

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
NASKAH SOAL TUGAS AKHIR	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xvi
INTISARI	xxiv

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Perancangan	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Metodologi Perancangan	3
1.6. Sistematika Penulisan	3

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Proses Produksi LNG dan LPG	4
2.2. Teori Dasar Kompresor	6
2.2.1. Definisi kompresor	6
2.2.2. Klasifikasi kompresor	7
2.3. Kompresor Sentrifugal	9
2.4. Termodinamika pada Kompresor	10
2.5. Tahapan Perancangan Kompresor	14

BAB III PERHITUNGAN DASAR

3.1. Data Persoalan	20
3.2. Perhitungan Politropis	20
3.2.1 Faktor kompresibilitas inlet	20
3.2.2 Eksponen polytropik	21
3.2.3 Faktor kompresibilitas outlet	22
3.2.4 Head polytropik total	23
3.3. <i>Mass Flow Rate</i>	24
3.4. Debit Inlet	24
3.5. Pemilihan Tipe Kompresor	25
3.6. Jumlah Tingkat (<i>Stage</i>)	25
3.7. Debit Outlet	26
3.8. <i>Flow Coefficient</i>	27
3.9. Perbandingan Kompresi Masing-masing Tingkat	30
3.10. Kondisi Tekanan dan Temperatur Tiap Tingkat	31

BAB IV PERENCANAAN IMPELER

4.1. Pemilihan Tipe Impeler	33
4.2. Diameter Poros dan Diameter Hub	35
4.3. Perencanaan Impeler Tingkat I	36
4.3.1. Perencanaan sisi masuk impeler	36
4.3.2. Perencanaan sisi keluar impeler	44
4.3.3. Perencanaan difuser	52
4.3.4. Perencanaan <i>return channel</i>	57
4.4. Perencanaan Impeler Tingkat II - V	59
4.5. Mendesain Sudu Impeler dan Difuser	61
4.6. Pemilihan Bahan Impeler	66
4.7. Karakteristik Kompresor	67
4.7.1. <i>Surge</i>	67
4.7.2. <i>Choke</i>	68

BAB V PERENCANAAN RUMAH KOMPRESOR

5.1. Perencanaan Saluran Masuk Kompresor	71
5.2. Perhitungan Kekuatan <i>Casing</i>	74
5.3. Perencanaan Saluran Keluar Kompresor	75

BAB VI PERENCANAAN POROS

6.1. Gaya Aksial	78
6.2. Perencanaan <i>Balance Piston</i>	80
6.3. Gaya Radial	84
6.4. Pemeriksaan Kekuatan Poros	87
6.4.1. Pemeriksaan momen lengkung	87
6.4.2. Pemeriksaan tegangan geser	90
6.4.3. Pemeriksaan defleksi puntiran	91
6.4.4. Pemeriksaan defleksi lengkungan	92
6.5. Pemeriksaan Putaran Kritis	97
6.6. Pemeriksaan Konsentrasi Tegangan	98
6.6.1. Pengaruh konsentrasi tegangan pada poros tempat impeler	99
6.6.2. Pengaruh konsentrasi tegangan pada poros tempat bantalan	101
6.6.3. Pengaruh konsentrasi tegangan pada poros tempat kopling	102

BAB VII PERENCANAAN BANTALAN

7.1. Klasifikasi Bantalan	104
7.2. Pemilihan Bantalan	105
7.3. <i>Journal Bearing</i>	106
7.4. <i>Thrust Bearing</i>	112

BAB VIII PERENCANAAN KOMPONEN PENDUKUNG

8.1. Kopling	114
8.1.1. Pemeriksaan kekuatan flens kopling	116
8.1.2. Pemeriksaan kekuatan baut flens	117

8.2. Pasak	118
8.2.1. Pasak pada impeler dan <i>balance piston</i>	119
8.2.2. Pasak pada kopling	121
8.3. <i>Seal</i>	122
8.3.1. <i>Interstage seal</i> dan <i>balance piston seal</i>	122
8.3.2. <i>Seal</i> poros	124
8.4. Penggerak Kompresor	125
8.5. Pelapis Poros (<i>Shaft Sleeve</i>)	126
8.6. Mur Pengunci Impeler	126
 BAB IX PENUTUP	 130
 DAFTAR PUSTAKA	 135
LAMPIRAN	136

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Proses pembuatan LNG dan LPG	4
Gambar 2.2. Klasifikasi kompresor	7
Gambar 2.3. Pembagian impeler berdasarkan konstruksi	15
Gambar 2.4. Diafragma kompresor sentrifugal multi-tingkat	16
Gambar 2.5. Rumah kompresor tipe belahan horizontal	17
Gambar 2.6. Rumah kompresor tipe barrel	18
Gambar 3.1. Grafik pemilihan tipe kompresor	25
Gambar 3.2. Grafik efisiensi polytropik vs koefisien aliran	29
Gambar 4.1. Impeler tertutup	33
Gambar 4.2. Grafik pemilihan jenis aliran kompresor	34
Gambar 4.3. Grafik Kcm vs kecepatan spesifik	38
Gambar 4.4. Profil impeler	41
Gambar 4.5. Pola segitiga kecepatan pada sisi masuk impeler	42
Gambar 4.6. Segitiga kecepatan pada sisi masuk impeler	43
Gambar 4.7. Segitiga kecepatan outlet dengan dan tanpa slip	46
Gambar 4.8. Segitiga kecepatan pada sisi keluar impeler	48
Gambar 4.9. Sudu pada sisi keluar	51
Gambar 4.10. Profil konstruksi sudu dengan metode busur tunggal	62
Gambar 4.11. Profil konstruksi sudu difuser	63
Gambar 4.12. Hasil perancangan impeler	64
Gambar 4.13. Hasil perancangan difuser	65
Gambar 4.14. Aliran melalui difuser	68
Gambar 4.15. <i>Choking</i> pada impeler	68
Gambar 5.1. Saluran masuk lurus dan miring	71
Gambar 5.2. Saluran masuk lengkung	72

Gambar 5.3. Saluran masuk volut	72
Gambar 5.4. Saluran masuk mulut lonceng	73
Gambar 5.5. Saluran masuk konsentris	73
Gambar 5.6. Susunan rumah kompresor tipe barrel	75
Gambar 6.1. Penampang impeler dimana gaya aksial terjadi	78
Gambar 6.2. Piston penyeimbang	81
Gambar 6.3. Profil piston penyeimbang hasil perancangan	83
Gambar 6.4. Poros yang direncanakan	85
Gambar 6.5. Diagram gaya-gaya yang bekerja pada poros	87
Gambar 6.6. Diagram momen lengkung pada poros	90
Gambar 6.7. Titik-titik pada poros yang akan dihitung defleksinya	94
Gambar 6.8. Grafik faktor konsentrasi tegangan untuk poros bertingkat	99
Gambar 6.9. Grafik konsentrasi tegangan untuk alur pasak	100
Gambar 7.1. Profil bantalan luncur	107
Gambar 7.2. Jarak h terhadap jarak e	109
Gambar 7.3. Kurva j terhadap S	111
Gambar 7.4. Profil bantalan aksial	112
Gambar 7.5. Bantalan aksial kerah	113
Gambar 8.1. Kopling flens fleksibel	115
Gambar 8.2. Mur dan baut kopling flens luwes	115
Gambar 8.3. Penampang pasak dan alur pasak	119
Gambar 8.4. Seal labirin antartingkat	122
Gambar 8.5. Tiga tipe seal labirin	123
Gambar 8.6. Seal kontak mekanis	124

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Data campuran gas	21
Tabel 3.2. Data tipikal kompresor sentrifugal	22
Tabel 3.3. Persiapan seleksi pada kompresor sentrifugal multi-tingkat	28
Tabel 4.1. Hasil perhitungan impeler tingkat I-V	60
Tabel 6.1. Hasil perhitungan gaya aksial akibat perbedaan tekanan	80
Tabel 6.2. Dimensi dan berat poros	86
Tabel 6.3. Hasil perhitungan defleksi puntiran	92
Tabel 6.4. Perhitungan defleksi poros dengan metode integral numerik	95
Tabel 6.5. Perhitungan putaran kritis	98
Tabel 8.1. Dimensi dari flens yang dirancang menurut JIS B 1452	115
Tabel 8.2. Dimensi dari baut kopling flens luwes JIS B 1452	116

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel <i>Properties</i> Berbagai Gas	137
Lampiran 2. Tabel <i>Specific Heat</i> Berbagai Gas	138
Lampiran 3. Grafik Kompresibilitas	139
Lampiran 4. Tabel Standar Baja	140
Lampiran 5. Tabel Baja Paduan Untuk Poros	141
Lampiran 6. Tabel Pemilihan <i>Journal Bearing</i> (Kingsbury Tipe LEG)	142
Lampiran 7. Tabel Pemilihan <i>Thrust Bearing</i> (Kingsbury Tipe LEG-S)	143
Lampiran 8. Grafik Kapasitas Pelumas Untuk <i>Thrust Bearing</i>	144
Lampiran 9. Tabel Pemilihan Pelumas	145
Lampiran 10. Tabel Pemilihan Kopling	146
Lampiran 11. Tabel Pemilihan Baut Kopling	147
Lampiran 12. Tabel Pemilihan Pasak	148
Lampiran 13. Tabel Ukuran Baut	149
Lampiran 14. Tabel Ukuran Ulir	150

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A_f	= Luas penampang flens isap (ft ²)
A_{rc}	= Luas laluan sisi keluar <i>return channel</i> (in ²)
A_1	= Luas laluan sisi masuk impeler (in ²)
A_2	= Luas laluan sisi keluar impeler (in ²)
A_3	= Luas laluan sisi masuk difuser (in ²)
A_4	= Luas laluan sisi keluar difuser (in ²)
b	= Lebar pasak (mm) = Tebal <i>balance piston</i> (mm)
b_{rc}	= Lebar sisi keluar <i>return channel</i> (in)
b_1	= Lebar sisi masuk impeler (in)
b_2	= Lebar sisi keluar impeler (in)
b_3	= Lebar sisi masuk difuser (in)
b_4	= Lebar sisi keluar difuser (in)
B	= Diameter dimana baut kopling dipasang (mm)
c	= <i>Radial clearance</i> (mm)
c_{m1}	= Kecepatan absolut radial sisi masuk impeler (ft/s)
c_{m2}	= Kecepatan absolut radial sisi keluar impeler (ft/s)
c_p	= Panas spesifik pada tekanan konstan (Btu/lb.R)
c_{rc}	= Kecepatan gas keluar dari <i>return channel</i> (ft/s)
c_s	= Kecepatan slip (ft/s)
c_{u1}	= Kecepatan absolut tangensial (ft/s)
c_{u2}	= Kecepatan absolut tangensial sisi keluar impeler (ft/s)
c'_{u2}	= Kecepatan tangensial riil (ft/s)
c_0	= Kecepatan pada mata impeler (ft/s)
c_1	= Kecepatan absolut sisi masuk impeler (ft/s)
c_2	= Kecepatan absolut sisi keluar impeler (ft/s)
c'_2	= Kecepatan absolut riil sisi keluar impeler (ft/s)

c_3	= Kecepatan sisi masuk difuser (ft/s)
C	= Kecepatan suara (m/s)
	= Diameter naf kopling (mm)
C_b	= Faktor koreksi adanya momen lengkung
C_0	= Panas jenis minyak pelumas (kkal/kg °C)
d_b	= Diameter baut kopling (mm)
d_{bp}	= Diameter <i>balance piston</i> (in)
d_{hub}	= Diameter hub (in)
d_{rc}	= Diameter sisi keluar <i>return channel</i> (in)
d_{sh}	= Diameter poros (in)
d_s	= Diameter poros (in)
d_{ss}	= Diameter <i>shaft sleeve</i> (in)
d_0	= Diameter mata impeler (in)
d_1	= Diameter sisi masuk impeler (in)
d_2	= Diameter luar impeler (in)
d_3	= Diameter dalam difuser (in)
d_4	= Diameter luar difuser (in)
D	= Diameter poros (in)
	= Diameter luar ulir (mm)
D_s	= Diameter spesifik
D_1	= Diameter dalam ulir (mm)
D_2	= Diameter efektif ulir (mm)
E	= Modulus elastisitas (GPa)
f_c	= Faktor koreksi daya
F	= Gaya tangensial (kg)
	= Tebal flens kopling (mm)
F_a	= Resultan gaya aksial (lb)
F_1	= Gaya akibat perubahan momentum gas yang memasuki impeler (lb)
F_2	= Gaya akibat perbedaan tekanan depan & belakang impeler (lb)
g	= Percepatan gravitasi (ft/s ²)
G	= Modulus geser bahan poros (kg/mm ²)

h	= Tebal lapisan minyak pelumas (mm) = Tinggi pasak (mm)
h_3	= Tinggi laluan sisi masuk difuser (in)
h_4	= Tinggi laluan sisi keluar difuser (in)
H	= Head / tinggi tekan gas (ft) = Kerja gesekan (kg.m/s)
$H_{add,dif}$	= Head adiabatis pada sudu difuser (ft.lbf/lbm)
$H_{act,dif}$	= Head aktual pada sudu difuser (ft.lbf/lbm)
H_{eff}	= Head efektif impeler (ft.lbf/lbm)
H_p	= Head polytropik total (ft.lbf/lbm)
H_{ps}	= Head polytropik tiap tingkat (ft.lbf/lbm)
$H_{p,rc}$	= Head yang dihasilkan selama melewati <i>return channel</i> (ft.lbf/lbm)
H_v	= Head akibat kecepatan (ft.lbf/lbm)
H_{vir}	= Head virtual impeler (ft.lbf/lbm)
H_1	= Tinggi kaitan ulir (mm)
I	= Momen inersia (in ⁴)
j	= Perbandingan kerugian daya
J	= Momen inersia polar (mm ⁴) = <i>Mechanical equivalent of heat</i> (kg.m/kcal)
k	= <i>Specific heat ratio</i>
K_b	= Faktor koreksi adanya tumbukan untuk baut flens kopling
K_{cm1}	= Koefisien kecepatan sisi masuk impeler
K_{cm2}	= Koefisien kecepatan sisi keluar impeler
K_F	= Faktor koreksi adanya tumbukan untuk flens kopling
K_m	= Faktor koreksi adanya momen lengkung
K_t	= faktor koreksi adanya momen puntir
l	= Panjang bantalan (mm) = Panjang pasak (mm)
l_m	= panjang mur (mm)
L	= Panjang poros (m)
mc_p	= Molal c_p (Btu/lbmol.R)

m_w	= Berat molekul (lbm/lbmol)
$\dot{m}_{in}$	= <i>Mass flow rate</i> (lb/min)
M	= Momen lengkung maksimal (kg.mm) = Bilangan Mach
n	= Eksponen polytropik
n_{cr}	= Putaran kritis (rpm)
n_e	= Jumlah baut kopling efektif
n_{sq}	= Kecepatan spesifik kinetik
N	= Putaran poros (rpm)
N_s	= Kecepatan spesifik
N_{st}	= Jumlah tingkat
p	= Tekanan pada bantalan (kg/mm ²) = Jarak bagi ulir (mm)
p_a	= Tekanan yang diijinkan pada bantalan (kg/mm ²)
P	= Daya kompresor (kW)
P_{cr}	= Tekanan kritis gas (psia)
P_H	= Daya yang diserap bantalan (kW)
P_{in}	= Tekanan inlet (psia)
P_{out}	= Tekanan outlet (psia)
P_R	= <i>Pressure reduce</i>
P_{rc}	= Tekanan pada sisi keluar <i>return channel</i> (psia)
P_0	= Tekanan gas saat masuk mata impeler (psia)
P_2	= Tekanan gas keluar impeler (psia)
P_4	= Tekanan gas keluar difuser (psia)
q	= Kapasitas minyak pelumas (liter/menit)
q_a	= Tekanan permukaan yang diijinkan pada ulir (kg/mm ²)
Q	= Debit (cfm)
Q_{in}	= Debit inlet (cfm)
Q_{ls}	= Debit outlet (cfm)
Q_0	= Debit gas ketika masuk mata impeler (cfm)
Q_2	= Debit gas ketika keluar impeler (cfm)

Q_4	= Debit gas ketika keluar difuser (cfm)
r	= Jari-jari <i>fillet</i> poros bertingkat (mm)
	= Jari-jari <i>fillet</i> alur pasak (mm)
r_p	= Perbandingan kompresi total
$r_{p,i}$	= Perbandingan kompresi tiap tingkat
$r_{p,s}$	= Rasio tekanan gas selama melewati sisi isap sampai mata impeler
$r_{p,2}$	= Rasio tekanan gas selama melewati impeler
$r_{p,3}$	= Rasio tekanan gas selama keluar impeler
$r_{p,4}$	= Rasio tekanan gas selama melewati difuser
$r_{p,5}$	= Rasio tekanan gas selama keluar difuser
$r_{p,6}$	= Rasio tekanan gas selama melalui <i>return channel</i>
$r_{p,7}$	= Rasio tekanan gas selama keluar <i>return channel</i>
r_3	= Jari-jari dalam difuser (in)
r_4	= Jari-jari luar difuser (in)
R	= Konstanta gas spesifik (ft.lbf/lbm.R)
R_0	= Konstanta gas universal (ft.lbf/lbmol.R)
R_I	= Reaksi pada bantalan kiri (lb)
R_{II}	= Reaksi pada bantalan kanan (lb)
s_{min}	= Tebal <i>shroud</i> (selubung) impeler minimal (mm)
s_{u1}	= Tebal sudu pada arah tangensial sisi masuk impeler (in)
s_{u2}	= Tebal sudu pada arah tangensial sisi keluar impeler (in)
s_1	= Tebal sudu sisi masuk impeler (in)
s_2	= Tebal sudu sisi keluar impeler (in)
s_3	= Tebal sudu sisi masuk difuser (in)
s_4	= Tebal sudu sisi keluar difuser (in)
S	= Tebal minimum dinding <i>casing</i> (mm)
	= Variabel Sommerfeld
S_f	= Faktor keamanan bahan
S_{f_b}	= Faktor keamanan bahan untuk baut flens kopling
S_{f_F}	= Faktor keamanan bahan untuk flens kopling
S_{f_l}	= Faktor koreksi terhadap bahan

Sf_2	= Faktor koreksi terhadap konsentrasi tegangan
t_1	= Jarak antar sudu pada sisi masuk impeler (in)
t_2	= Jarak antar sudu pada sisi keluar impeler (in)
T	= Momen puntir (kg.mm)
T_{cr}	= Temperature kritis gas (R)
T_{in}	= Temperatur inlet (R)
T_{out}	= Temperatur outlet (R)
T_R	= <i>Temperature reduce</i>
T_{rc}	= Temperature sisi keluar <i>return channel</i> (R)
T_0	= Temperatur gas saat masuk mata impeler (R)
T_2	= Temperatur gas saat keluar impeler (R)
T_4	= Temperatur gas saat keluar difuser (R)
u_1	= Kecepatan keliling sisi masuk impeler (ft/s)
u_2	= Kecepatan keliling sisi keluar impeler (ft/s)
v	= Kecepatan keliling poros (m/s)
V_{bp}	= Volume <i>balance piston</i> (in ³)
V_{imp}	= Volume impeler (in ³)
v_s	= Kecepatan pada sisi isap (ft/s)
V_{sh}	= Volume poros (in ³)
v_0	= Kecepatan pada mata impeler (ft/s)
w_1	= Kecepatan relatif sisi masuk impeler (ft/s)
w_2	= Kecepatan relatif sisi keluar impeler (ft/s)
W	= Beban yang ditumpu (kg)
W_{bp}	= Berat <i>balance piston</i> (lb)
W_{imp}	= Berat impeler (lb)
W_p	= Daya kompresor (kW)
W_{sh}	= Berat poros (lb)
W_t	= Daya steam turbine (kW)
W_{tot}	= Berat total rotor (lb)
x	= Faktor keamanan <i>casing</i>

y	= Koefisien yang tergantung dari profil laluan <i>casing</i> = Defleksi (in)
z	= Jumlah sudu impeler = Jumlah ulir
z'	= Jumlah sudu difuser
Z	= Faktor ketelitian dalam proses pengecoran (mm) = Viskositas pelumas (cP)
Z_{avg}	= Faktor kompresibilitas rata-rata
Z_{in}	= Faktor kompresibilitas inlet
Z_{out}	= Faktor kompresibilitas outlet
α	= Faktor konsentrasi tegangan untuk alur pasak
α'_2	= Sudut aktual sisi keluar impeler
α_3	= Sudut sisi masuk difuser
β	= Faktor konsentrasi tegangan untuk poros bertingkat
β_1	= Sudut masuk impeler
β_2	= Sudut keluar impeler
ε	= Eksentrisitas
ε_1	= Faktor ketebalan sudu sisi masuk
ε_2	= Faktor ketebalan sudu sisi keluar
ρ	= Jari-jari kelengkungan sudu impeler (in)
φ_{in}	= <i>Inlet flow coefficient</i>
φ_{out}	= <i>Outlet flow coefficient</i>
η_{poly}	= Efisiensi polytropik
τ	= Tegangan geser yang terjadi (kg/mm ²)
τ_a	= Tegangan geser yang diijinkan (kg/mm ²)
τ_b	= Tegangan geser yang terjadi pada baut kopling (kg/mm ²) = Tegangan geser yang terjadi pada ulir poros (kg/mm ²)
τ_{ba}	= Tegangan geser yang diijinkan pada baut kopling (kg/mm ²)
τ_F	= Tegangan geser yang terjadi pada flens kopling (kg/mm ²)
τ_{Fa}	= Tegangan geser yang diijinkan pada flens kopling (kg/mm ²)
τ_m	= Tegangan geser yang terjadi pada ulir mur (kg/mm ²)

τ_{maks}	= Tegangan geser maksimal pada poros (kg/mm ²)
σ_a	= Kekuatan tarik yang diijinkan (kg/mm ²)
σ_B	= Kekuatan tarik bahan (kg/mm ²)
σ_t	= Tegangan tarik bahan (kg/mm ²)
μ	= <i>Head coefficient</i>
	= Faktor slip
	= Koefisien gesekan bantalan
γ_{bp}	= Berat jenis <i>balance piston</i> (lb/in ³)
γ_{imp}	= Berat jenis impeler (lb/in ³)
γ_{sh}	= Berat jenis poros (lb/in ³)
γ_0	= Berat spesifik gas di dalam mata impeler (lb/ft ³)
	= Berat jenis minyak pelumas (kg/m ³)
γ_2	= Berat spesifik gas keluar impeler (lb/ft ³)
γ_4	= Berat spesifik gas keluar difuser (lb/ft ³)
θ	= Defleksi puntiran (rad)
ΔT	= Kenaikan temperatur minyak pelumas (°C)