, kg

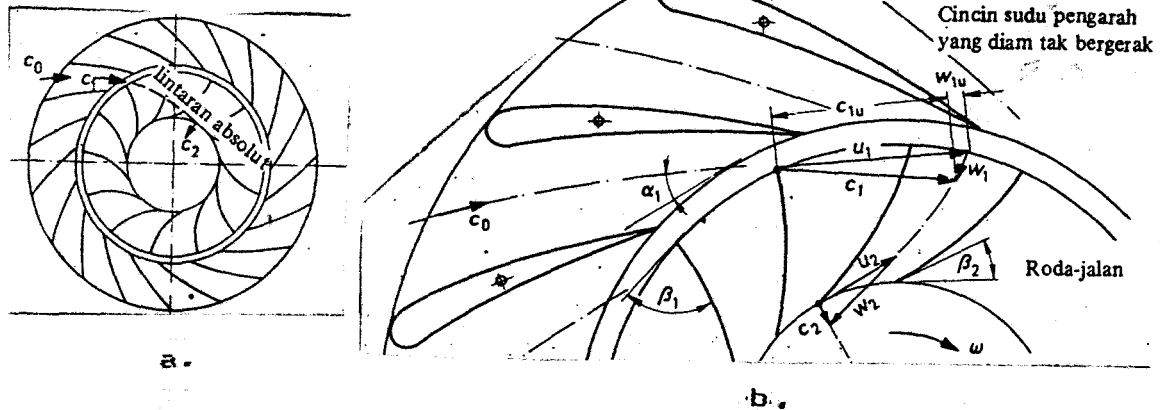
Jika tidak terdapat benda pada poros diantara dua bantalan, maka perhitungan putaran kritis hanya untuk poros sendiri.

### 2.3. DASAR PERENCANAAN SEBUAH SUDU ANTAR

Seperti pada sudu jalan perencanaan dari sebuah sudu antar berhubungan dengan kecepatan air masuk dan keluar dari sudu tersebut.

Adapun hubungan segitiga kecepatannya dapat dijabarkan pada

gambar 15.

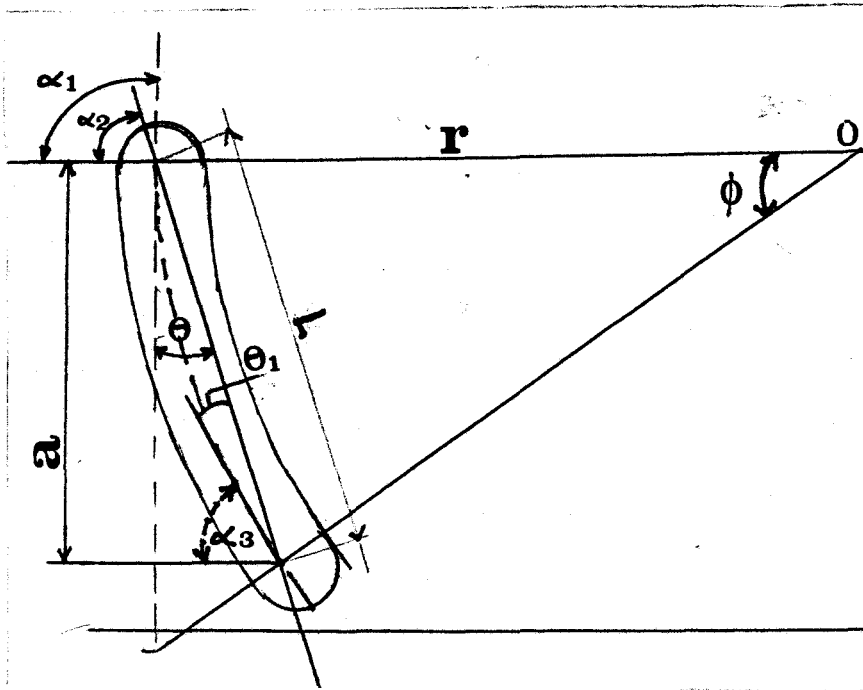


Gambar 15. Segitiga Kecepatan Sudu Antar  
( Sumber Pustaka 6 )

Pada gambar di atas air masuk ke sudu antar dan saat keluar sudu antar (guide Wheel) mempunyai kecepatan  $C_2$ . (merupakan kecepatan absolut) pada gambar a. Sebelum masuk ke sudu jalan air mempunyai kecepatan  $C_0$ , hal ini terjadi pada ruang antara sudu antar dan sudu jalan.

Kemudian saat masuk sudu jalan, kecepatannya menjadi  $C$  (gambar b)

Pada gambar  $C_1 > C_2$ . Karena energi kecepatan  $C_1$  digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga untuk menggerakkan turbin sehingga saat keluar dari turbin energinya turun, maka kecepatannya pun turun. Sudu antar direncanakan memiliki bentuk penampang silindris busur lingkaran seperti pada gambar berikut.



Gambar 16. Penampang Sudu Antar

( Sumber Pustaka 7 )

## A. Perhitungan Dimensi

Dimensi sudu antar yang direncanakan dihitung dengan menggunakan rumus di bawah ini :

A. Sudut kelengkungan sudu antar (sudut pusat),  $\phi$

$$\phi = \alpha_1 - \alpha_2 \dots (\text{Pers.65})$$

B. Sudut Chord,  $\alpha_2$

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \theta \text{ atau } \alpha_2 = \alpha_3 + \theta \dots(\text{Pers.66})$$

$$\text{dimana, } \theta = \theta_1 = \theta_2 = \phi / 2 = (\alpha_1 - \alpha_3) / 2$$

C. Panjang aksial, a

$$a = L \sin \alpha \dots(\text{Pers.67})$$

D. Sudut inklinasi,  $\alpha_3$

$$\text{tg } \alpha_3 = t. \text{ tg } \alpha_4 / (1 - S_0 / \sin \alpha_3) \dots(\text{Pers.68})$$

dimana,

$$\begin{aligned} \text{tg } \alpha_4 &= \text{sudut inklinasi kecepatan absolut} \\ &= C_{m4} / C_{u4} \end{aligned}$$

$$t = \text{jarak antara 2 sudu}$$

B. Perhitungan gaya yang bekerja pada sudu antar

Maksud dari perhitungan gaya ini adalah untuk mengetahui kekuatan sudu antar dalam hal tegangan yang timbul saat operasi.

Adapun gaya yang bekerja pada sudu antar adalah gaya aksial yang ditimbulkan oleh adanya tekanan fluida.

Besar gaya aksial pada tiap sudu (pada 2 sisi ; muka dan belakang) adalah :

$$F_{ak} = \rho . g . Q \quad (N), \dots(\text{pers.69})$$

dimana ,  $\rho$  = massa jenis air laut,  $\text{kg/m}^3$

$g$  = percepatan gravitasi bumi,  $\text{m/s}^2$

$Q$  = kapasitas air laut yang masuk sudu antar =  $A.V$

dimana ;  $A$  = Luasan ruang yang dimasuki arus,  
sebesar panjang  $\times$  tinggi

$V$  = kecepatan arus laut, m/s

Sedangkan tegangan yang terjadi pada luasan sudu yang terkena arus adalah ;

$$\tau = F_{ak} / A_{sd} , N/m^2 \dots (\text{pers.70})$$

dimana

$A_{sd}$  = luasan sudu yang terbebani gaya aksial

#### 2.4. DASAR PEMILIHAN BAHAN TERHADAP KOROSI

Dalam hubungannya dengan korosi, maka harga kandungan garam dari air laut merupakan penyebab utama dari timbulnya karat (korosi). Kandungan garam tersebut dapat dilihat pada tabel.12. di bawah ini.

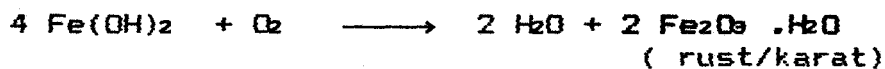
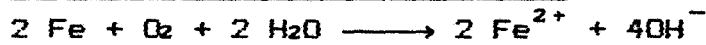
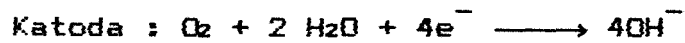
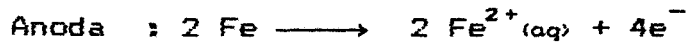
Tabel.12. Kandungan garam pada air laut

( Sumber Pustaka 14 )

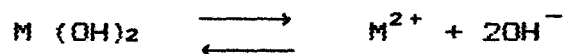
Major ions in solution in an 'open' sea water at S <sub>‰</sub> = 35.00	
Ions	(g/kg)
Total salts	35.1
Sodium	10.77
Magnesium	1.30
Calcium	0.409
Potassium	0.338
Strontium	0.010
Chloride	19.37
Sulphate as SO <sub>4</sub>	2.71
Bromide	0.065
Boric acid as H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.026
Dissolved organic matter = 0.001–0.0025 g, oxygen in equilibrium with atmosphere at 15°C = 0.008 g = 5.8 cm <sup>3</sup> /l.	

Konsentrasi garam inilah yang dapat menyebabkan terjadinya korosi yang mana prosesnya terjadi melalui proses elektrokimia, seperti di bawah ini :

Prosesnya :



Dari proses elektrokimia ini terlihat bahwa bila konsentrasi katoda (penghantar atau fluida) semakin besar maka logam anode akan mengalami korosi yang semakin besar, hal ini besarnya proses korosi itu tergantung dari besarnya kecepatan proses reaksi ( Sp ), seperti pada rumus di bawah;



$$Sp = \frac{C_{\text{M}^{2+}}}{n} \times \frac{C_{\text{OH}^{-}}^2}{\hspace{1cm}}$$

Sp = Besarnya kecepatan pelepasan ion - ion pada anoda dan besarnya nilai kecepatan perpindahan ion (reaksi korosi) tergantung pada nilai EMF (electromagnetic Force) dari tiap - tiap logam, seperti terlihat pada tabel berikut ini.



Tabel.13. Daftar Harga EMF logam

Reaksi elektroda	$E^{\circ}$ (volt)
$\text{Au}^+ + e^- = \text{Au}$	+1.68
$\text{Pt}^{2+} + 2e^- = \text{Pt}$	+1.20
$\text{Hg}^{2+} + 2e^- = \text{Hg}$	+0.85
$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	+0.80
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	+0.34
$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$	0.00
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0.13
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.14
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0.25
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.40
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.44
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0.71
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.76
$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1.67
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2.34
$\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$	-2.71
$\text{Ca}^{2+} + 2e^- = \text{Ca}$	-2.87
$\text{K}^+ + e^- = \text{K}$	-2.92

( Sumber Pustaka 13 )

Tabel.13. ini merupakan urutan resistansi logam-logam yang ada terhadap korosi (dimulai dari yang teratas hingga ke bawah). Untuk itu perlu dipilih bahan logam yang komposisinya memiliki harga perbedaan EMF yang relatif kecil.

Berikut ini adalah beberapa komposisi kimia dari beberapa logam yang disarankan, bila dipakai pada kondisi air laut.

\* ) Brass ( paduan tembaga dan seng )

- Aluminium Brass, 78 % Cu, 20% Zn, 2% Al

- Rolled Naval Brass, 69 % Cu, 30% Zn, 1% Zn
- 70/30 Brass, 70% Cu , 30% Zn
- High Tensile Brass, 55% Cu , 40% Zn dengan Sn,Al,Fe
- \* ) Bronze (paduan tembaga dan logam lainnya selain seng)
  - Phospore Bronze, 90% Cu, 6% Sn , 4% P
  - Alumunium Bronze, 80% Cu, 10% Al, 5% Ni, 5% Fe
  - Manganese Bronze, 60% Cu, 40% Mn dengan Sn,Fe
- \* ) Cupro-Nickel (paduan tembaga dan nickel)
  - 90/10 Cupro-nickel, 90% Cu, 10% Ni dengan Fe,Mn
  - 70/30 Cupro-nickel, 70% Cu, 30% Ni dengan Fe,Mn
- \* ) Gun Metal (paduan bronze dengan aditif Sn,Zn)
 

Komposisi ; 88% Cu, 10% Sn, 2% Zn
- \* ) Monel Metal (paduan nickel)
 

Komposisi ; 70% Ni, 30% Cu dengan Fe dan Mn
- \* ) Muntz metal, adalah sebutan dari 60/40 Brass
- \* ) Stainless-Steel
  - Austenitic, 18% Cr, 8% Ni, 74% Fe
  - Martensitic, 16% Cr, 2% Ni, 82% Fe
  - 13 Chromium, 13% Cr, 87% Fe

## 2.5. B I O - F O U L I N G

Lingkungan laut banyak mengandung organisma-organisme hidup (tumbuh-tumbuhan dan hewan mikro) yang sering menempel pada bangunan di laut, dan dapat menimbulkan kerusakan pada

permukaan bangunan laut tersebut.

Namun menurut H.Crapper," bila kecepatan arus yang melalui suatu objek bangunan (struktur di laut) sebesar 0,6 m/s atau 2 ft/s maka , organisma-organisma itu cenderung tidak menempel pada bangunan (struktur tersebut)." (\*)

## 2.6. DASAR PENGATURAN KECEPATAN TURBIN

Putaran turbin dipengaruhi oleh beban yang digerakkan dalam hal ini adalah generator.

Jika diinginkan beban generator besar maka putaran turbin akan turun. Keadaan seperti ini tidak diinginkan karena putaran generator harus konstan dan sama dengan putaran turbin dalam keadaan normal.

Untuk menjaga agar putaran turbin tetap konstan walaupun terjadi perubahan beban diperlukan mekanisme pengatur putaran dan cara yang umum digunakan dengan mengatur sudut jalan pada posisi tertentu secara otomatis.

Pengaturan posisi sudut untuk mendapatkan putaran yang konstan pada berbagai variasi beban generator didasarkan pada suatu hubungan ;

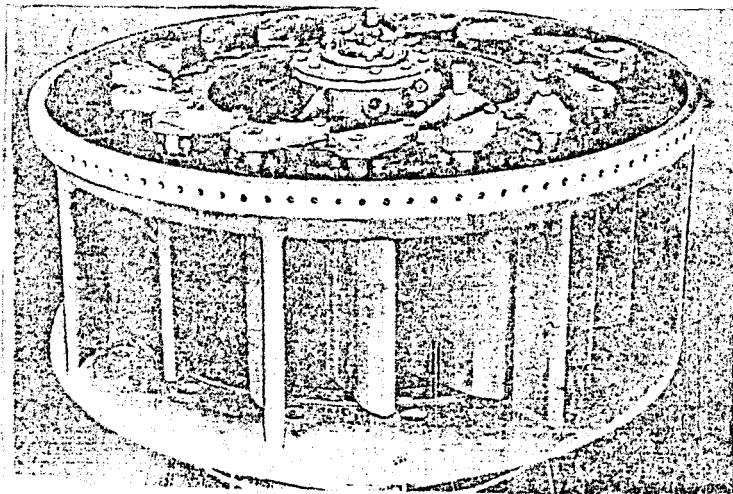
$$W_{\text{keluar}} = \omega \cdot T_{\text{poros}} \dots\dots(\text{Pers.71})$$

dimana,

$$W_{\text{keluar}} = \text{daya yang dikeluarkan turbin}$$

---

(\*) H. CAPPER AND S. H. FREDERIC., MATERIAL FOR MARINE MACHINERY, THE INSTITUTE OF MARINE ENGINEERS PRESS, LONDON, 1976, HAL 240.



Gambar. 17 . Susunan Sudu Antar

( Sumber Pustaka 15 )

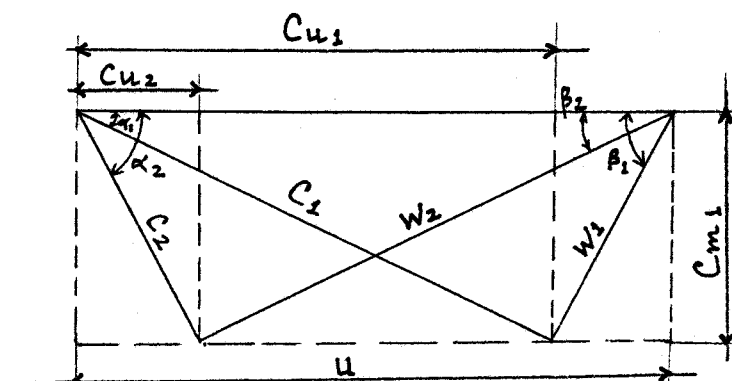
sehingga,  $W_{\text{keluar}} = W ( C_{u1} - C_{u2} ) R \cdot m \dots (\text{Pers.72})$

dimana ;

$C_{u1}$  = kecepatan absolut ke arah tangensial untuk aliran air yang masuk sudu

$C_{u2}$  = kecepatan absolut ke arah tangensial untuk aliran air yang keluar sudu jalan.

Adapun segitiga kecepatan untuk aliran fluida yang masuk dan melalui antar, sebagai berikut ;



( Sumber Pustaka 7 )

Gambar. 18 Diagram Segitiga kecepatan

Dari segitiga kecepatan didapatkan hubungan :

$$C_{u1} = C_m / \text{tg} (\alpha_1); \quad C_{u2} = U - [ C_m / \text{tg} (\beta_2) ],$$

.....(Pers-73)

maka,

$$W_{\text{keluar}} = \omega \cdot R \cdot [ (C_m / \text{tg } \alpha_1) - (U - (C_m / \text{tg } \beta_2)) ] m$$

.....(Pers. 74)

Pada persamaan di atas dimana  $W, R, C_m, \alpha_1, U, m$ , tetap untuk posisi yang bagaimanapun juga, sedangkan  $W_{\text{keluar}}$  adalah daya diinginkan, besarnya (tergantung pada beban generator) daya keluar dapat berubah tergantung dari sudut  $\beta_2$ , yang merupakan sudut posisi sudu jalan.

---

## BAB III P E R E N C A N A A N

### 3.1. DATA PERENCANAAN LOKASI

Lokasi Instalasi Turbin bawah air (TBA) yang direncanakan pada alur perairan Selat Bali di daerah Banyuwangi, Jawa Timur. Data-data lokasi diambil berdasarkan hasil survei Pusat Penelitian (PUSLIT) ITS, yang dapat dilihat pada tabel 1 dan 2, yang mana pengukuran kecepatan arus laut dilakukan pada kedalaman 5 m dari permukaan .

Daerah yang dipilih adalah daerah yang memiliki harga kecepatan arus yang terbesar pada musim tertentu, karena besarnya kecepatan arus laut linier dengan daya turbin yang dihasilkan, yaitu semakin besar kecepatan arus laut, semakin besar juga daya yang dihasilkan oleh turbin.

Dari tabel 1 dan 2 ditunjukkan bahwa kecepatan arus laut terbesar pada daerah Watudodol, pada musim barat.

Sehingga daerah Watudodol dijadikan lokasi instalasi dengan perincian sebagai berikut ;

- Kecepatan Aliran : 4,2 m/s

- Kedalaman :  $\pm 80$  m (\*)
- Lebar Selat : 1,5 Km
- Kondisi Musim : Musim Barat

### 3.2. PERENCANAAN DAYA INSTALASI

Dengan data lokasi di atas maka daya turbin dapat dihitung dengan persamaan (1) ;

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \dots\dots \text{Watt}$$

#### 3.2.1. Kapasitas Air laut, (Q)

Direncanakan arus air yang masuk melalui sudu antar akan mengenai setengah luasan dari tiga buah sudu jalan .

Jadi besarnya kapasitas air laut adalah setengah dari kapasitas totalnya (dibandingkan dengan luasan sudu seluruhnya)

Dengan persamaan (2) ;

$$Q = 3/2 (\pi/4 \cdot D^2 \cdot V) \dots\dots \text{m}^3/\text{s},$$

dimana,

D = Diameter sudu turbin, direncanakan 10 m

V = Kecepatan arus laut, dari data = 4,2 m/s

sehingga,

$$Q = 3/2 (\pi/4 \times 10^2 \times 4,2) \text{ m}^3/\text{s} = 494,55 \text{ m}^3/\text{s}$$

---

(\*) PETA ALUR KEDALAMAN SELAT BALI, DINAS HIDROGRAFI DAN OCEANOGRAFI TNI-AL, JAKARTA, 1967.



3.2.2. Tinggi jatuh, (H) , berdasar kecepatan arus laut

Dengan persamaan (3) ;

$$H = V^2/2g ; \text{ dimana } g = \text{gravitasi bumi, } 9,8 \text{ m/s}^2 \\ = 4,2^2/19,6 = 0,9 \text{ m} = 1 \text{ m}$$

jadi daya output efektifnya adalah :

$$P = 1025 \times 9,8 \times 494,55 \times 1,0 \times 0,7 = 3480 \text{ KW} = 4666 \text{ HP}$$

### 3.3. PUTARAN TURBIN

Putaran ini juga menjadi putaran generator yang direncanakan. Ditentukan dengan persamaan (4) ;

$$n = 60 \cdot f / p \dots \text{ Rpm}$$

dimana,

f = Frekuensi generator direncanakan, 50 Hz

p = Jumlah kutub generator, direncanakan 40 buah kutub

jadi,

$$n = 60 \times 50 / 40 = 75 \text{ Rpm}$$

### 3.4. PUTARAN SPESIFIK TURBIN

Dengan menggunakan persamaan (5) ;

$$ns = n \cdot (P)^{0,5} \cdot (gH)^{3/4} , \text{ Rpm}$$

dimana,

n = putaran turbin, 75 Rpm

P = daya output turbin = 4666 HP

H = tinggi jatuh, 1,0 m

g = percepatan gravitasi bumi, 9,8 m/s<sup>2</sup>

jadi putaran spesifik turbin,

$$n_s = 75 \times (4666)^{0,5} \times (9,8 \times 1,0)^{3/4} = 337 \text{ Rpm}$$

### 3.5. TIPE DAN CARA KERJA TURBIN YANG DIRENCANAKAN

#### 3.5.1. Pemilihan Tipe

Dengan mempertimbangkan daya, putaran, debit air, efisiensi, dan diameter sudu jalan turbin serta putaran spesifiknya dan memperhatikan tabel 4 dan 5 maka untuk putaran spesifik,  $N_s = 337 \text{ Rpm}$ , maka tipe turbin yang sesuai dengan melihat harga putarannya adalah turbin kaplan.

#### 3.5.2. Adapun cara kerja turbin adalah :

Air laut akan mengalir dengan kecepatan tertentu. Di samping itu dengan jumlah air (debit) tertentu, maka daya yang dihasilkan oleh turbin tertentu pula.

Air yang mengalir masuk ke ruang turbin secara aksial, sebelum mengenai sudu jalan akan timbul tekanan (gaya tekan) karena bentuk sudu jalan yang sedemikian rupa maka akan timbul momen dan juga gaya lift sehingga hub akan berputar. Karena hub berhubungan dengan poros maka berputarlah poros

turbin.

### 3.6. Dimensi Turbin

Direncanakan jumlah sudu turbin adalah 4 buah (8 kipas)

#### 3.6.1. Diameter Sudu Jalan (D)

Telah ditentukan bahwa diameter sudu jalan dari turbin adalah 10 m.

#### 3.6.2. Diameter Hub (d)

Diameter hub sudu jalan ditentukan dengan menggunakan persamaan (6) didapat ;

$$d/D = 0,4 \quad (\text{untuk head} < 5 \text{ m , jumlah blade} = 4)$$

maka perbandingan diameter hub dan sudu jalan adalah :

$$d/D = 0,4 \quad \text{sehingga } d = 0,4.D = 0,4 \times 10 = 4 \text{ m.}$$

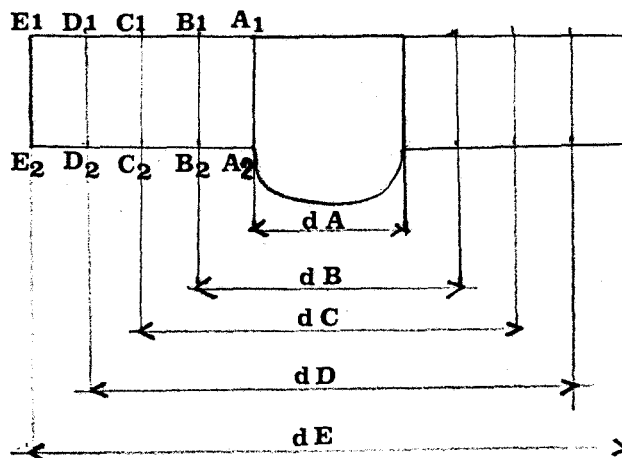
### 3.7. PERENCANAAN SUDU JALAN

Pada saat aliran air mengena sudu jalan turbin maka akan terjadi dua gaya angkat (lift) yang bersifat menguntungkan karena gaya ini yang menimbulkan putaran turbin, dari gaya tahan (drag) yang merugikan karena gesekan fluida dengan sudu jalan yang mengakibatkan kerugian

hidrolis, oleh karenanya gaya tahan ini diusahakan sekecil mungkin.

Untuk maksud di atas maka bentuk sudu jalan diharapkan streamline dan penghalus dan sudu jalan dengan derajat tinggi untuk memperoleh efisiensi tinggi. Sehingga profil sudu jalan mengikuti bentuk aerofoil yang diharapkan mencapai maksud di atas serta lebih menjamin kekuatan mekanik sudu.

Untuk memudahkan hasil perhitungan dan penggambaran dari sudu jalan yang akurat serta mudah, maka penganalisaannya dengan membagi menjadi 4 bagian seperti yang terlihat pada gambar. 19



Gambar. 19 Pembagian Sudu Jalan.

Dari gambar 19 ukuran-ukuran pembagian tersebut adalah ;

$$\begin{aligned} dA &= 3,0 \text{ m} & dD &= 8,2 \text{ m} \\ dB &= 4,7 \text{ m} & dE &= 10,0 \text{ m} \\ dC &= 6,5 \text{ m} \end{aligned}$$

### 3.7.1. Perhitungan Kecepatan

#### A. Kecepatan Keliling Sudu jalan (U)

Ditentukan dengan persamaan (7) ;  $U = W \times r$ , m/s

dengan ;  $r$  = radius dari sudu jalan untuk tiap bagian silindris

$$\begin{aligned} W &= 2\pi n/60, \text{kecepatan sudu jalan, rad/s} \\ &= 2\pi \times 75/60 = 7,28 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

maka kecepatan keliling dari tiap-tiap bagian sudu jalan adalah ;

$$\begin{aligned} U_A &= W_A \times r_A = 7,28 \times 1,5 = 10,92 \text{ m/s} \\ U_B &= W_B \times r_B = 7,28 \times 2,35 = 17,11 \text{ m/s} \\ U_C &= W \times r_C = 7,28 \times 3,25 = 23,66 \text{ m/s} \\ U_D &= W \times r_D = 7,28 \times 4,1 = 29,84 \text{ m/s} \\ U_E &= W \times r_E = 7,28 \times 5,0 = 36,40 \text{ m/s} \end{aligned}$$

#### B. Kecepatan Air Keluar Sudu Jalan (C2)

Dari gambar. 8 didapat dengan  $N_s = 337$  Rpm harga kecepatan keluar spesifik ( $C_s$ ) = 0,7.

Maka kecepatan air keluar yang sebenarnya didapatkan dengan persamaan (8) ;

$$C_2 = C_s (2gH)^{0,5} = 0,7 (2 \times 9,8 \times 1,0)^{0,5} = 3,1 \text{ m/s.}$$

### C. Kecepatan Keliling Spesifik (u)

Besarnya untuk masuk maupun keluar sudu sama besarnya, sehingga untuk bagian sudu jalan memiliki besar kecepatan spesifik :

$$u_A = 10,92 / (2 \times 9,8 \times 1,0)^{0,5} = 2,24$$

$$u_B = 17,11 / (2 \times 9,8 \times 1,0)^{0,5} = 3,51$$

$$u_C = 23,66 / (2 \times 9,8 \times 1,0)^{0,5} = 4,78$$

$$u_D = 29,84 / (2 \times 9,8 \times 1,0)^{0,5} = 6,13$$

$$u_E = 36,40 / (2 \times 9,8 \times 1,0)^{0,5} = 7,47$$

### 3.7.2. Penggambaran Segitiga Kecepatan

Kecepatan absolut spesifik ke arah meridian ( $C_m$ ) pada turbin aksial sama dengan kecepatan keluar spesifik ;

$$C_m = C_{m1} = C_{m2} = C_2 = 0,7.$$

Untuk penggambaran dengan diagram Braun perlu diketahui besar  $C_1$  (kecepatan indikatif) dengan persamaan 13

$$\eta_h = C_1^2 - C_2^2 - W_z^2$$

dimana,

$$\eta_h = \text{efisiensi hidrolis} = 0,88$$

$C_2 = C_m = 0,7$  merupakan kecepatan spesifik ke arah meridian

$$W_z = \text{specific-shock velocity} = 0$$

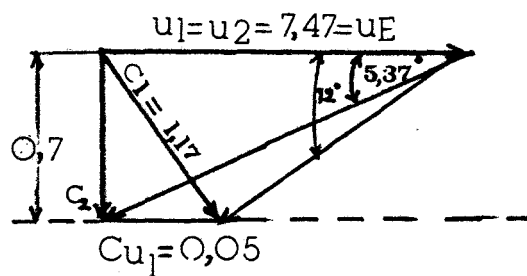
sehingga,

$$\eta_h = C_1^2 - C_2^2, \text{ menjadi } C_1 = (\eta_h + C_2^2)^{0,5}$$

jadi,  $C_1 = (0,88 + 0,7^2) = 1,17$

Setelah didapatkan besaran-besaran yang diperlukan maka segitiga kecepatan dapatlah digambarkan dengan memberikan skala tertentu pada segitiga kecepatan tersebut.

Penggambaran tersebut dapat dilihat pada gambar. 20



Gambar. 20. Penggambaran segitiga Braun's

Dari diagram Braun's didapatkan :

\*) Kecepatan absolut ke arah tangensial ;

$$cu_{1A} = 0,19 \quad ; \quad cu_{1B} = 0,125$$

$$cu_{1C} = 0,09 \quad ; \quad cu_{1D} = 0,07$$

$$cu_{1E} = 0,05$$

Dengan diketahuinya kecepatan spesifiknya maka kecepatan absolut ke arah tangensial adalah :(dengan persamaan 9.)

$$Cu_{1A} = cu_{1A} (2gH)^{0,5} = 0,82 \quad ; \quad Cu_{1B} = 0,525$$

$$Cu_{1C} = 0,378 \quad ; \quad Cu_{1D} = 0,294 \quad ; \quad Cu_{1E} = 0,21$$

\*) Kecepatan relatif spesifik rata-rata untuk tiap bagian sudu jalan menggunakan persamaan (16) ;

$$W_{\omega} = [C_m^2 + (u - cu_{1/2})^2]^{0,5}, \text{ sehingga ;}$$

$$w_{\omega A} = 1,95 \quad ; \quad w_{\omega D} = 6,01$$

$$w_{\omega B} = 3,3 \quad ; \quad w_{\omega E} = 7,39$$

$$w_{\omega C} = 4,6$$

maka,  $W_{\omega A} = w_{\omega} (2gH)^{0,5} = 8,63 \text{ m/s} \quad ; \quad W_{\omega B} = 13,86 \text{ m/s}$

$$W_{\omega C} = 19,32 \text{ m/s} \quad ; \quad W_{\omega D} = 25,24 \text{ m/s}$$

$$W_{\omega E} = 31,03 \text{ m/s}$$

\*) Sudut aliran relatif rata-rata ( $B_{\omega}$ )

Sudut aliran relatif dicari dengan persamaan (18) ;



$$\beta_{\text{TO}} = \text{arc tg } [C2 / (u - Cu1/2)]$$

jadi :

$$\beta_{\text{TOA}} = 18,14^{\circ} \quad \beta_{\text{TOB}} = 6,10^{\circ}$$

$$\beta_{\text{TOB}} = 11,17^{\circ} \quad \beta_{\text{TOE}} = 5,37^{\circ}$$

$$\beta_{\text{TOC}} = 8,41^{\circ}$$

\*) Sudut Aliran Keluar ( $\beta_{2A}$ )

Dengan diagram Braun didapat sudut aliran fluida keluar dari sudu jalan adalah :

$$\beta_{2A} = 35^{\circ} \quad \beta_{2D} = 14^{\circ}$$

$$\beta_{2B} = 28^{\circ} \quad \beta_{2E} = 12^{\circ}$$

$$\beta_{2C} = 18^{\circ}$$

Dalam perencanaan seperti yang diketahui sudu jalan dibagi menjadi beberapa bagian penampang silindris. Sedang setiap penampang mempunyai profil airfoil yang berbeda baik bentuk maupun posisinya. Oleh karenanya untuk menentukan bentuk dan ukuran utama sudu jalan maka dilaksanakan juga perencanaan untuk setiap penampang silindris yang ditinjau.

Untuk jenis profil airfoil yang dipakai sebagai bentuk penampang silndris maka beberapa faktor perencanaan harus dihitung dulu.

\*) Perhitungan Jarak Antara Dua Sudu (pitch)

Jarak antara dua sudu (pitch) pada setiap penampang silindris sudu jalan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (21) ;

$$t = \pi \cdot d / z, \quad (\text{mm})$$

dengan,

d = diameter setiap penampang silindris sudu, mm

z = jumlah sudu jalan , 4

maka,

$$t_A = \pi/4 \times 3000 = 2355 \text{ mm} = 2,35 \text{ m}$$

$$t_B = \pi/4 \times 4170 = 3273 \text{ mm} = 3,27 \text{ m}$$

$$t_C = \pi/4 \times 6500 = 5102 \text{ mm} = 5,10 \text{ m}$$

$$t_D = \pi/4 \times 8200 = 6437 \text{ mm} = 6,44 \text{ m}$$

$$t_E = \pi/3 \times 10.000 = 7850 \text{ mm} = 7,85 \text{ m}$$

### 3.7.3. Contoh Perhitungan Bentuk Sudu

Sebagai contoh perhitungan - perhitungan besaran-besaran untuk menentukan dimensi sudu, diambil profil potongan silindris A1 - A2

Dari perhitungan terdahulu diketahui :

$$H_{th} = 1,0 \text{ m} \quad W_{0A} = 8,63 \text{ m/s}$$

$$d_A = 3 \text{ m} \quad \beta_{0A} = 18,14^\circ$$

$$U_A = 10,92 \text{ m/s} ; \quad \lambda = 1^\circ$$

$$C_m = 3,1 \text{ m/s}$$

A. Harga,  $C_l$  (1/t)

$$\begin{aligned} C_l (1/t) &= 2 \cdot g \cdot H_{th} \cdot C_m / [1/t \cdot W \omega^2 \cdot U \sin (\beta \omega - \lambda) ] \\ &= \frac{2 \times 9,8 \times 1,0 \times 3,1}{(8,63)^2 \cdot 10,92 \cdot \sin (18,14 - 1)} = 0,294 \end{aligned}$$

B. Jarak antara dua sudu (pitch),  $t_A = 2,35 \text{ m}$

C. Besar perbandingan 1/t direncanakan dimana ;  $(1/t)_A = 0,4$

D. Harga koefisien angkat

$$C_l = [C_l \cdot (1/t)] / (1/t)_A = 0,294 / 0,4 = 0,735$$

E. Harga koefisien tahan

$$C_d = C_l \cdot \text{tg} \lambda = 0,735 \cdot \text{tg} 1^\circ = 0,0128$$

F. Pemilihan jenis profil berdasar pada harga  $C_d$  dan  $C_l$  di atas standar Aerodynamic Institut in Gottingen untuk penampang silindris A1-A2 profil No. 490, diagram  $C_l = f(C_d)$ .

G. Perencanaan perbandingan  $Y_{mak}/l$  untuk profil A1-A2 direncanakan nilai  $(Y_{mak}/l) = 0,103$

H. Penentuan Sudut Serang,  $\alpha$ , untuk profil No.490

$$C_l = 4,4 Y_{mak}/l + 0,092 \alpha$$

$$\text{maka, } \alpha = [C_l - 4,4 (Y_{\text{mak}}/l)]/0,092$$

$$\alpha_A = [0,735 - 4,4(0,103)] / 0,092 = 3,1^\circ$$

$$\text{I. Posisi kerja sudu } < (\beta_w - \alpha) = 18,14^\circ - 3,1^\circ = 15,14^\circ$$

Untuk perhitungan selanjutnya pada penampang silindris yang lain, dapatlah ditabelkan pada halaman berikut dengan cara seperti di atas, serta besaran-besaran yang perlu diketahui. Untuk perhitungan titik-titik koordinat bentuk profil dipakai tabel Aerodynamic Institut in Gottingen.

No.	Besaran	Profil Penampang Silindris				
		A <sub>1</sub> - A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub> - B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> - C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub> - D <sub>2</sub>	E <sub>1</sub> - E <sub>2</sub>
1.	d	3	4,7	6,5	8,2	10
2.	U	10,9	17,11	23,66	29,84	36,4
3.	W <sub>00</sub>	8,63	13,86	19,32	25,24	31,03
4.	$\beta\omega$	18,1°	11,17°	8,41°	6,10°	5,37°
5.	$\alpha$	1°	1°	1°	1°	1°
6.	C <sub>1</sub> (1/t)	0,294	0,11	0,06	0,04	0,02
7.	t	2,35	3,27	5,10	6,44	7,85
8.	1/t	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1
9.	l = (1/t).t	0,94	0,98	1,02	0,96	0,785
10.	C <sub>1</sub>	0,735	0,373	0,3	0,27	0,25
11.	C <sub>d</sub> = C <sub>1</sub> tg $\alpha$	0,012	0,006	0,005	0,005	0,005
12.	Profil No.	490	443	443	443	443
13.	(Y <sub>mak</sub> /l) <sub>stand.</sub>	0,15	0,15	0,096	0,096	0,096
14.	(Y <sub>mak</sub> /l) <sub>renc.</sub>	0,103	0,073	0,051	0,033	0,02
15.	Y <sub>mak</sub> = (Y <sub>mak</sub> /l).l	0,1	0,07	0,05	0,03	0,02
16.	Penipisan, f	0,68	0,49	0,53	0,34	0,21
17.	$\alpha$ dari rumus	3,1°	1.20°	0,82°	0,62°	0,31°
18.	( $\beta\omega$ - $\alpha$ )	15,1°	9,97°	7,59°	5,48°	5,06°

Tabel. 14. Hasil perhitungan untuk sudu jalan

### 3.7.4. Perhitungan Titik Berat Profil Sudu

Maka untuk titik berat seluruhnya didapat dengan menggunakan persamaan (29) ;

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Dari perhitungan luasan, dengan membagi profil menjadi 5 bagian, hasilnya dapat terlihat pada tabel 15. di bawah ini ;

Tabel. 15. Perhitungan Luas Profil

i	$A_i, m^2$	$X_i, m$	$A_i \cdot X_i, m^3$
1.	$15,0 \cdot 10^{-3}$	0,128	$4,2 \cdot 10^{-3}$
2.	$22,4 \cdot 10^{-3}$	0,530	$11,8 \cdot 10^{-3}$
3.	$14,6 \cdot 10^{-3}$	0,780	$10,9 \cdot 10^{-3}$
4.	$10,7 \cdot 10^{-3}$	1,030	$11,0 \cdot 10^{-3}$
5.	$2,28 \cdot 10^{-3}$	1,280	$5,46 \cdot 10^{-3}$

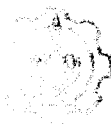
Dari tabel 15. dapat kita hitung titik berat profil ;

$$\sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i = 43,42 \cdot 10^{-3} m^3 ; \text{ dan } \sum_{i=1}^n A_i = 67,04 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$\text{sehingga } \bar{X} = 43,42 \cdot 10^{-3} / 67,04 \cdot 10^{-3} = 0,65 m$$

Bila ditinjau dari Leading Edge (L.E) maka posisi titik berat terhadap panjang Chord adalah :

$$S = [(0,65 - 0,03) / 1,25] \times 100 \% = 49,6\%$$



## 3.7.5. Perhitungan Gaya-gaya yang bekerja pada Sudu Jalan

## A. Gaya Aksial

Dihitung berdasar persamaan (30) ;

$$F_a = \pi \cdot \gamma_{\text{air}} \cdot (D^2 - d^2) \cdot H_{\text{mak}} / (4 \cdot Z) \dots \text{kg}$$

dimana,

D = diameter sudu jalan, 10 m

d = diameter hub, 4 m

H = tinggi jatuh maksimum, 1,0 m

Z = jumlah sudu jalan, 4 buah

$\gamma$  = berat spesifik air,  $\text{kg/m}^3$

$$F_a = \pi \times 1025 (10^2 - 4^2) \times 1,0 / (4 \times 4) = 16.897 \text{ Kg}$$

B. Gaya Keliling ( $F_u$ )

Dihitung dengan persamaan (31) ;

$$F_u = 716,2 \cdot P / (Z \cdot R_t \cdot n) , \text{kg}$$

dengan ,

Z = Jumlah bilah sudu jalan, 4 buah

P = Daya Output Turbin = 3480 KW = 4666 HP

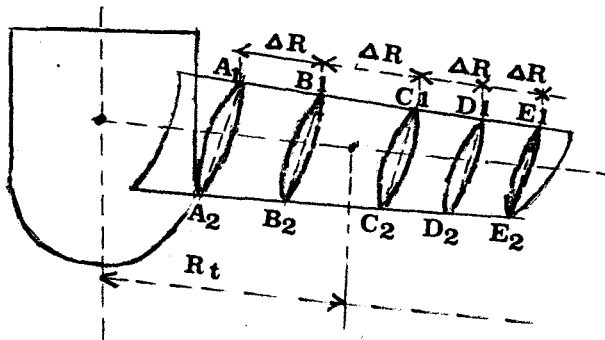
n = Putaran Turbin = 75 Rpm

$R_t$  = Jarak titik berat sudu terhadap sumbu hub.

Untuk menentukan  $R_t$  maka pada sudu jalan , dilakukan perhitungan dengan analisa pendekatan yaitu dengan analisa

volume sudu.

Untuk mendapatkan volume satu sudu jalan, terlebih dahulu dihitung masing-masing penampang silindris, dengan cara membagi masing-masing penampang profil atas segiempat-segiempat kecil, maka didapatkan :



Gambar. 21.

Pembagian Profil

Luas profil penampang silindris :

$$A1-A2 = 67,04. 10^{-3}$$

$$B1-B2 = 62,44. 10^{-3}$$

$$C1-C2 = 55,70. 10^{-3}$$

$$D1-D2 = 44,62. 10^{-3}$$

$$E1-E2 = 28,54. 10^{-3}$$

Jarak titik berat sudu terhadap hub didapat dengan persamaan (32) ;

$$R_t = \frac{\sum_{i=1}^n V_i (R + \Delta R/2 + (i-1) \cdot \Delta R)}{\sum_{i=1}^n V_i}$$



dimana,

$R_t$  = jarak titik berat sudu terhadap pusat hub, m

$V_i$  = volume bagian sudu antara profil airfoil penampang silinder ke- $i$ ,  $m^3$ , dan penampang silindris ke  $i + 1$

$\Delta R$  = jarak antara tiap-tiap penampang silindris = 1,0 m

$R$  = jari-jari hub = 2,0 m

Perhitungan volume dan jarak titik berat volume terhadap sumbu hub untuk masing-masing volume diantara penampang silindris dapat ditabelkan sebagai berikut:

Tabel.16.

$i$	$V_i$	$R + \Delta R/2 + (i-1)\Delta R$	$V_i(R + \Delta R/2 + (i-1)\Delta R)$
1.	$5,70 \cdot 10^{-2}$	2,50	$14,25 \cdot 10^{-2}$
2.	$5,30 \cdot 10^{-2}$	3,50	$18,55 \cdot 10^{-2}$
3.	$4,70 \cdot 10^{-2}$	4,50	$21,15 \cdot 10^{-2}$
4.	$3,70 \cdot 10^{-2}$	5,50	$20,35 \cdot 10^{-2}$
5.	$2,40 \cdot 10^{-2}$	6,5	$15,60 \cdot 10^{-2}$
$\Sigma = 21,8 \cdot 10^{-2}$			$\Sigma = 89,9 \cdot 10^{-2}$

Dari tabel.16 didapat jarak titik berat sudu jalan terhadap hub yaitu ;  $R_t = 89,9 \cdot 10^{-2} / 21,8 \cdot 10^{-2} = 4,12$  m  
Setelah  $R_t$  diperoleh maka dapat ditentukan gaya keliling ( $F_u$ );

$$F_u = 716,2 \times 4666 / (4 \times 4,12 \times 75) = 2703,7 \text{ Kg}$$

### C. Gaya Sentrifugal ( $F_c$ )

Gaya sentrifugal timbul akibat adanya putaran turbin. Gaya ini akan menjadi lebih besar saat turbin mengalami putaran liar, dimana putaran turbin mencapai 2,5 - 3 kali putaran normalnya.

Tabel.17.

Jenis Turbin	Kecepatan liar (% Kecepatan kerja)
Kaplan	250 - 300
Francis	200
Pelton	kurang 200

maka putaran liarnya,  $n_t' = 2,5 \times 75 \text{ Rpm} = 187,5 \text{ Rpm}$

Besar gaya sentrifugal diperoleh dari persamaan ;

$$F_c = M \cdot R_t \cdot W^2 \dots \text{ kg}$$

dimana,

$$M = \text{massa bilah sudu jalan, kg}$$

$$W = \text{kecepatan sudu jalan} = 2\pi n/60 \text{ rad/s}$$

$$R_t = \text{jarak titik berat sudu terhadap hub, m}$$

Massa bilah sudu jalan dihitung dengan cara mengalikan volume sudu dengan massa jenis bahan sudu.

Dipilih bahan sudu adalah baja paduan (Ni 3,5% , C 0,4%)

$$m_j = 7,83 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3.$$

$$M = V \cdot m_j = 21,80 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \times 7,83 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$= 1707 \text{ Kg}$$

maka gaya sentrifugal, pada :

\*) Putaran Normal

$$F_c = 1707 \times (4,12) \times (2\pi \times 75/60)^2 = 4,33.10^5 \text{ N} = 4,4.10^4 \text{ Kg}$$

\*) Putaran Liar

$$F_c' = 1707 \times (4,12) \times (2\pi \times 187,5/60)^2 = 2,71.10^6 \text{ N} = 2,76.10^5 \text{ Kg}$$

### 3.7.6. Perhitungan Momen Bengkok

Momen bengkok maksimum akan terjadi pada kaki sudu yang berhubungan dengan potongan silindris A1-A2.

Momen Bengkok ini disebabkan oleh adanya gaya-gaya yaitu, gaya aksial dan gaya keliling.

A. Momen Bengkok akibat gaya aksial ( $F_a$ )

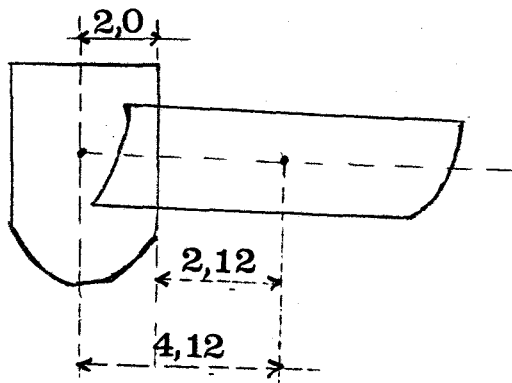
$$M_a = F_a \cdot X_a.$$

dimana,

$X_a$  = Jarak titik berat sudu dengan hub,

dimana  $X_a = R_t - R$

$F_a$  = Gaya Aksial, 16.897 kg



$$X_a = R_t - R$$

$$= 4,12 - 2,0 = 2,12 \text{ m}$$

$$\text{Jadi } M_a = 16.897 \times 2,12$$

$$= 35.821 \text{ kg.m}$$

Gambar 22 Posisi titik berat terhadap hub.

### B. Momen Bengkok akibat Gaya Keliling

Momen bengkok yang diakibatkan oleh gaya keliling dapat dinyatakan dengan persamaan (35) ;

$$M_v = F_v \cdot X_a$$

dimana,

$$F_v = \text{gaya keliling, } 2703,7 \text{ kg}$$

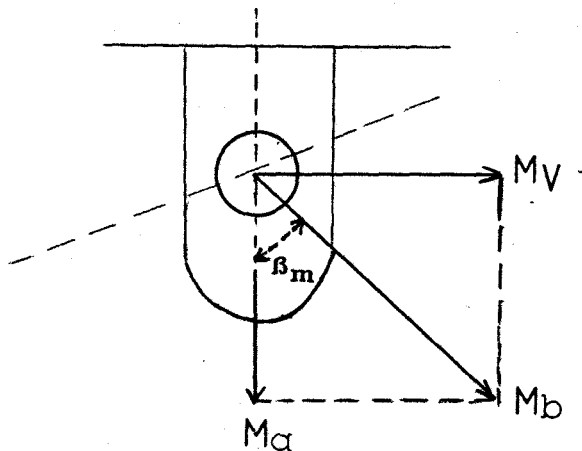
$$X_a = \text{jarak titik berat sudu dengan hub} = 2,12 \text{ m}$$

Jadi,

$$M_v = 2703,7 \times 2,12 = 5732 \text{ kg.m}$$

Resultan momen bengkok dapat dinyatakan dengan hubungan :

$$\text{persamaan (36) ; } M_b = M_a \cdot \cos(\beta_m) + M_v \cdot \sin(\beta_m)$$



Gambar. 23

dimana ;

$$\beta_m = \text{sudut kerja profil airfoil, } A1-A2 = \beta_m - \alpha = 15,04^\circ$$

$$\text{sehingga } M_b = 35.821 \cos(15,04^\circ) + 5732 \sin(15,04^\circ)$$

$$= 36.081 \text{ kg.m}$$

### 3.7.7. Perhitungan tegangan yang terjadi pada kaki sudu

#### A. Perhitungan Tegangan karena momen bengkok

Tegangan bengkok yang terjadi pada kaki sudu penumpu beban dapat dihitung berdasarkan persamaan (37) ;

$$\sigma_b = M_b \cdot c / I \dots \text{kg/cm}^2, \quad \text{dimana ;}$$

$M_b$  = momen bengkok yang terjadi pada kaki sudu penumpu beban, kg.m

$c$  = jarak terjauh penampang terhadap sumbu netral diukur secara tegak, m

$I$  = momen inersia luas penampang kaki sudu jalan,  $\text{m}^4$

Untuk menghitung momen inersia luasan penampang kaki sudu yang menumpu beban, maka momen inersia luas penampang diperhitungkan terhadap garis sumbu yang tegak lurus dengan posisi kerja momen bending ( $M_b$ ). Untuk mempermudah perhitungan dan mencapai ketelitian maka luasan penampang dibagi menjadi luasan kecil segiempat yang masing-masing mempunyai vektor gaya bertitik tangkap pada sumbu sudu tempat kedudukan titik berat luasan profil penampang silindris. Karena yang berhubungan dengan kaki sudu jalan adalah profil silindris A1-A2, maka perhitungan momen inersinya juga pada potongan silindris profil A1-A2. Adapun rumus yang dipakai untuk menentukan momen inersia terhadap :

- sumbu x ;  $I_x = \int y^2 \cdot dA$  atau  $I_x = \sum_{i=1}^n A_i \cdot Y_i^2$
- sumbu y ;  $I_y = \int x^2 \cdot dA$  atau  $I_y = \sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i^2$
- sumbu xy ;  $I_{xy} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i \cdot Y_i$

dimana,

$Y_i$  = ordinat dari segiempat ke-i terhadap sumbu Y

$X_i$  = absis dari segiempat ke-i terhadap sumbu X

$A_i$  = luasan segiempat ke-i, dalam analisa perhitungan luasan dibagi menjadi 20 bagian luas segiempat

Pada diagram luas penampang kaki sudu yang menahan beban, momen inersia dihitung terhadap sumbu netral X, dan rumus yang digunakan persamaan (41) ;

$$I = I_x' \cdot \cos^2 \beta_m + I_y' \cdot \sin^2 \beta_m - 2I_{xy}' \cdot \sin \beta_m \cdot \cos \beta_m$$

dimana,

$$I_x' = I_x - A(\bar{Y})^2 ; I_{xy}' = I_{xy} - A\bar{x}\bar{y}$$

$$I_y' = I_y - A(\bar{X})^2 ; A = \sum_{i=1}^n A_i, \text{ adalah luas total segiempat}$$

$I_x'$  dan  $I_y'$  adalah Momen Inersia terhadap Sumbu X' dan Y'

$\bar{Y}$  adalah ordinat titik berat profil A1-A2 terhadap sumbu XY

$\bar{X}$  adalah absis titik berat profil A1-A2 terhadap sumbu XY

$\beta_m$  adalah sudut kerja profil A1-A2

Tabel.18, Menghitung Momen Inersia

i	A <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> )	X <sub>i</sub> (m)	Y <sub>i</sub> (m)	A <sub>i</sub> X <sub>i</sub> Y <sub>i</sub> (m <sup>4</sup> )	A <sub>i</sub> X <sub>i</sub> <sup>2</sup> (m <sup>4</sup> )	A <sub>i</sub> Y <sub>i</sub> <sup>2</sup> (m <sup>4</sup> )
1.	15. 10 <sup>-3</sup>	0,28	0,062	2,6.10 <sup>-4</sup>	11,7.10 <sup>-4</sup>	5,76.10 <sup>-5</sup>
2.	22,4.10 <sup>-3</sup>	0,53	0,060	7,1.10 <sup>-4</sup>	6,28.10 <sup>-4</sup>	8,06.10 <sup>-5</sup>
3.	14,6.10 <sup>-3</sup>	0,78	0,048	5,4.10 <sup>-4</sup>	8,90.10 <sup>-3</sup>	3,38.10 <sup>-5</sup>
4.	11,7.10 <sup>-3</sup>	1,03	0,028	3,0.10 <sup>-4</sup>	11,3.10 <sup>-3</sup>	8,42.10 <sup>-6</sup>
5.	4,28.10 <sup>-3</sup>	1,28	0,030	5,4.10 <sup>-6</sup>	7,02.10 <sup>-3</sup>	3,84.10 <sup>-8</sup>

Dari tabel ini didapat :

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = 67,04 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I_x = \sum_{i=1}^n A_i \cdot Y_i^2 = 18,04 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_y = \sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i^2 = 34,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$I_{xy} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i \cdot Y_i = 18,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$\bar{X} = 0,65 \text{ m} ; \bar{Y} = 0,04 \text{ m}$$

maka,

$$I_x' = I_x - A(\bar{Y})^2 = 7,30 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_y' = I_y - A(\bar{X})^2 = 6,40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$I_{x'y'} = I_{xy} - A\bar{x}\bar{y} = 9,30 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

sehingga Momen Inersia :

$$I = I_x' \cdot \cos^2 \beta_m + I_y' \cdot \sin^2 \beta_m - 2I_{x'y'} \cdot \sin \beta_m \cdot \cos \beta_m$$

$$= 4,50 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4.$$

sedangkan c : jarak terjauh penampang terhadap sumbu netral diukur secara tegak lurus adalah ;

$$0,5 Y_{\max} = 0,5 \times 0,10 = 0,05 \text{ m}$$

Jadi tegangan tarik karena momen bending :

$$\begin{aligned}\sigma_b &= M_b \cdot c / I, \text{ kg/cm}^2 \\ &= 36.081 \times (0,05) / 4,50 \cdot 10^{-4} = 4,0 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2 \\ &= 4,0 \cdot 10^2 \text{ kg/cm}^2.\end{aligned}$$

### B. Tegangan Tarik karena Gaya Sentrifugal

Pada kaki sudu penumpu beban yang terjadi gaya sentrifugal, dimana besarnya tegangan tarik diperoleh dari persamaan (43) ;

$$\sigma_c = F_c / A \dots\dots\dots \text{ kg/cm}^2$$

dimana,  $F_c$  = gaya sentrifugal untuk amannya dipilih saat turbin mengalami putaran liar,

$$F_c = 2,76 \cdot 10^5 \text{ Kg.}$$

$$\begin{aligned}A &= \text{luas penampang kaku sudu penampang beban} \\ &= 67,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\end{aligned}$$

jadi tegangan tarik karena gaya sentrifugal,

$$\begin{aligned}\sigma_c &= 2,7 \cdot 10^5 / 67,20 \cdot 10^{-3} = 4.029.851 \text{ kg/m}^2 \\ &= 403 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

### C. Perhitungan Tegangan Geser

Tegangan geser terjadi karena gaya aksial dan gaya keliling dalam hal ini resultannya :



$$\tau_s = Fr / A, \text{ dimana } Fr = [ Fa^2 + Fu^2 ]^{0,5}$$

jadi,

$$\begin{aligned} \tau_s &= [ 16.897^2 + 2703,7^2 ]^{0,5} / 67,04 \cdot 10^{-3} \\ &= 255.402 \text{ kg/m}^2 = 25,5 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

### 3.7.8. Perencanaan Bahan Sudu Jalan

Ada dua hal yang harus dipertimbangkan dalam memilih bahan sudu jalan, yaitu :

1. Harus mampu mengatasi besarnya gaya-gaya yang terjadi pada setiap bilah sudu jalan sehingga aman dalam kondisi operasi.
2. Tahan terhadap korosi yang terjadi akibat berada pada lingkungan laut yang bersifat korosif, terutama air laut.

Bahan sudu dipilih, AISI 4320 dengan data-data ;

- Tensile Strength =  $84.000 \text{ lb/in}^2 = 5903,9 \text{ kg/cm}^2$
- Yield Strength =  $61.625 \text{ lb/in}^2 = 4331,37 \text{ kg/cm}^2$

Untuk mengetahui kekuatan ijin dari bahan terhadap tegangan tarik maka,  $[\sigma]_{\text{bahan}} = \sigma / n$

dimana,

$$\sigma = \text{tegangan tarik bahan} = 84.000 \text{ lb/in}^2 = 5903,9 \text{ kg/cm}^2$$

$$n = \text{faktor keamanan} = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3$$

- $n_1$  = faktor keamanan karena pembebanan, 1-1,5

diambil 1,5

- $n_z$  = faktor keamanan karena ketidak-homogenan material, dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel. 19. Faktor keamanan material

$\sigma_y / \sigma_u$	0,45-0,55	0,55-0,70	0,70-0,90	cast parts
$n_z$	1,20-1,50	1,40-1,80	1,70-2,20	1,60-2,50

untuk  $\sigma_y / \sigma_u = 61.625 / 84.000 = 0,73$  dari tabel dapat ditentukan harga  $n_z = 1,8$

- $n_s$  = faktor keamanan karena kondisi pemakaian, 1-1,5  
diambil 1,5

sehingga,

$$[\sigma] = 84.000 / (1,5 \times 1,8 \times 1,5) = 20.740,7 \text{ lb/in}^2$$

$$= 1457,76 \text{ kg/cm}^2$$

Keamanan pemakaian tentunya harus dibandingkan dengan tegangan-tegangan yang terjadi. Tegangan tarik total yang diakibatkan momen bending dan gaya sentrifugal,  $\alpha$  adalah ;

$$\alpha = \alpha_b + \alpha_c = (400 + 403) \text{ kg/cm}^2 = 803 \text{ kg/cm}^2$$

Tegangan gabungan antara tegangan tarik dan tegangan geser diperoleh dengan rumus di bawah, dimana penggabungan ini dianggap sebagai tegangan tarik pada luasan penampang kaki sudu.

$$\begin{aligned}\sigma_g &= [ \sigma_1^2 + 3\sigma_s^2 ]^{0,5} \\ &= [ 803^2 + 3.(25,5)^2 ]^{0,5} = 804,2 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan tegangan yang terjadi pada kaki sudu dan tegangan ijin bahan ternyata ;

$$\sigma_g < [ \sigma ]$$

maka bahan dapat dikatakan aman dalam kondisi operasi.

Sedangkan masalah korosi secara umum dapat diterangkan bahwa komposisi bahan AISI 4320 adalah jenis Stainless-Steel yang mempunyai ketahanan korosi, karena komposisi bahannya adalah

$$\begin{aligned}C &: 0,17\% - 0,42\% \\ Mn &: 0,45\% - 0,65\% \\ Ni &: 1,65\% - 4,0\% \\ Cr &: 0,40\% - 0,60\%\end{aligned}$$

Sedang persyaratan untuk tidak terjadinya korosi, dimana bahan harus mengandung :

$$\begin{aligned}C &: < 0,7\% \\ Ni &: 1\% - 8\% \\ Cr &: 0,2\% - 0,8\%\end{aligned}$$

sehingga dapat dikatakan bahwa Stainless-Steel AISI 4320 memiliki ketahanan terhadap pengaruh korosi.

### 3.8. LANGKAH PENENTUAN PERENCANAAN DIMENSI SUDU ANTAR

Besaran-besaran utama yang harus ditentukan dan dihitung dalam perencanaan adalah :

A. Panjang aksial, (a) tiap penampang silindris direncanakan sama yaitu,  $a = 3,0$  m

B. Tebal Sudu Antar ;

\*) Tebal masuk,  $S_i = 0,18$  m

\*) Tebal bagian luar,  $S_o = 0,01$  m

\*) Jumlah Sudu Antar, direncanakan = 8 Buah

C. Besar Sudut  $\alpha_1 = 90^\circ$ , hal ini dimaksudkan untuk mengurangi kerugian head sekecil mungkin saat air masuk sudu antar.

D. Besar Sudut  $\alpha_4$

$$\alpha_4 = C_m / C_u = 3,1 / 0,823 \quad (\text{data dari sudu jalan})$$

$$= 3,76^\circ$$

E. Direncanakan jarak antara 2 sudu = 1,1 m

F. Besar Sudut  $\alpha_3$ , ditentukan dengan coba-coba (trial and error)

mengingat persamaan yang sedemikian ;

$$\text{tg } \alpha_3 = 1,8 \times \text{tg } 3,76^\circ / (1,8 - 0,1/\sin \alpha_3)$$

menjadi  $(1,8 - 0,1/\sin \alpha_3) \text{tg } \alpha_3 = 6,77$

didapat  $\alpha_3 = 70^\circ$

G. Besar Sudut Pusat,  $\phi = \alpha_1 - \alpha_3 = 90^\circ - 70^\circ = 20^\circ$

H. Besar sudut  $\theta = \phi / 2 = 10^\circ$

I. Sudut Chord,  $\alpha_2 = \alpha_1 - \theta = 90^\circ - 10^\circ = 80^\circ$

J. Tinggi yang direncanakan = 2,0 m

### 3.8.1. Pengaturan Sudu Jalan

Sudu-sudu jalan terdiri dari 2 kelompok yaitu sudu jalan untuk masuknya air dan sudu jalan untuk keluarnya air. Bila arah arus dari Utara ke Selatan sudu-sudu jalan dapat diatur sesuai dengan posisi rencana.

Sedang apabila arah arus sebaliknya yaitu dari Selatan ke Utara maka sudu jalan dapat diatur, dimana sudu-sudu untuk air masuk dipindahkan ke tempat masuknya air.

Sistem pengaturan pemindahan sudu-sudu antar dapat dengan manual ataupun dengan otomatis. Detail sistem pengaturan dari sudu-sudu jalannya tidak dibahas di sini.

### 3.8.2. Perhitungan gaya yang bekerja pada sudu antar

Maksud dari perhitungan gaya ini adalah untuk mengetahui kekuatan sudu antar dalam hal tegangan yang timbul saat operasi.

Adapun gaya yang bekerja pada sudu antar adalah gaya aksial yang ditimbulkan oleh adanya tekanan fluida.

Besar gaya aksial pada tiap sudu (pada 2 sisi ; muka dan belakang) dapat adalah :

$$F_{ak} = \rho \cdot g \cdot Q \dots (N), \text{ (pers.70)}$$

dimana ,  $\rho$  = massa jenis air laut,  $1025 \text{ kg/m}^3$

$g$  = percepatan gravitasi bumi,  $9,8 \text{ m/s}^2$

$Q$  = kapasitas air laut yang masuk sudu antar =  $A.V$

dimana ;  $A$  = Luasan ruang yang dimasuki arus,

sebesar panjang x tinggi =  $3 \times 2$

$$= 6 \text{ m}^2$$

$V$  = kecepatan arus laut,  $4,2 \text{ m/s}$

sehingga  $Q = A.V = 6 \times 4,2 = 25,2 \text{ m}^3/\text{s}$

jadi gaya aksial,  $F_{ak} = 1025 \times 9,8 \times 25,2 \times 2$

$$= 170.716 \text{ N} = 17.420 \text{ kg}$$

Sedangkan tegangan yang terjadi pada luasan sudu yang terkena arus adalah ;

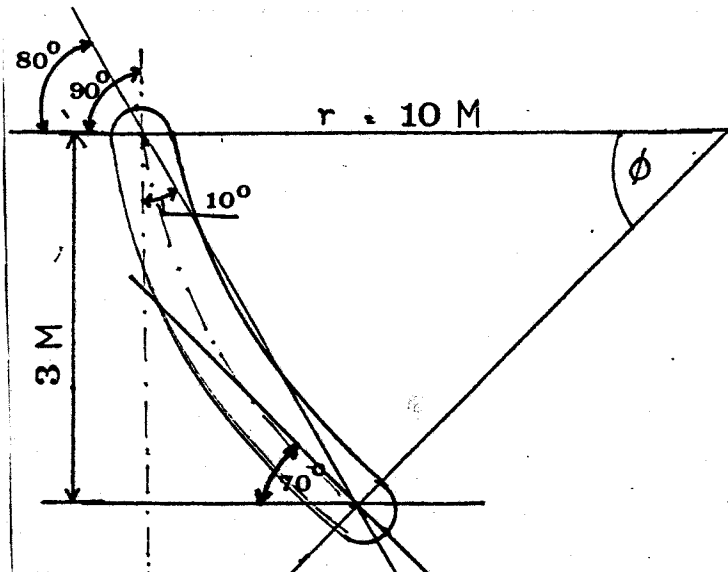
$$\tau = F_{ak} / A_{sd} , \text{ dimana } A_{sd} = 3 \times 2 = 6 \text{ m}^2 = 6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2.$$

$$= 17.420 / 6 \cdot 10^4 = 0,87 \text{ kg} / \text{cm}^2 .$$

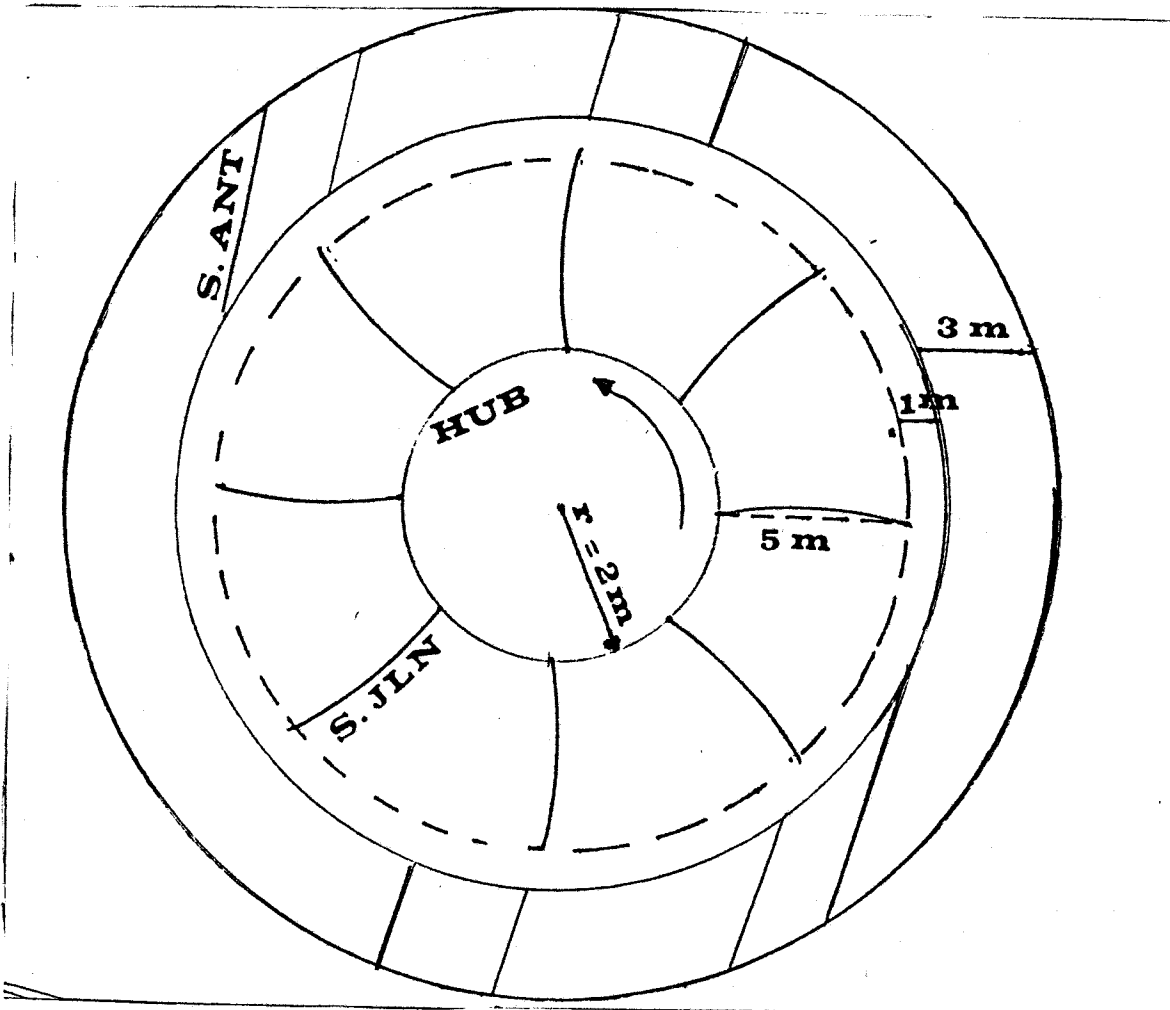
Direncanakan bahan sudu antar adalah : AISI 4320

sehingga  $\tau_g < [\sigma]$ , dengan demikian sudu antar dapat beroperasi dalam kondisi aman.

Gambar . 24 Rencana Penampang Sudu Antar



Gambar.25 Rancangan Umum sudu Jalan dan Sudu Antar



### 3.9. PERENCANAAN POROS TURBIN

Besarnya Torsi yang terjadi pada poros dapat dihitung dengan persamaan (49) ;

$$M_t = 71.620 \text{ N} / n \dots \text{ Kg.cm} ;$$

dimana,

- Harga N dapat diketahui dengan rumus ;

$$N = P \cdot f_c, \text{ dengan ;}$$

$f_c$  = faktor koreksi pada tabel 10. diambil  $f_c = 1,25$

$P$  = daya output turbin = 4666 HP

$$\text{Maka } N = 4666 \cdot 1,25 = 5832,5 \text{ HP}$$

- $n$ , adalah putaran turbin. Ada 2 macam putaran yang terjadi yaitu putaran normal dan saat putaran liar.

Jadi ; \*) Momen torsi pada putaran normal,

$$M_t = 71.620 \times 5832,5 / 75 = 5.569.649 \text{ kg.cm}$$

\*) Momen torsi pada putaran liar,

$$M_t' = 71.620 \times 5832,5 / 187,5 = 2.227.859 \text{ kg.cm}$$

Untuk mencari diameter poros yang diijinkan didapat dengan rumus:



$$d = [ 5,1/\tau_a \times K_t \times C_b \times T ]^{1/3}, (\text{mm}) \dots (\text{Pers.60})$$

dimana,

$\tau_a$  = Tegangan geser yang diijinkan,  $\text{kg/mm}^2$

$$= \sigma_b / (Sf_1 \times Sf_2), \dots (\text{Pers.61})$$

dimana  $\sigma_b$  ; tegangan ultimate bahan  $\text{kg/mm}^2$

$$= 6,68 \cdot 10^7 \text{ kg/mm}^2$$

$Sf_1$  ; koreksi bahan, untuk baja = 6

$Sf_2$  ; koreksi konsentrasi tegangan

( berkisar 1,3-3 ), diambil 1,65

sehingga, tegangan geser yang diijinkan ;

$$= 6,75 \cdot 10^6 \text{ kg/mm}^2$$

$K_t$  = Faktor koreksi momen puntir, berkisar 1,0-1,3

diambil 1,3.

$C_b$  = Faktor koreksi beban lentur, berkisar 1,2-2,3

diambil 2,0

$T$  = Momen Puntir pada poros,  $\text{Kg.mm}$

$$= 9,74 \cdot 10^5 \text{ Pd} / n \dots \dots (\text{Pers.62})$$

dimana ;  $P_d$  = Daya yang telah dikoreksi

$$= P \cdot f_c, \dots (\text{KW})$$

dengan  $P$  ; daya turbin, 3480 KW

$f_c$  ; koreksi faktor daya

diambil 1,25

$n$  = putaran poros, diambil pada  
putaran liar ; 187,5 rpm

$$\text{jadi } Pd = 3480 \times 1,25 = 4350 \text{ KW}$$

sehingga momen puntir poros yang direncanakan,

$$T = 9,74 \cdot 10^5 \times 4350 / 187,5 = 1,45 \cdot 10^8 \text{ Kg.mm}$$

jadi diameter poros yang diijinkan adalah ;

$$d = [ 5,1 / (6,75 \cdot 10^6) \times 1,3 \times 2,0 \times 1,45 \cdot 10^8 ]^{1/3}, (\text{mm})$$
$$= 380 \text{ mm}$$

Namun karena pertimbangan operasi yang kontinu dihubungkan dengan faktor kelelahan bahan , maka direncanakan diameter poros adalah 500 mm.

### 3.9.1. Perencanaan Dimensi Poros

Dimensi poros direncanakan seperti pada gambar di bawah ini.



### 3.9.2. Gaya yang terjadi pada poros

Ada beberapa gaya yang terjadi pada poros yaitu :

#### A. Gaya Keliling

Gaya ini diakibatkan oleh Momen torsi, didapat dengan persamaan (51) :  $F_{kell} = M_t / 0,5.D$  , dimana ;

$M_t$  = Momen Torsi pada putaran liar,  $5,56.10^7$  Kg.mm

$D$  = Diameter Poros, 1000 mm

maka,  $F_{kell} = 5,56 \cdot 10^7 / 0,5 \cdot 500 = 22.240$  N

#### B. Gaya Aksial

Gaya ini ada dua macam yaitu akibat aliran air dan berat rotor (sudu) sendiri,

$F_{ak} = F_a + G_r$  ; dimana,

$F_a$  = gaya aksial karena aliran air

$G_r$  = gaya berat rotor

Untuk berat rotor terdiri atas ;

##### 1) Berat poros

Dimana berat poros dihitung dengan rumus :

$$W_p = V_p \cdot \rho \cdot g$$

dengan,

$$V_p = \text{Volume poros, m}^3$$

$$\begin{aligned} m_j &= \text{massa jenis poros untuk bahan baja} \\ &= 7,83 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

$$g = \text{percepatan gravitasi bumi, } 9,8 \text{ m/s}^2$$

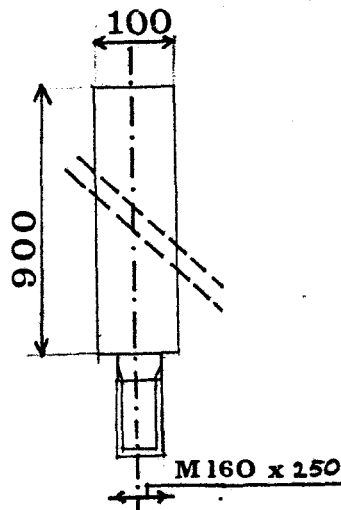
Dengan diketahuinya dimensi poros maka dapat dihitung volumenya :

$$\begin{aligned} V_p &= \pi/4 \left( ([450^2 - 150^2] \times 300) + ([500^2 - 150^2] \times 350) \right. \\ &\quad + ([400^2 - 150^2] \times 150) + ([500^2 - 150^2] \times 5000) \\ &\quad \left. + ([1100^2 - 150^2 - 6 \cdot (100^2)] \times 150) \right) = 2,55 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{maka berat poros, } W_p &= 2,55 \times 7,83 \cdot 10^3 \times 9,81 \\ &= 196.423,80 = 20.043 \text{ kg} \end{aligned}$$

## 2) Berat Batang Pengatur Sudu

Bahan batang pengatur adalah AISI 4320 dengan massa jenis sebesar  $7,83 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ .



Gambar. 27 Dimensi batang pengatur Sudu

Dari gambar batang pengatur sudu dapat dicari volumenya;  $V_b = \pi/4 (100)^2 \cdot 900 = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$  sehingga beratnya adalah ;

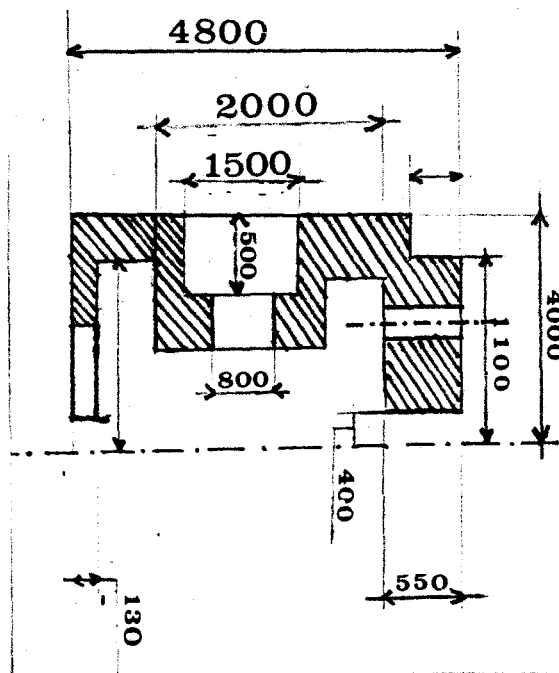
$$W_b = 0,7 \cdot 10^{-2} \times 7,83 \cdot 10^3 \times 9,81 = 542,6 \text{ N}$$

$$= 55,4 \text{ kg}$$

karena ada 4 pasang sudu maka ada 8 batang pengatur, sehingga,  $W_b = 8 \times 542,6 \text{ N} = 4341 \text{ N}$

### 3) Berat Hub

Dimensi hub direncanakan seperti gambar di bawah ini dengan bahan AISI 4320, volumenya adalah ;



Gambar. 28 Dimensi Hub

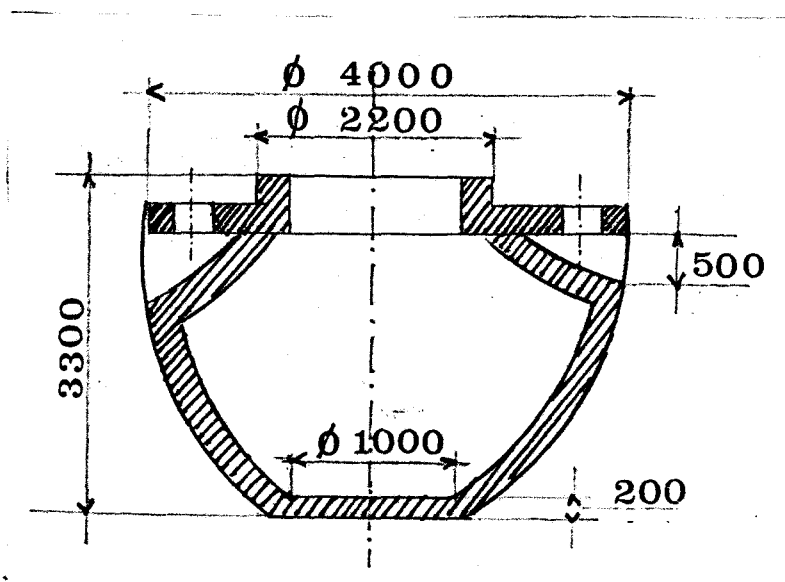
$$V_h = \pi/4 (([4000^2 - 6(100)^2] \times 130) + ([4000^2 - 1100^2] \times 500) + ([2000^2 - 1500^2] \times 800) + ([1500^2 - 800^2] \times 250) + ([4000^2 - 1100^2] \times 2000) + ([2600^2 - 1400^2] \times 130)) = 19,33 \text{ m}^3$$

sehingga berat hub adalah :

$$W_h = 19,3 \times 7,83 \cdot 10^3 \times 9,81 = 1,48 \cdot 10^6 \text{ N} \\ = 151.162 \text{ kg}$$

#### 4).Berat Tutup Hub

Dengan bahan AISI 4320 dan dimensi seperti pada gambar di bawah ini,



Gambar. 29 Dimensi Tutup Hub

maka dapat ditentukan volumenya ;

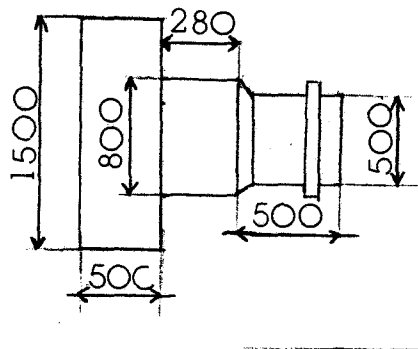
$$V_{th} = 14,21 \text{ m}^3$$

sehingga berat tutup hub :

$$\begin{aligned} W_{th} &= 14,2 \times 7,83 \cdot 10^3 \times 9,81 \\ &= 1,08 \cdot 10^6 \text{ N} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ kg} \end{aligned}$$

#### 5).Berat Sudu Jalan

Dari perhitungan terdahulu didapat massa untuk sebuah bilah sudu = 1707 Kg maka untuk 4 buah sudu jalan,  $W_s = 4 \times 1707 \times 9,81 = 66.914 \text{ N}$



Gambar. 30. Dimensi Kaki sudu jalan

sedangkan kaki sudu jalan dengan dimensi seperti pada gambar memiliki volume ;

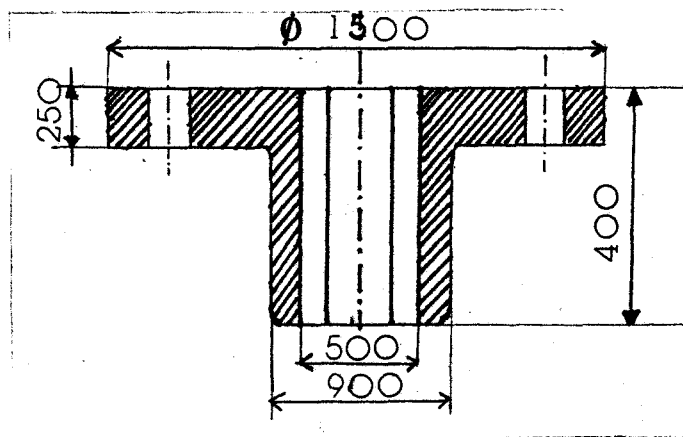
$$\begin{aligned} V_{ks} &= \pi/4 ( [400 \times 1500^2] + [280 \times 800^2] \\ &\quad + [500 \times 500^2] ) = 1,20 \text{ m}^3 \end{aligned}$$



maka berat kaki sudu jalan adalah :

$$W_{ks} = 1,20 \times 7,83 \cdot 10^3 \times 9,81 = 92.175 \text{ N} = 9406 \text{ kg}$$

6) Berat Kopling Flens



Gambar. 31. Dimensi Kopling Flens

Direncanakan berdimensi seperti pada gambar di atas dengan bahan AISI 4320, maka didapatkan volumenya ;

$$V_f = 1.1 \text{ m}^3$$

sehingga berat kopling flens,  $W_f$

$$W_f = 1,1 \times 7,83 \cdot 10^3 \times 9,81 = 85.264 \text{ N}$$

7) Berat Baut Pengikat Poros dengan Hub

Jumlah baut pengikat ada 6 buah dimana

masing-masing memiliki berat  $W_{bt} = 5,0 \text{ N}$  yang dihitung dengan mengetahui dimensi baut tersebut, maka untuk 6 baut beratnya,  $W_{bt} = 30,0 \text{ N}$

Gaya aksial karena aliran air dari perhitungan adalah :

$F_a = 165.591 \text{ N} = 16.897 \text{ kg}$ , maka gaya total yang bekerja seluruhnya pada poros :

$$\begin{aligned} F &= F_{ak} + F_a + G_r \\ &= F_{kell} + F_a + W_p + W_b + W_h + W_{th} + W_s + W_{ks} + W_f + W_{bt} \\ &= 3,5 \cdot 10^6 \text{ N} \end{aligned}$$

Dengan diketahuinya gaya aksial yang bekerja pada poros maka dilakukan pemeriksaan terhadap kekuatan poros dengan dimensi yang direncanakan.

Bahan poros dipilih : Baja dengan standar AISI 4140 dengan data-data sebagai berikut ;

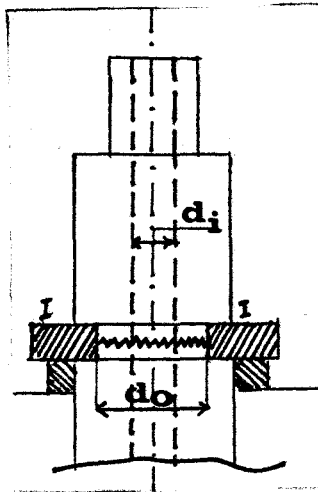
- tensile strength =  $95.000 \text{ lb/in}^2 = 6,55 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$
- yield strength =  $60.500 \text{ lb/in}^2 = 4,14 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

### 3.9.3. Tegangan yang terjadi pada Poros

Pada penampang I-I merupakan penampang poros dengan diameter poros yang terkecil yang akan terjadi tegangan

terbesar dari diameter lainnya.

Berikut adalah gambar 32 yang memperlihatkan penampang I-I



Gambar. 32 Penampang I-I

A. Tegangan akibat momen torsi, yaitu tegangan geser

$$\tau_s = T \cdot C / I_p \dots\dots \text{kg/mm}^2$$

dimana,

T = momen torsi yang terbesar yaitu pada saat turbin bekerja pada putaran normal

C = Jarak kerja tegangan terhadap pusat poros

$I_p$  = Momen Inersia Polar =  $\pi (d_o^4 - d_i^4) / 32$

maka tegangan geser,

$$\begin{aligned} \tau_s &= ( 5,56 \cdot 10^7 \times [400/2] ) / ( \pi [400^4 - 150^4] / 32 ) \\ &= 4,5 \text{ kg/mm}^2 = 0,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Karena adanya perubahan diameter poros maka perlu diperhitungkan adanya konsentrasi tegangan sehingga tegangan menjadi :

$$\tau s' = kt \cdot \tau s$$

dimana  $kt$  adalah faktor konsentrasi tegangan poros yang dapat dilihat pada tabel 11.

Dengan menggunakan tabel tersebut maka untuk ;

$$D = 500 \text{ mm dan } d = 400 \text{ mm, harga } r = (500-400)/2 = 50 \text{ mm}$$

$$D/d = 500/400 = 1,25 \text{ dan } r/d = 50/400 = 0,125$$

maka harga  $Kt = 1,3$ .

$$\text{sehingga } \tau s' = 1,3 \times 0,5 \cdot 10^6 = 0,65 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

B. Tegangan akibat gaya ke arah aksial menimbulkan tegangan tarik,

$$\sigma = F_r / A \dots\dots \text{N/m}^2$$

dimana,

$$F_r = F - W_f = 3,5 \cdot 10^6 - 85.264 = 3,41 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$A = \pi/4 (D^2 - d^2) = \pi/4 (400^2 - 150^2) = 108.000 \text{ mm}^2 = 0,1 \text{ m}^2$$

$$\text{maka } \sigma = 3,41 \cdot 10^6 / 0,1 = 3,4 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

tegangan tarik ini akan dipengaruhi oleh faktor konsentrasi akibat perubahan diameter poros, dimana ;

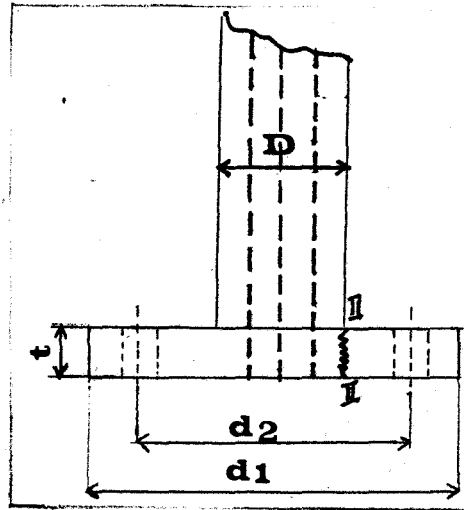
$$D/d = 1,25 \text{ dan } r/d = 0,125 \text{ sehingga :}$$

$$\sigma' = 1,65 \times 3,41 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 = 5,7 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

Tegangan gabungannya adalah :

$$\begin{aligned}\sigma_g &= [ (\sigma')^2 + 3 (\tau_s')^2 ]^{0,5} \\ &= [ (5,7 \cdot 10^7)^2 + 3(0,65 \cdot 10^6)^2 ]^{0,5} = 5,71 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

Tegangan pada penampang II-II karena momen torsi dan gaya aksial maka akan terjadi tegangan bengkok dan geser dimana gaya aksial yang bekerja pada penampang II-II :



Gambar. 33 Penampang II-II

$$F_{II} = F - W_p - W_f = 3,5 \cdot 10^6 - 196.424 - 85.264$$

$$= 3.218.312 \text{ N}$$

Sedangkan gaya keliling oleh momen torsi pada penampang II-II adalah,

$$F_{kell} = Mt / (0,5 \cdot d_2) \dots\dots \text{ N}$$

dimana,

$d_2$  = diameter jarak baut terhadap pusat poros, 1100 mm

$$M_t = \text{momen torsi, (T) ; } 5,56 \cdot 10^7 \text{ kg.mm}$$

maka,

$$F_{kell} = 5,56 \cdot 10^7 / (0,5 \cdot 1100) = 101.090 \text{ N}$$

Resultan gaya keliling dan gaya aksial :

$$\begin{aligned} F_r &= [ (F_{kell})^2 + (F_{II})^2 ]^{0,5} \\ &= [ (1,01 \cdot 10^5)^2 + (3,2 \cdot 10^6)^2 ]^{0,5} = 3,21 \cdot 10^6 \text{ N} \end{aligned}$$

### C. Tegangan Bengkok

Dimana tegangan ini besarnya ,  $\sigma_b = M_b/W_b \dots \text{N/m}^2$  ;

dengan,

$$M_b = \text{momen bengkok, } 0,5 \cdot F_{II} \cdot (d_2 - D)$$

$$W_b = \text{momen tahanan bengkok} = \pi/6 \cdot D \cdot t^2$$

sehingga

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 0,5 F_{II} (d_2 - D) / (\pi/6 \cdot D \cdot t^2) \\ &= 0,5 \times 3,2 \cdot 10^6 (800 - 500) / (\pi/6 \cdot 500 \cdot 150^2) \\ &= 8,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2. \end{aligned}$$

### D. Tegangan Geser, akibat gaya resultan

$$\begin{aligned} \tau_s &= F_r / A , \dots \text{N/m}^2 ; \text{ dimana } A = \pi \cdot D \cdot t \\ &= 3,2 \cdot 10^6 / (\pi \cdot 500 \cdot 150) = 1,4 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Tegangan gabungannya , geser dan tarik adalah :

$$\begin{aligned} \sigma_g &= [ (\sigma_b)^2 + 3 \cdot (\tau_s)^2 ]^{0,5} \\ n &= [ (8,3 \cdot 10^6)^2 + 3 \cdot (1,4 \cdot 10^6)^2 ]^{0,5} \\ &= 8,65 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

### 3.9.4. Pemeriksaan Kekuatan Bahan Poros

Pemilihan bahan poros dengan data yang diberikan tentunya harus memiliki kekuatan atau tegangan ijin yang lebih besar dari tegangan kerja yaitu saat beroperasi. Adapun tegangan ijinnya adalah ;

$$[\sigma] = \sigma / (n_1 \cdot n_2 \cdot n_3)$$

dimana,

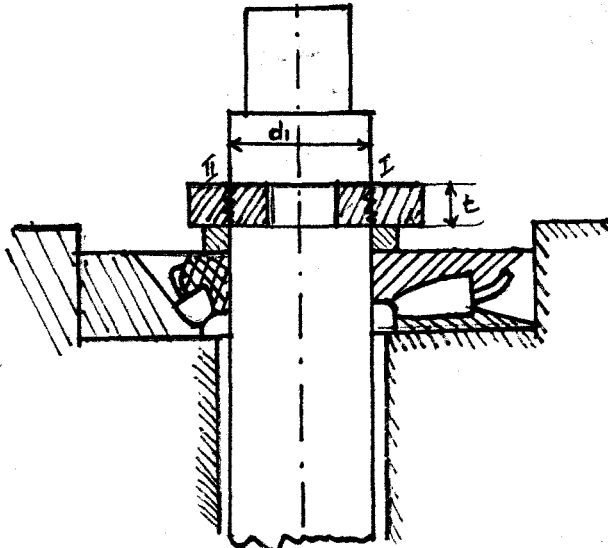
- $n_1$  = faktor keamanan akibat pembebanan berkisar antara 1 - 1,5 ; diambil 1,5
- $n_2$  = faktor keamanan akibat ketidakhomogenan material diberikan pada tabel.19 dimana perbandingan  $\sigma_y/\sigma_u = 60.500/95.000 = 0,64$  didapat  $n_2 = 1,6$
- $n_3$  = faktor keamanan karena kondisi pemakaian berkisar 1-1,5 diambil 1,5

maka hasilnya

$$\begin{aligned} [\sigma] &= 6,55 \cdot 10^8 / (1,5 \times 1,6 \times 1,5) \\ &= 1,82 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

ternyata didapatkan tegangan ijin masih lebih besar dari tegangan gabungan saat poros beroperasi,  $[\sigma] > \sigma_g$ , hal ini dapat menjamin keamanan dalam pemakaiannya.

## 3.9.5. Perhitungan Kekuatan Pada Split Ring



Gambar. 34 Split Ring.

Fungsi Split Ring di sini sebagai pengunci bantalan dan menahan gaya yang bekerja pada turbin.

A. Tegangan Kompresi pada Penampang I-I (pada gambar 31.)

sebesar  $\sigma_c = F / A_c$ ,

dimana  $A_c$  adalah luasan terkompresi,  $A_c = \pi/4 (d_1^2 - d_2^2)$

jadi ;  $\sigma_c = 3,5 \cdot 10^6 / [\pi/4 (500^2 - 450^2)]$

$$= 3,5 \cdot 10^6 / (0,04) = 8,7 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$



B. Tegangan pada Penampang II-II, merupakan tegangan geser

$$\tau_s = F_{ak} / A_s \dots N/m^2$$

$$\text{dimana } A_s = \pi \cdot d \cdot t = 3,14 \times 450 \times 150 = 0,21 \text{ m}^2$$

$$\text{jadi } \tau_s = 3,5 \cdot 10^6 / (0,21) = 1,6 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

Kedua tegangan bekerja bersama-sama pada Split Ring maka tegangan gabungannya adalah :

$$\begin{aligned} \tau_g &= [\sigma_c^2 + 3 \cdot \tau_s^2]^{0,5} = [ (8,7 \cdot 10^7)^2 + 3 \cdot (1,6 \cdot 10^7)^2 ]^{0,5} \\ &= 9,0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Bahan Split Ring direncanakan SFNCM.70R (baja paduan) dengan data-data material :

$$\text{- Tensile Strength} = 686 \text{ N/mm}^2 = 6,86 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$\text{- Yield Strength} = 490 \text{ N/mm}^2 = 4,90 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$$

maka kekuatan tarik ijin :

$$[\sigma] = \sigma / (n_1 \cdot n_2 \cdot n_3)$$

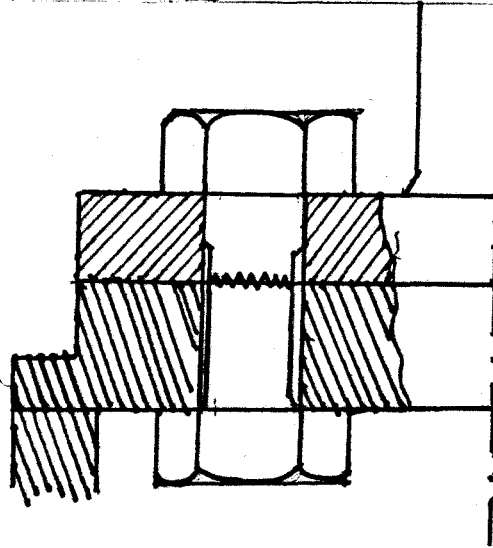
seperti pada pemeriksaan bahan poros maka  $n_1$  dan  $n_3$  diambil sama sedangkan  $n_2$  pada tabel.19 dengan perbandingan ;  
 $\sigma_y/\sigma_u = 0,71$  didapat  $n_2 = 1,7$

$$\begin{aligned} \text{sehingga, } [\sigma] &= 6,86 \cdot 10^8 / (1,5 \times 1,7 \times 1,5) \\ &= 1,8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas  $[\sigma] > \sigma_g$ , maka bahan aman untuk dipakai pada kondisi operasi.



## 3.9.6. Perhitungan Kekuatan Baut Pengikat Poros Dengan Hub



Gambar. 35 Penampang baut.

Jumlah baut yang direncanakan berjumlah 6 buah. Pada baut bekerja gaya aksial bersama dengan gaya keliling ( $F_{kell}$ ) dari momen torsi, dimana gaya tersebut;

$$F_{ir} = 3,21 \cdot 10^6 \text{ N.}$$

Sehingga untuk sebuah baut menerima gaya aksial sebesar ;

$$F_{ir} = 3,21 \cdot 10^6 / (6) = 535.000 \text{ N}$$

Baut direncanakan adalah ulir metris dengan diameter terluar  $d = 100 \text{ mm}$ .

A. Tegangan tarik akibat gaya total yang diterima

$$\text{Gaya total, } F_{tot} = F_{ir} + F_{kell} = 557.240 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}\sigma &= F_{II}' / A, \text{ dimana } A = \pi/4 \cdot dt^2 \text{ (penampang I-I)} \\ &= 557.240 / (\pi/4 \cdot 0,08^2) = 6,9 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

B. Tegangan gabungannya, antara tarik dan geser

Tegangan tariknya telah diketahui, sehingga tegangan gesernya adalah ;

$$\tau_s = F_{tot} / A_s \quad \text{N/m}^2.$$

$$\text{dimana } A_s = \pi \cdot dt \cdot t = \pi \cdot 0,1 \cdot 0,15 = 0,05 \text{ m}$$

$$\text{sehingga ; } \tau_s = 557.240 / 0,05 \text{ m} = 1,1 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

Jadi tegangan gabungannya adalah :

$$\begin{aligned}\sigma_g &= [\sigma^2 + 3 \cdot \tau_s^2]^{0,5} \\ &= [ (6,9 \cdot 10^7)^2 + 3 \cdot (1,1 \cdot 10^7)^2 ]^{0,5} \\ &= 6,99 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

Pemeriksaan terhadap bahan baut dengan memilih bahan baut SFNCM 70 R seperti pada bahan Split Ring, maka tegangan ijin bahan untuk baut adalah :  $1,8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ , jika dibandingkan dengan tegangan kerjanya maka  $[\sigma] > \sigma_g$ , sehingga diperbolehkan untuk dipakai.

### 3.9.7. Pemeriksaan Poros Terhadap Defleksi Puntiran

Panjang dan diameter poros berpengaruh pada harga defleksinya jika poros beroperasi, untuk pemeriksaan digunakan rumus ;

$$\theta = 584 \cdot T \cdot l / (D_o^4 [1 - (D_i/D_o)^4] \cdot G)$$

dimana,

$\theta$  = derajat defleksi puntiran, diisyaratkan 0,25-0,3 °/m

T = momen torsi, kg.mm

l = panjang poros, mm

G = modulus geser bahan untuk baja, 8,3 kg/m<sup>2</sup>

D<sub>o</sub> = diameter poros terluar, mm

D<sub>i</sub> = diameter poros dalam, mm

maka defleksi puntiran pada putaran normal untuk panjang poros tiap meternya adalah;

$$\begin{aligned} \theta &= 584 \cdot 5,56 \cdot 10^7 \cdot 6000 / (500^4 [1 - (150/500)^4] \cdot 8,3 \cdot 10^3) \\ &= 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ °/ m} \end{aligned}$$

sedangkan pada putaran liar,

$$\begin{aligned} \theta' &= 584 \cdot (2,2 \cdot 10^7) \cdot 6000 / (500^4 [1 - (150/500)^4] \cdot 8,3 \cdot 10^3) \\ &= 0,15 \text{ °/ m} \end{aligned}$$

ternyata defleksinya masih di bawah batas ijin.

### 3.9.8. Putaran Kritis Poros

Jika pada turbin terjadi penurunan beban yang tiba-tiba maka akan terjadi putaran liar. Bila terjadi hal demikian terus menerus maka tertentu dan dapat terjadi getaran yang luar biasa pada poros. Putaran ini disebut putaran kritis. Hal ini akan mengakibatkan kerusakan pada poros dan

## TUGAS AKHIR (NE 1701)

bagian-bagian pendukungnya. Oleh sebab itu poros harus direncanakan sedemikian rupa, sehingga putaran kerjanya tidak melebihi putaran kritisnya.

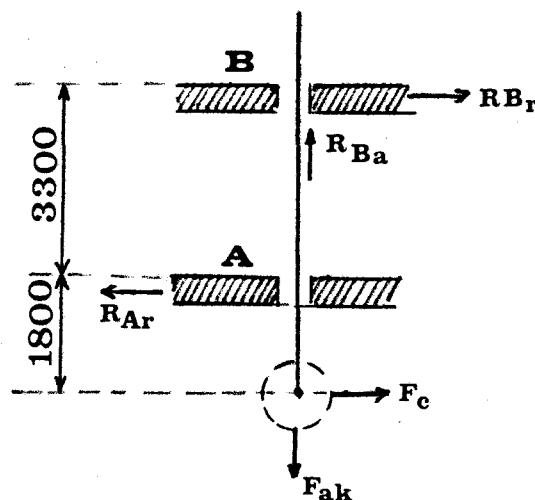
Perhitungan putaran kritis dengan persamaan ;

$$N_c = 52.700 \, d_s^2 \cdot (1/w)^{0.5} / (l_1 \cdot l_2)$$

dimana,

- $N_c$  = putaran kritis, Rpm
- $d_s$  = diameter poros seragam, mm
- $l_1$  = jarak benda pada poros terhadap bantalan 1, mm
- $l_2$  = jarak benda pada poros terhadap bantalan 2, mm
- $l$  = panjang poros diantara dua bantalan, mm
- $w$  = berat benda pada poros, kg

Jika tidak terdapat benda pada poros diantara dua bantalan maka perhitungan putaran kritis cukup untuk poros sendiri.



Gambar. 36 Perlengkapan pada poros

Dari gambar 29, didapat putaran kritisnya adalah :

$$N_c = 52.700 \cdot 500^2 \cdot (3300/20.043)^{0.5} / (1650 \cdot 1650)$$

$$= 1388 \text{ Rpm}$$

Harga  $N_c$  dibandingkan dengan putaran sesungguhnya yang dialami oleh poros dengan syarat keamanan yaitu putaran kerja poros maksimum tidak boleh lebih dari 80% putaran kritisnya.

Putaran kerja poros turbin saat mencapai harga terbesar pada saat mengalami putaran liar,  $n' = 187,5 \text{ Rpm}$

$$\text{Jadi, } 80\% \text{ putaran kritis} = 0,8 \times 1388 = 1110 \text{ Rpm}$$

Sehingga putaran kerjanya  $< 80\%$  putaran kritis

### 3.10. PERENCANAAN BANTALAN

Posisi bantalan seperti pada gambar 36 . Besarnya gaya aksial,  $F_{ak} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ N}$ , untuk mencari reaksi pada bantalan tertentu, yaitu dengan menggunakan persamaan momen,

$$\Sigma M = 0$$

Dari gambar 29. dapat dihitung besarnya gaya-gaya reaksi pada bantalan, yaitu ;

A. Reaksi pada bantalan B, dengan  $\Sigma M_A = 0$

$$F_c \cdot 1800 - 3300 \cdot R_{BR} = 0$$

$$\longleftrightarrow R_{BR} = F_c \cdot 1800/3300,$$

dimana  $F_c = \text{ gaya keliling poros} = M_t / (0,5.d) = 22.240 \text{ N}$

jadi,  $R_{BR} = 22.240 \times (1800/2300) = 17.405 \text{ N}$

B. Reaksi pada bantalan A, dengan  $\Sigma M_B = 0$

$$F_c \cdot 5100 - 3300 \cdot R_{AR} = 0$$

$$\longleftrightarrow R_{AR} = F_c \cdot 5100/3300 = 22.240 \cdot 5100/3300 \\ = 34.371 \text{ N}$$

Direncanakan tipe bantalan untuk menahan gaya aksial gaya radial yaitu ; Roller Thrust Bearing.

Adapun gaya yang bekerja pada bantalan ;

$$F_{ak} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ N dan disyaratkan bahwa } F_r < 0,55 \cdot F_{ak}$$

- Untuk bantalan B,  $F_r = R_{BR} = 17.405 \text{ N}$ .

$$\text{maka, } 0,55 F_{ak} = 0,55 \cdot 3,5 \cdot 10^6 = 1,92 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\text{jadi } R_{BR} < 0,55 \cdot F_{ak}$$

- Untuk bantalan A,  $F_r = R_{AR} = 34.371 \text{ N}$ .

$$\text{maka, } 0,55 F_{ak} = 0,55 \cdot 3,5 \cdot 10^6 = 1,92 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\text{jadi } R_{AR} < 0,55 \cdot F_{ak}$$

sehingga bantalan dapat bekerja pada beban operasi yang direncanakan.

### 3.11. PENGATUR KECEPATAN TURBIN

Pengaturan kecepatan turbin berdasar atas harga

kecepatan arus laut yang masuk melewati sudu antar dan sudu jalan, sekitar 1,8 m/s - 4,2 m/s. Sehingga bila kecepatan arusnya di luar batas-batas tersebut maka instalasi tidak dapat beroperasi.

Mekanisme pengatur kecepatan turbin yang ada dalam, aplikasi selama ini yaitu dengan memakai sistem pengaturan hidrolik dan dengan menggunakan Constan Speed Gear-box.

Dimana secara umum dapat diterangkan bahwa kerja sistem pengatur hidrolik yaitu dengan mekanisme piston pada servomotor dan tekanan minyak pelumas, sehingga memberikan tambahan atau pengurangan putaran pada poros penggerak.

Sedang pada penggunaan gear-box, dengan pengaturan gigi-gigi pengatur kecepatan (penambahan atau pengurangan).

Pada dasarnya keduanya dijadikan sebagai pengatur kecepatan turbin.

Untuk kasus dimana arah arus lautnya berubah maka sudu jalan (instalasi yang terpasang), akan berhenti, dan akan bergerak kembali bila arus (dalam arah yang baru) bergerak dengan kecepatan yang disyaratkan.

#### A. Cara kerja pengatur kecepatan sistem hidrolik

Dengan melihat gambar. 37 yang merupakan sketsa pengatur kecepatan sederhana yang menggunakan tekanan minyak dalam silinder servomotor

Saat terjadi perubahan beban pada generator, misalnya



---

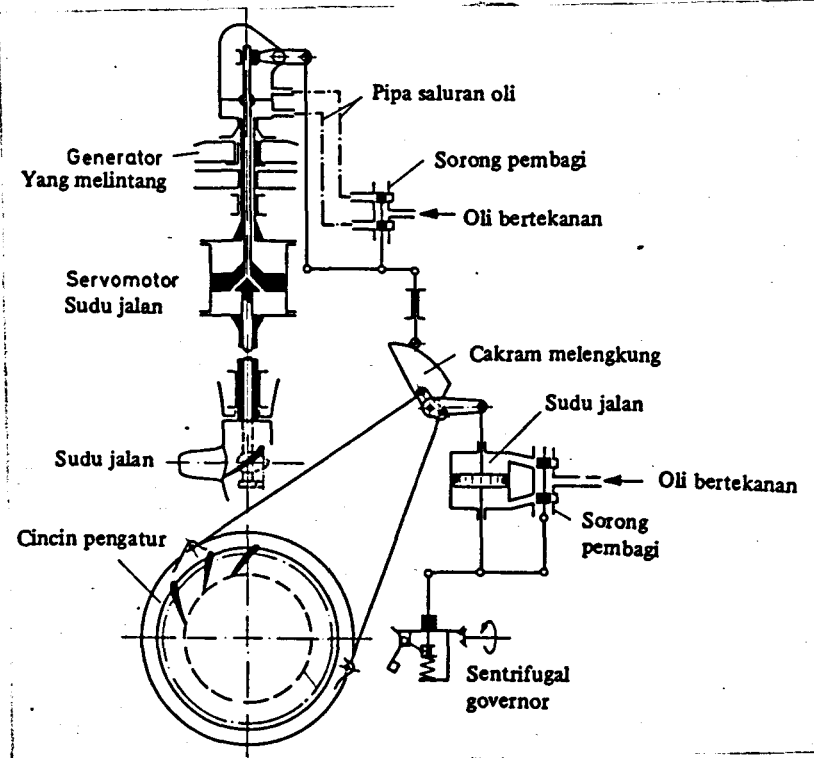
beban generator turun, maka saat itu putaran turbin akan bertambah besar, hal ini disebabkan karena turbin cenderung mempertahankan torsi mula-mula, sebelum adanya perubahan beban, sehingga gaya sentrifugal dari pendulum bertambah besar, sehingga minyak akan terpompa masuk ke dalam piston servomotor ke ruang bagian bawah, akibatnya piston akan tertekan ke atas, karena dihubungkan oleh batang piston ke sudu, maka sudu jalan akan berubah posisinya.

Bersamaan dengan kejadian ini maka silindris dashpot akan bergerak. Jadi kecepatan gerak dashpot pada mulanya sama dengan gerak piston servomotor, hal ini disebabkan minyak dalam dashpot belum mengalir melalui lubang-lubang pada piston dari ruang bawah ke ruang atas silinder dashpot.

Kemudian pada saat itu saat silindris dashpot mulai menggerakkan silinder ke atas akan tetapi karena ada tahanan dari pegas menyebabkan minyak mengalir dari ruang bawah ke ruang atas silinder dashpot dan piston dashpot turun dengan perlahan.

Saat sorong pembagi kembali ke posisi tengah, piston control-valve menutup lobang minyak yang menuju ke silinder servomotor. Keadaan ini menyebabkan piston servomotor berhenti pada posisi yang baru yang tentunya berhubungan dengan beban baru. Dengan berhentinya piston servomotor maka silinder dashpot juga berhenti. Keadaan yang sedemikian akan mendorong minyak mengalir dari ruang dashpot yang satu ke

yang lainnya kembali ke posisi semula bersama-sama dengan piston dashpot akan kembali ke posisi semula. Dan pendulum akan berputar normal kembali seperti semula dengan dengan beban baru. Hal yang sebaliknya dari proses di atas akan terjadi untuk penambahan beban.



Gambar. 37 Pengatur Kecepatan Turbin  
( Sumber Pustaka 6 )

#### B. Pengaturan dengan roda gigi ( Constan Speed Gear )

Digunakan untuk menjaga agar kecepatan putaran generator yang diterima dari putaran poros turbin adalah tetap meskipun daya yang dihasilkan oleh turbin berkurang, akibat menurunnya harga kecepatan air laut yang memasuki sudu antar dan sudu jalan.

Dari harga kecepatan berkisar 1,8 m/s- 4,2 m/s direncanakan tiga harga kecepatan yang menjadi dasar penentuan rasio pinion gigi-gigi gear yang direncanakan, yaitu 1,8 m/s, 3 m/s dan 4,2 m/s.

Besarnya putaran turbin yang dihasilkan dari kecepatan arus laut tertentu adalah  $N_g = D_s \cdot \pi \cdot b_s \cdot V$  (rpm) dimana,

$D_s$  = diameter sudu, dari sisi yang dikenai air laut, 5m

$b_s$  = jarak antar sudu antar, 1,1 m

$V$  = besarnya kecepatan arus laut, m/s

Maka besarnya kecepatan poros (kecepatan turbin) adalah :

\*) Untuk kecepatan arus laut 1,8 m/s

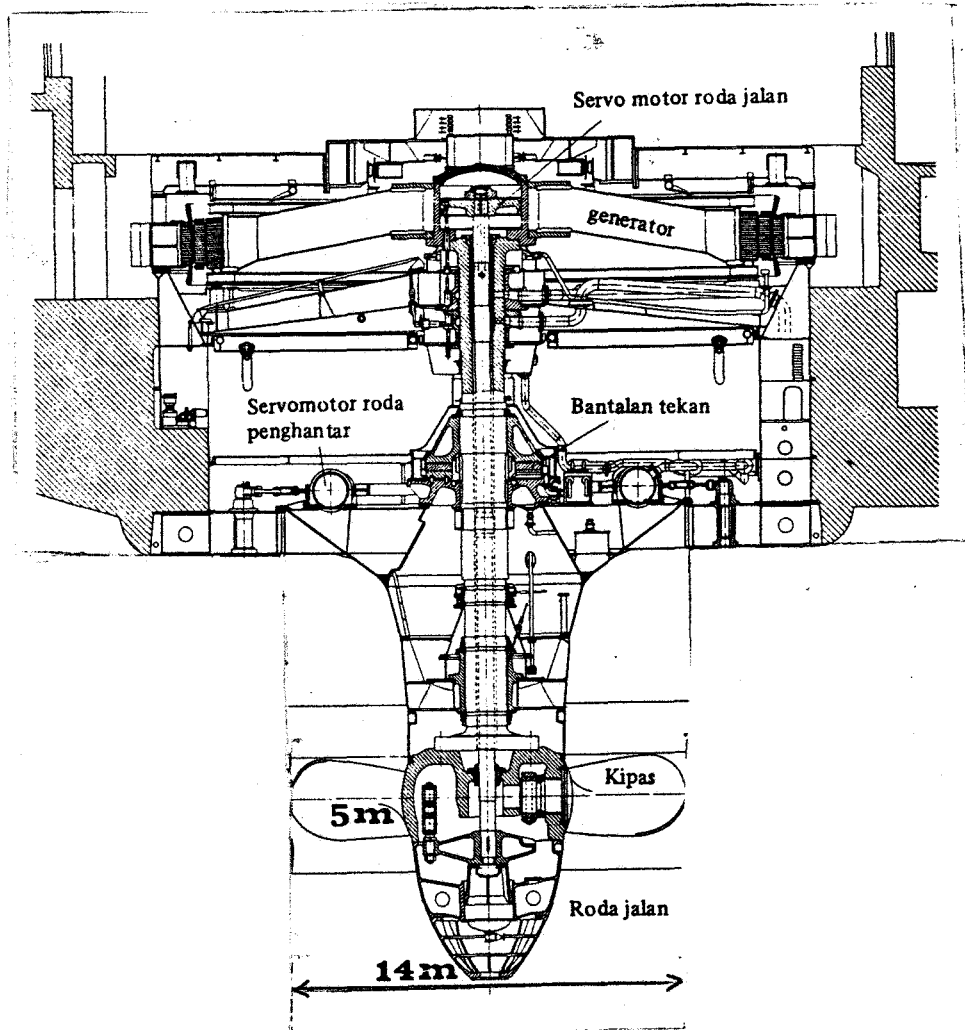
$N_g = 5 \times \pi \times 1,1 \times 1,8 = 31$  rpm, sehingga membutuhkan pinion gear-box dengan perbandingan rasio ( $31/75 = 1 : 2,4$ )

\*) Untuk kecepatan arus laut 3,0 m/s

$N_g = 5 \times \pi \times 1,1 \times 3,0 = 52$  rpm, sehingga membutuhkan pinion gear-box dengan perbandingan rasio ( $52/75 = 1 : 1,4$ )

\*) Untuk kecepatan arus laut 4,2 m/s

$N_g = 5 \times \pi \times 1,1 \times 4,2 = 75$  rpm, sehingga membutuhkan pinion gear-box dengan perbandingan rasio ( $75/75 = 1 : 1$ )

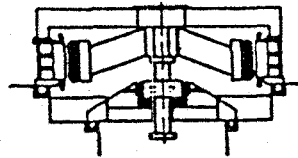


Gambar. 38 Rencana Umum ; sudu jalan, poros, generator  
( Sumber Pustaka 6 )

Pinion-pinion ini menjadi satu dalam roda gigi (variable ratio gear-box). Dan pinion-pinion berfungsi pada kecepatan arus laut yang tertentu.

### 3.12. GENERATOR

Generator dari instalasi ini terdiri dari mesin sinkron tiga fasa. Dan memiliki kecepatan rata-rata sebesar 75 rpm. Generator memiliki sebuah poros vertikal. Rotor generator direncanakan berjenis rotor payung (lihat gambar 39 ).



Gambar.39 Generator jenis payung  
( Sumber Pustaka 3 )

Generator jenis payung ini dipilih karena ;

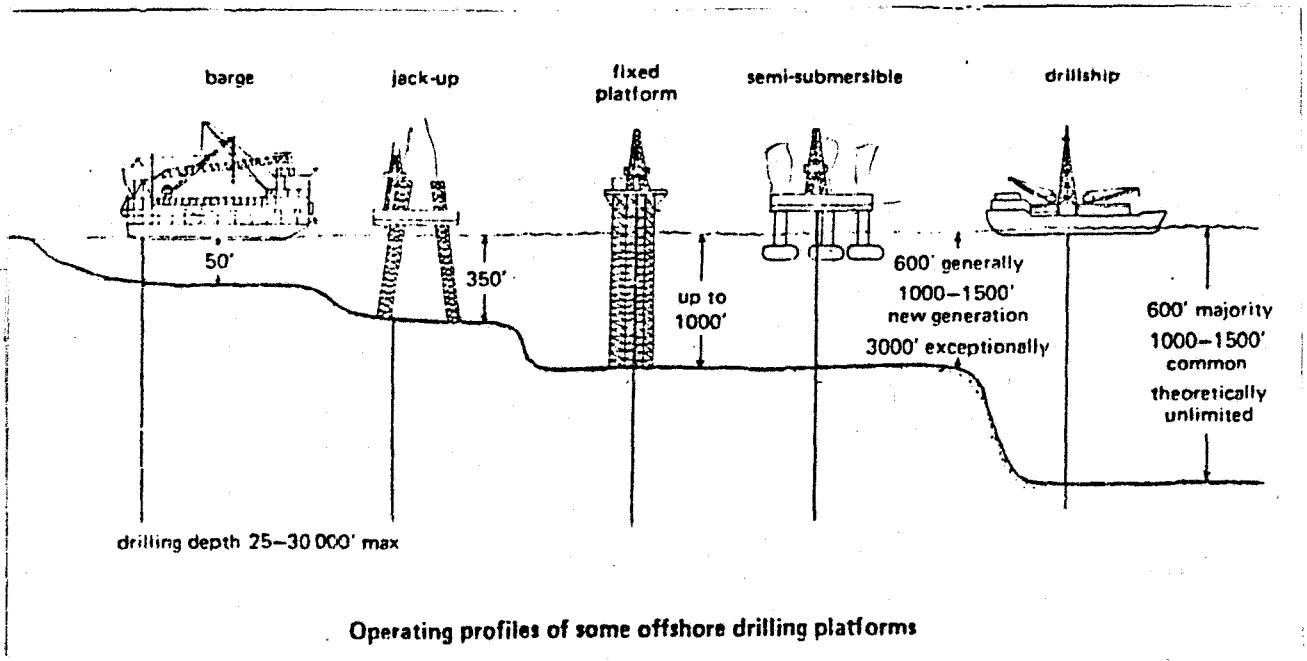
- i) Ketinggian ruangan yang dibutuhkan untuk generator jenis payung lebih pendek dari panjang keseluruhan dari lubang tempat poros tempat generator.
- ii) Kapasitas kran angkat lebih kecil.
- iii) Rotor dapat berputar tanpa mengganggu lubang poros tempat generator.
- iv) Cukup dibutuhkan satu bantalan.

- v) Pada jenis ini tidak dibutuhkan bantalan penyekat.
- vi) Lubang generator dan bantalan dapat dipasang pada saat rotor dan stator dipasang.

### 3.13. BANGUNAN INSTALASI

Dengan pertimbangan kedalaman laut Selat Bali sekitar 50 m dan arus yang relatif deras, maka untuk mendukung turbin bawah air dan peralatan lainnya, dibutuhkan adanya bangunan untuk instalasi ini.

Saat ini bangunan yang ada di lepas pantai yang diketahui adalah untuk aplikasi eksplorasi dan produksi hidrokarbon (offshore drilling platforms) yang dapat dilihat pada gambar. 37 di bawah ini.



Gambar. 40 Bangunan Lepas Pantai  
( Sumber Pustaka 10 )

Dari gambar 32, dapatlah dikatakan bahwa bangunan jack-up, fixed platform, semi-submersible, dapat dijadikan alternatif bangunan instalasi turbin ini.

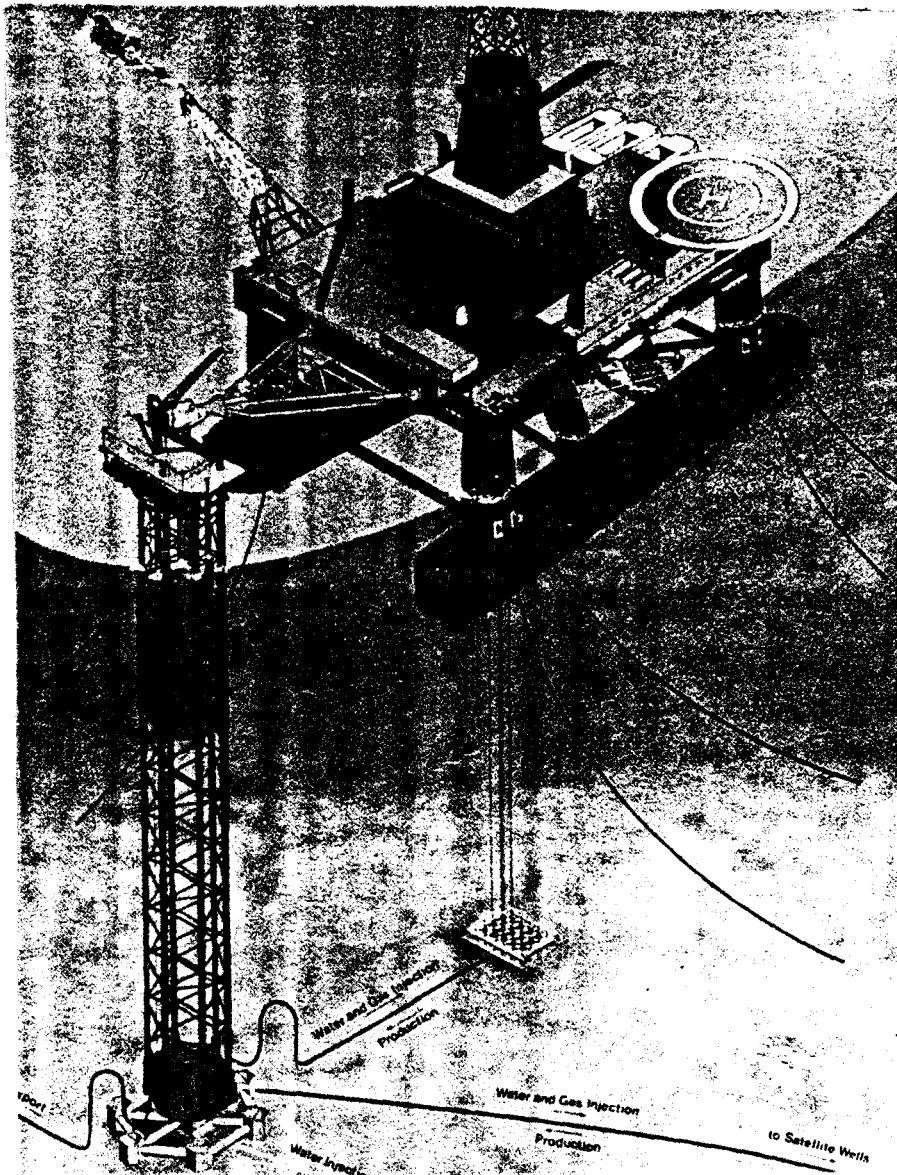
Pada instalasi TBA ini pertimbangan yang diambil dalam perencanaan bangunan untuk instalasi ini adalah

- \* ) Besarnya kecepatan arus di bawah permukaan laut yang ada di Selat Bali relatif besar, sehingga dibutuhkan bangunan yang rigid (kaku), yang kuat menahan gaya tekan dari kecepatan arus laut, terutama pengaruh arus di bawah permukaan laut..
- \* ) Disesuaikan dengan kedalaman Selat Bali (termasuk kondisi pasang-surutnya)
- \* ) Bangunan tersebut relatif statis di saat operasi dengan kondisi kecepatan arus air dan gelombang laut yang ada.

Untuk instalasi ini dipilih bangunan Semi-sumersible sebagai bangunan instalasi TBA ini.

Dimana bangunan ini konstruksinya sebagian berada di permukaan dan sebagian lagi di bawah permukaan air laut, yang dilengkapi dengan 4 buah jangkar (angkar) pada keempat sisi bangunannya. Membuat bangunan ini relatif statis

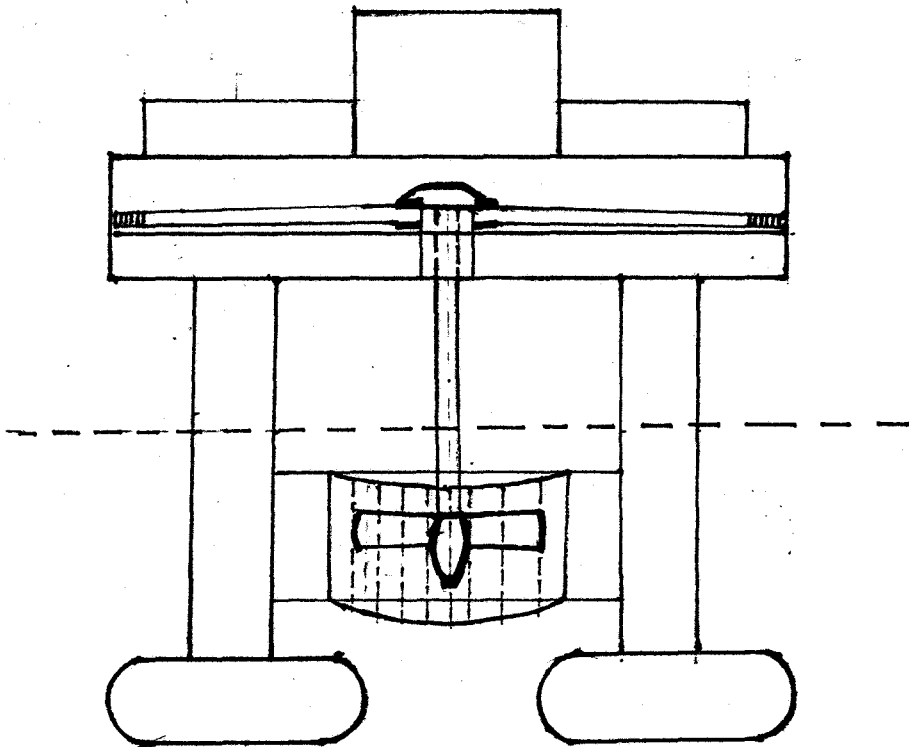
terhadap pengaruh gerakan air laut (arus laut maupun ombak). Dan Semi-submersible ini lebih sederhana konstruksinya bila dibandingkan dengan bangunan fixed-platform, karena kaki-kaki (legs) konstruksinya tidak perlu menancap hingga dasar lautnya, sehingga bangunannya relatif murah.



Gambar. 41 Konstruksi Semi-submersible  
( Sumber Pustaka 10 )



sehingga susunan instalasi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 42 Gambaran secara keseluruhan

### 3.14. BAGIAN - BAGIAN BANGUNAN INSTALASI

#### A. Umum

Pada instalasi tenaga air ini terdapat sejumlah besar peralatan listrik dan mekanik, yang secara garis besar seperti di bawah ini :

- Listrik :
- (i) Generator
  - (ii) Pengatur voltase dan eksiter
  - (iii) Transformator
  - (iv) Alat penghubung dan pembagi
  - (v) Peralatan Kamar kontrol

- Mekanik :
- (i) Bantalan, kopling
  - (ii) Pelumas dan Pompanya
  - (iii) Kompresor dan saluran udara
  - (iv) Peralatan rem
  - (v) Ventilasi dan sistem pendingin udara
  - (vi) Peralatan pengangkat

#### B. Ruangan

Bagian dari instalasi ini terdiri dari tiga ruangan, yaitu :

##### 1. Ruangan Mesin

Adalah ruang untuk penempatan mesin-mesin yang

dibutuhkan dan generator.

2. Ruang Bongkar Muat

Ruang untuk bongkar muat juga dikenal sebagai ruang penyetelan atau ruang servis.

3. Ruang Pengontrol

Ruangan pengontrol terdiri dari ruang pengontrol utama dan perlengkapan lainnya, disesuaikan dengan ruangan mesin. Dari ruangan ini dikirimkan instruksi kepada ruang operasi dimana operasi pengontrol dapat dicapai.

## B A B. I V

### K E S I M P U L A N   D A N   S A R A N

#### 4.1. KESIMPULAN

Dari perencanaan dan perhitungan yang telah didapat menunjukkan bahwa instalasi listrik tenaga arus laut adalah mungkin dilakukan (secara teknis) di Selat Bali dengan perincian hasil sebagai berikut :

1. Daya yang dihasilkan sebesar 3,5 MW dengan besarnya kecepatan arus lautnya 4,2 m/s.
2. Jenis penggerak yang cocok adalah turbin hidrolik jenis Kaplan.
3. Sistem transmisi tenaga dan sistem pembangkitnya, disesuaikan dengan kondisi operasi.
4. Bangunan laut yang dipilih adalah struktur semi-submersible.

#### 4.2. SARAN-SARAN

Dalam pengembangan ( perencanaan selanjutnya ) dari perencanaan instalasi TBA ini ada beberapa hal yang disarankan sehingga instalasi ini dapat direalisasikan secara teknis dan efisien, yaitu ;

- 
- \* ) Perlu dilakukan pengukuran yang tepat terhadap besarnya kecepatan arus laut di Selat Bali (dalam beberapa titik di daerah Selat) yang juga dengan mempertimbangkan faktor-faktor ; musim arus, gelombang laut, pasang-surut, kedalaman, dan struktur (kontour) tanah di bawah permukaan laut, sehingga di dalam perencanaan instalasi dapat lebih akurat (presisi)
  - \* ) Dibutuhkan perencanaan lanjut tentang sistem pengendalian secara otomatis sehingga diferensiasi (perbedaan) kecepatan dan arah arus laut yang terjadi dapat diatasi.
  - \* ) Perlu dilakukan studi ekonomis terhadap instalasi ini, sehingga dapat diketahui gambaran besarnya biaya (investasi) yang dibutuhkan untuk instalasi TBA ini untuk kapasitas tertentu.
  - \* ) Disarankan agar dilakukan perencanaan beberapa unit TBA di sepanjang alur Selat Bali (dengan memperkirakan kondisi alur pelayaran kapal ferry yang melewati selat), sehingga dapat dihasilkan energi (daya) listrik yang relatif lebih besar.
  - \* ) Pada sistem poros disarankan, peletakan bantalan, pada kedua ujung poros, posisi sudu jalan pada bagian tengah poros, sehingga mengurangi getaran yang terjadi, diameter poros relatif lebih kecil.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Constans.J., Marine Source Of Energy, Pergamon Press, New York, 1979.
2. Suyitno Padmosukismo, Kegiatan Eksplorasi Migas Dan Pengembangannya Khusus di Indonesia Bagian Timur, Pertamina, Jakarta, 1990.
3. M.M. Dandekar dan K.N. Sharma, Pembangkit Listrik Tenaga Air, Universitas Indonesia, Jakarta, 1991.
4. Arief Suroso, Pengukuran Arus Laut Di Selat Bali, Pusat Penelitian Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, 1991.
5. Stephen Lazarkiewics, Impeller Pumps, Pergamon Press, New York, 1985.
6. Fritz Dietzel, Turbin Pompa Dan Kompresor, Airlangga, Jakarta, 1990.
7. Miroslav Mechleba, Hydraulic Turbine Their Design And Equipment, Artia Prague Printed, Czechoslovakia, 1957.
8. M.F. Spotts, Design Of Machine Elements, Prentice - Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985
9. Sularso, Perencanaan Elemen Mesin, Airlangga, Jakarta, 1990.
10. Soegiono, Teknologi Lepas Pantai, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS, Surabaya, 1986.
11. S.L. Dixon, Mekanika Fluida, Thermodinamika Mesin Turbo, Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 1985.
12. B.S.Massey, Mechanics Of Fluids, Van Nistrand Reinhold Company Ltd, England, 1980.
13. H.Capper dan S.H.Frederic, Material For Marine

Machinery, The Institute Of Marine Engineers Press,  
London, 1976

14. Kenneth.A. Chandler, Marine And Offshore Corrosion,  
Butterworths, London, 1985
15. Victor L.Streeter dan E.Benjamin Wylie, Fluid Mechanics,  
McGraw - Hill Kogakusha Ltd, Tokyo, 1979
16. Departemen Perhubungan Direktorat Jenderal Perhubungan  
Laut RI, Majalah Dunia Maritim No. 6-7 Thn. XXXVI Juni -  
Juli , Dephub, Jakarta, 1986.
17. Dinas Hidrografi dan Oceanografi TNI-AL, Peta Laut Selat  
Bali, CV Angkasa Press, Jakarta, 1978.
18. Biro Pusat Statistik, Sensus Penduduk Tahun 1980,  
BPS Pusat, Jakarta, 1980.

## L A M P I R A N

	Hal.
Lampiran 1. Tabel Sifat Bahan .....	141
Lampiran 2. Tabel Sifat Bahan (lanjutan) .....	142
Lampiran 3. Harga Faktor Koreksi, Konsentrasi Tegangan .....	143
Lampiran 4. Gambar Jenis-jenis Penampang Airfoil .....	144
Lampiran 5. Penampang Sudu Antar .....	145
Lampiran 6. Grafik Presentasi Turbin Kaplan dan Turbin Baling-baling .....	145
Lampiran 7. Penampang Di Bawah Permukaan Air Laut Selat Bali .....	146
Lampiran 8. Tulisan ; " Arus Selat Bali " .....	147
Lampiran 9. Deret Galvanik Bahan Pada Air Laut .....	149



Lampiran 1. Tabel Sifat Bahan (Sumber Pustaka 8)

**Table A-2 Mechanical Properties of Plain Carbon and Alloy Steels**  
(based on a 1 in. diameter specimen)

AISI Type	Condition	Tensile Strength, ksi	Yield Strength, ksi	Elongat. in 2 in., %	Reduction in Area, %	Hardness, BHN	Machinability (Based on 1112 = 100)
1010	HR	64	42	28	67	107	45
	CD	78	68	16	63	129	55
	CDA	64	48	28	65	131	55
1020	HR	65	43	36	59	143	50
	CD	78	66	20	55	156	65
	A	57	52	37	66	111	90
	N	64	50	36	68	131	75
1030	HR & turned	72	44	31	63	140	—
	CD	84	76	16	57	177	65
	A	67	50	31	58	126	—
	N	76	51	32	61	149	—
1040	HR	91	58	27	50	201	63
	CD	100	88	17	42	207	65
	A	75	51	30	57	149	—
1045	N	85	50	28	55	170	60
	HR	98	59	24	45	212	56
	CD	103	90	14	40	217	60
1050	A	90	55	27	54	174	60
	N	99	61	25	49	207	—
	HR	105	67	15	—	—	—
1095	CD	114	104	9	—	—	54
	A	92	43	24	40	187	—
	N	109	62	20	39	217	—
	HR	142	83	18	38	295	—
1118	A	95	38	13	21	192	—
	N	147	73	10	14	293	—
	HR	75	50	35	55	140	—
2330	CD	85	75	25	55	170	80
	A	65	41	35	67	131	80
	N	69	46	34	66	143	80
	CD	105	90	20	50	212	50
3140	A	86	61	28	58	179	50
	N	100	68	26	56	207	—
	CD	107	92	17	50	212	55
4130	A	100	61	25	51	197	55
	N	129	87	20	58	262	—
	HRA	86	56	29	57	183	65
	CDA	98	87	21	52	201	70
	N	97	63	26	60	197	50

SOURCE: *ASME Handbook - Material Properties*, McGraw-Hill Book Co., 1964. *Reference Data Book*, Joseph T. Ryznar and Sons, Inc., 1965.  
NOTE: HR = hot rolled, HRA = hot rolled annealed, CD = cold drawn, CDA = cold drawn annealed, MRN = hot rolled normalized, A = annealed, N = normalized.

Lampiran 2. Tabel Sifat Bahan (lanjutan)

Table A-2 (continued)

AISI Type	Condition	Tensile Strength, ksi	Yield Strength, ksi	Elongat. in 2 in., %	Reduction in Area, %	Hardness, BHN	Machinability (Based on 1112 = 100)
4140	HRA	90	63	27	58	187	57
	CDA	102	90	18	50	223	66
	N	148	95	18	47	302	—
4340	HRA	101	69	21	45	207	45
	CDA	110	99	16	42	223	50
	N	185	126	11	41	363	—
4620	HR	85	63	28	64	183	58
	CD	101	85	22	60	207	64
	A	74	54	31	60	149	55
	N	83	53	29	67	174	—
4640	CDA	117	95	15	43	235	55
	A	98	63	24	51	179	55
	N	123	87	19	51	248	—
5120	CD	92	77	20	55	187	65
	CDA	87	70	23	60	179	65
5140	CDA	105	88	18	52	212	60
52100	HRA	100	81	25	57	192	45
	HRN	185	139	13	20	363	—
6150	CDA	111	95	14	44	223	45
	N	136	89	22	61	269	—
	HR	89	65	25	63	192	60
8620	CD	102	85	22	58	212	63
	A	78	56	31	62	149	—
	N	92	52	26	60	183	—
	CD	140	120	11	38	277	—
8640	CDA	107	90	14	45	217	60
	HRA	95	64	25	55	190	56
	CDA	107	96	17	48	223	66
9255	N	135	88	16	48	269	—
	HRA	113	71	22	41	229	45
	N	135	84	20	43	269	—
E9310	HR	115	75	22	58	241	45
	A	119	64	17	42	241	—
	N	132	83	19	58	269	—
9440	HR	123	80	18	47	241	—
	HRA	93	59	26	53	183	—
	N	110	72	25	58	223	—

Lampiran 3. Harga Faktor Koreksi, Konsentrasi Tegangan

(Sumber Pustaka 8)

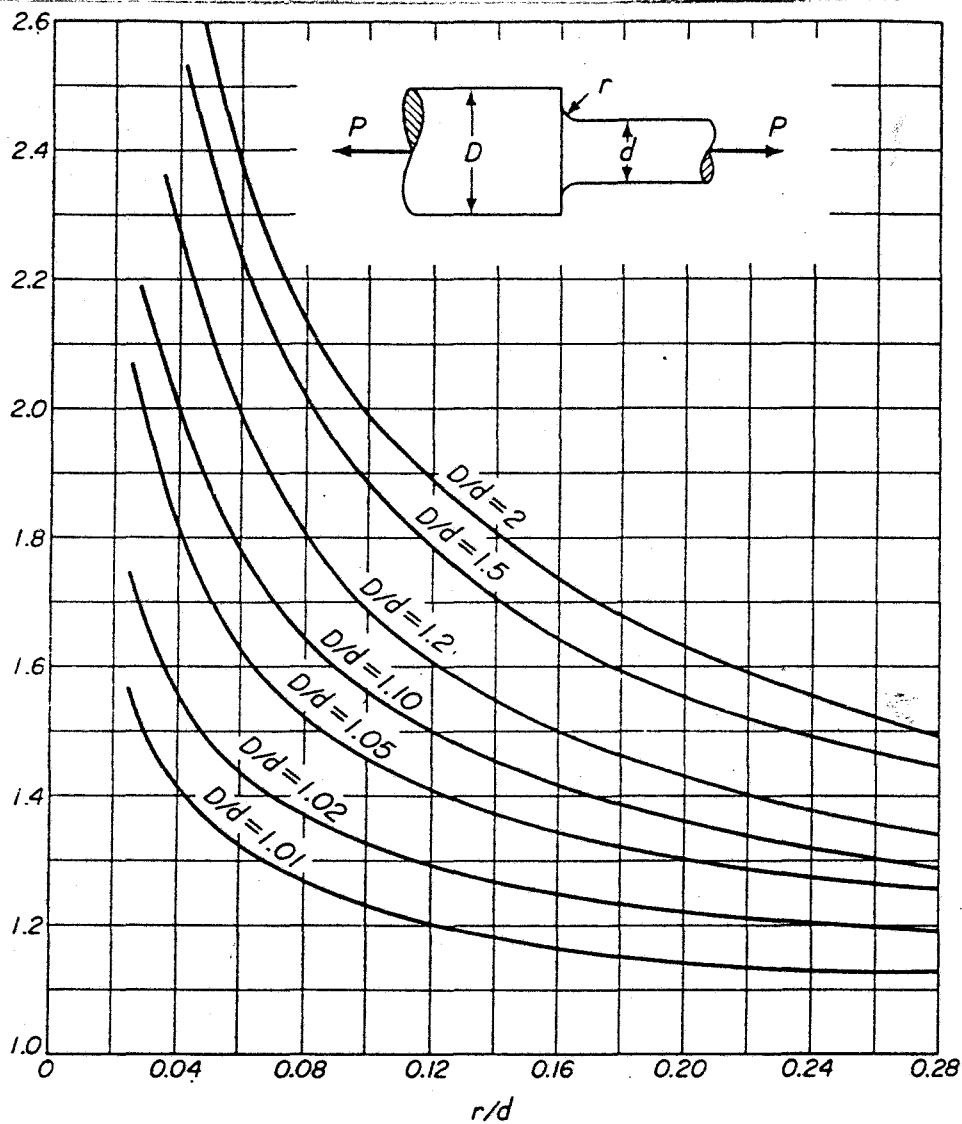
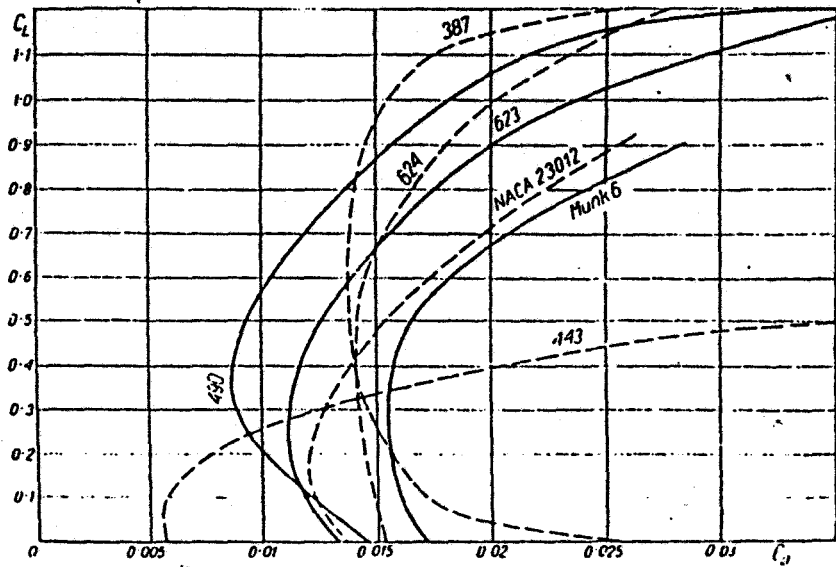


FIGURE 2-15 Factors of stress concentration  $K$  for various sizes of fillets for round bar in tension or compression to be applied to the stress in the section diameter  $d$ .



Polar curves,  $C_L = f(C_D)$  for various aerofoil sections.

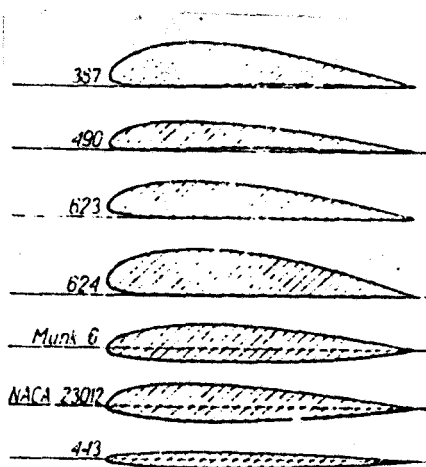
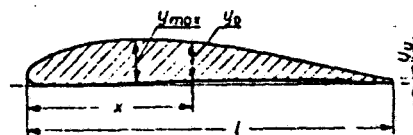
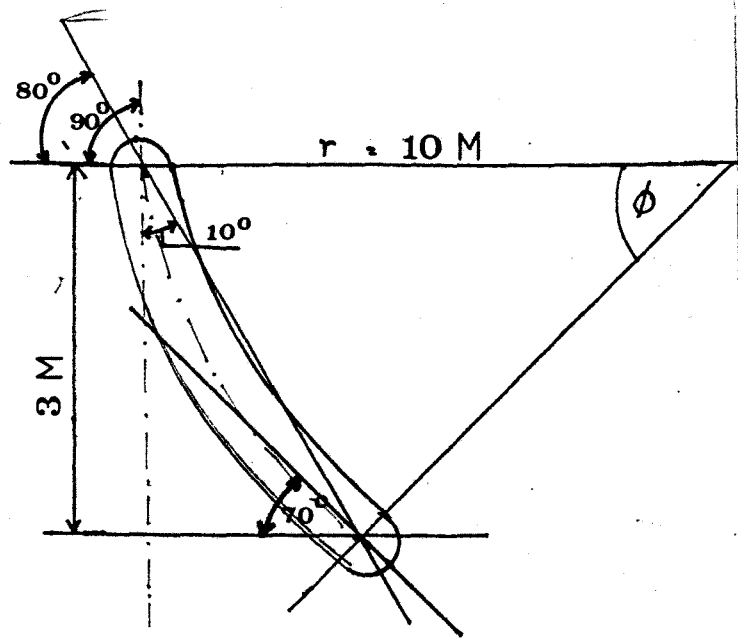


FIG. 19. Aerofoil sections.

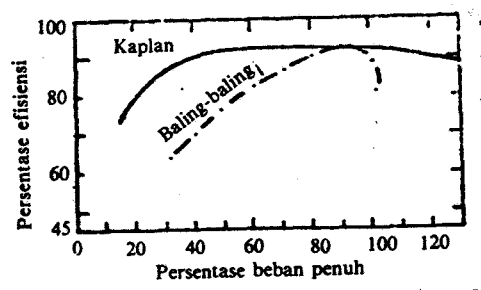


Aerofoil section.

Lampiran 4. Gambar Jenis-jenis Penampang Airfoil  
(Sumber Pustaka 7)

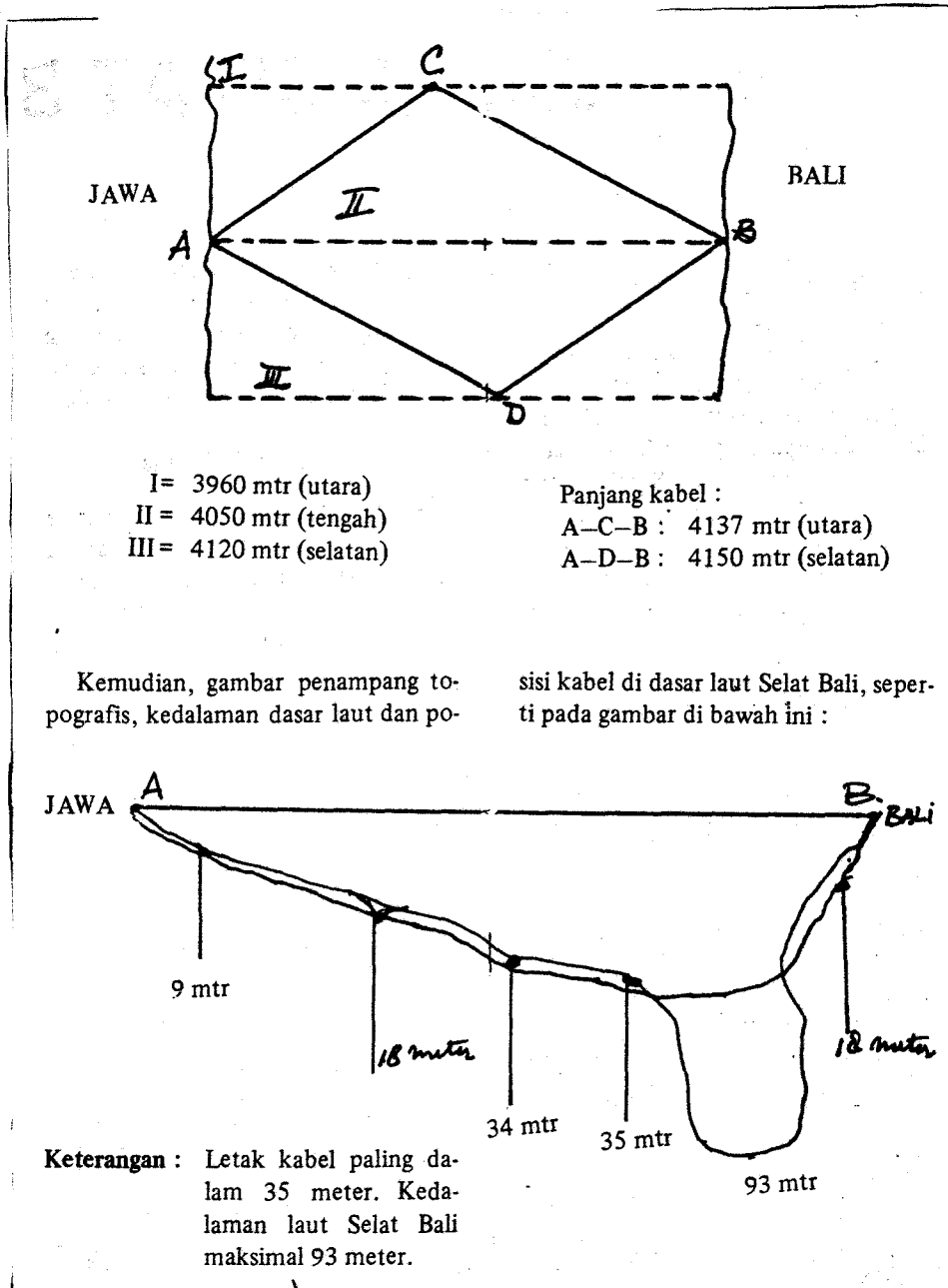


Lampiran 5. Penampang Sudu Antar (Sumber Pustaka 7)



Lampiran 6. Grafik Presentasi Turbin Kaplan dan Turbin Baling-baling ( Sumber Pustaka 3 )

Lampiran 7. Penampang Di Bawah Permukaan Air Laut  
Selat Bali (Sumber Pustaka 16)



# ARUS SELAT BALI YANG MISTERIUS

Proyek Manager Peggelaran kabel-laut, Kentaro Oka dari Furukawa Electric C. (Jepang) mengatakan, bahwa perusahaannya telah memasang kabel-laut (sub-marine cable) lebih dari 500 kali di seluruh dunia.

Melihat kedalaman Selat Bali yang rata-rata 35 meter (maksimal 90 meter) dan lebar selat 4157 meter, pekerjaan penggелaran kabel laut Ketapang-Gilimanuk termasuk pekerjaan yang kecil sekali.

Katanya, kabel paling panjang yang pernah dipasang Furukawa adalah 45 kilometer di Amerika Serikat dengan kedalaman 350 meter.

Namun ia mengakui, pemasangan kabel di dasar laut Selat Bali bulan Mei yang lalu berlangsung cukup menegangkan syaraf. Mereka kadang-kadang panik, Mereka pun mendata-

ngi Kantor Syahbandar di Meneng minta informasi mengenai arus dan ombak di Selat Bali. Mereka mengakui, situasi dan kondisi ombak dan arus sulit diperhitungkan, sulit diramal. Pada hal mereka memiliki peralatan modern di kapal untuk memantau arah dan kecepatan arus, kedalaman laut, suhu, angin dan cuaca di udara.

## Perhitungan nelayan tradisional

Kabel laut yang pertama jalur utara yang direncanakan tanggal 16 Mei dengan persiapan selama 3 hari, ternyata digeser menjadi tanggal 18 Mei. Kabel kedua jalur selatan yang direncanakan terpasang 30 Mei, juga tertunda-tunda sampai tanggal 2 Juni 1986.

Setelah beberapa kali digeser dan ditunda, akhirnya kedua kabel berhasil digelar dalam cuaca arus dan

ombak yang tenang. Kabel pertama pada hari Minggu 18 Mei (pk.02.00-19.000). Kabel kedua pada hari Senin 2 Juni (Pk. 03.00-14.00). Apabila diamati dengan seksama, maka tergelarnya kabel laut pada hari-hari tersebut adalah tepat waktunya, dan sekaligus "kebetulan sekali".

Mengapa demikian? Menurut perhitungan para nelayan tradisional di Selat Bali, setiap bulan terjadi masa arus tenang dua kali, yang disebut "air konda". Saat itu tidak ada arus sama sekali, yaitu seminggu sebelum bulan purnama dan seminggu sesudah bulan purnama. Jadi, air konda pertama jatuh pada tanggal 8, 9 dan 10 bulan tanggal Jawa, dan masa air konda kedua jatuh pada tanggal 31 Mei, 1 dan 2 Juni, atau tanggal 22, 23 dan 24 tanggal-bulan Jawa. Bulan purnama tanggal 15 bulan Jawa bertepatan pada hari Sabtu 24 Mei 1986.

Walaupun demikian, perhitungan itu tergantung pada alam juga. Dalam kenyataan, kadang-kadang "masa air konda" sering bergeser satu hari. Itu pun dapat dilihat pada musim, apakah musim barat (penghujan) atau musim timur (kemarau). Para nelayan lokal tahu presis jam-jam berapa terjadi air pasang atau air surut. Mereka tahu, kapan dan jam berapa terjadi perubahan arus atau disebut arus-balik selama dua jam dalam tiap 6 jam.

Lampiran B. Tulisan ; " Arus Selat Bali "

(Sumber Pustaka 16)

Biasanya pada saat air pasang, arus bergerak ke utara pada saat air surut, arus bergerak ke selatan. Pada saat arus berbalik, yaitu satu jam sebelum berbalik dan satu jam sesudah berbalik, terjadi masa arus tenang.

Nah, pada jam berapa arus bergerak ke utara dan kemudian berbalik ke selatan? Jawab mereka, patokan jam air pasang bersamaan dengan saat bulan timbul di ufuk timur. Ini patokan utama.

Sebagai misal, pada tanggal 15 bulan Jawa (bulan purnama), bulan muncul di permukaan laut tepat jam 18.00. Pada saat itulah terjadi air pasang, dan arus bergerak ke utara selama 6 jam. Pada pk. 24.00 arus berbalik bergerak ke selatan, dan terjadi air surut. Jadi mulai jam 23.00 sampai 01.00 terjadi arus balik, dan arus agak tenang selama dua jam.

Kemudian pk. 15.00 pagi arus mulai berbalik ke utara lagi sampai pk. 12.00 siang, kemudian mulai pk. 11.00 arus ke selatan lagi.

Pada hari berikutnya, tanggal 16 bulan Jawa, bulan timbul pada jam 19.00 bergeser satu jam. Disinilah arus dan ombak agak tenang selama 3 jam, yaitu mulai pk. 17.00 sampai pk. 20.00 kemudian arus bergerak ke utara sampai pk. 01.00, Pagi hari antara pk. 06.00-07.00 kembali arus bergerak ke utara, sampai pk. 13.00 siang. Demikian selanjutnya.

Jadi tiap hari, saat air pasang bergeser satu jam, karena bulan timbul selalu bergeser satu jam.

Berpatokan pada keadaan alam di Selat Bali dimana perhitungan saat dan surut ditentukan pada jam-jam timbulnya bulan, maka terjadilah "masa air konda" seminggu sebelum bulan purnama (tanggal 8, 9 dan 10 tanggal Jawa) dan seminggu sesudah bulan purnama (tanggal 22, 23 dan 24 tanggal Jawa). Kalau dilihat di kalender, masa air konda pertama tanggal 8, 9 dan 10 bulan Jawa bertepatan pada 17, 18 dan 19 Mei 1986. Masa air konda kedua seminggu sesudah bulan purnama jatuh pada tanggal 31 Mei, 1 dan 2 Juni 1986.

Maka, menurut pengamatan kita, saat penggelaran kabel laut pertama

jalur utara terjadi pada hari Minggu 18 Mei, kabel kedua jalur selatan pada hari Senin 2 Juni 1986. Dapat dikatakan, penggelaran kabel laut adalah tepat pada waktunya, karena bertepatan dengan masa air konda. Untuk menggambarkan masa tanpa arus di Selat Bali itu, penggemar pemancing bisa naik jukung dengan tenang tanpa menurunkan jangkar.

Demikian hukum alam yang dianut dan berlaku bagi para nelayan tradisional di kedua sisi Selat Bali.

#### Tetap misterius

Walaupun saat-saat air pasang dan surut dapat diketahui dari posisi bulan (tanggal bulan Jawa), namun arus, angin dan ombak di Selat Bali tetap misterius dan sulit diramal. Hal itu diakui oleh para nelayan dan para pelaut yang setiap hari menyebarkan Selat yang sempit itu.

Ada pun sebabnya, bisa dibaca dari situasi dan kondisi alamnya. Yang jelas Selat Bali terletak antara Laut Jawa yang dipengaruhi angin pasat di daerah katulistiwa dengan Samudra Hindia yang pada bulan-bulan musim kemarau (juni-September) didominasi oleh angin dari Australia yang sedang mengalami musim dingin.

Benturan arus terhadap karang-karang di dasar laut bisa membelokkan arah arus. Juga sering terjadi arah arus di pantai Ketapang tidak sama dengan di tengah atau di pantai Gilimanuk. Juga bisa terjadi berlainan arah arus di permukaan atau pun di dasar laut. Benturan-benturan arus-arus yang berlainan arah bisa menyebabkan arus putar yang kadang-kadang cukup ganas.

Sebuah kapal ferry dengan kecepatan 12 knot kadang-kadang tidak mampu menembus arus dari kanan dan kiri, apalagi arus putar yang ganas, sehingga kapal itu berlayar zig-zag.

Menurut petugas Kependuan Pelabuhan Meneng, arus tidak menentu itu disebabkan karena kondisi alam setempat. Soegianto dari Dinas Kependuan Perumpul mengatakan, setiap nakhoda kapal ferry yang tiap hari mondar-mandir di selat yang sempit

itu, selalu memperhatikan beberapa faktor : arah arus, kekuatan arus (5-15 knot) dan arus putar, dan tentu saja memperhitungkan situasi pasang-surut yang berubah-ubah tiap 6 jam.

Katanya, arus putar itulah sering membuat kepala pusing, karena situa-

si dan kondisi alam yang tidak menentu. Secara garis besar, benturan arus kuat pada tanjung di kanan-kiri, bisa mengubah arah-arus. Juga karang-karang di dasar laut yang tidak rata kedalamannya (antara 20-90 meter), menimbulkan arus putar seperti air mendidih yang terbawa arus ke utara dan ke selatan.

Kalangan nakhoda dan pandu laut mengatakan, setiap pelaut yang berlayar di Selat Bali seyogyanya berjiwa seni, memiliki "feeling" atau perasaan mau mengerti kemauan alam, sehingga tidak sampai panik menghadapi ombak dan arus yang serba misterius tadi. Peralatan komputer di kapal seringkali tidak berkutik menghadapi tantangan alam di Selat Bali. Hal itu dialami para petugas Furukawa Electric dan Tokai Salvage dari Jepang, ketika memasang kabel laut di dasar laut antara Ketapang dan Gilimanuk bulan Mei yang lalu.



# Lampiran 9. Deret Galvanik Bahan Pada Air Laut

(Sumber Pustaka 14)

