

Halaman Judul .....	i
Halaman Pengesahan .....	ii
Halaman Motto .....	iii
Kata Pengantar .....	iv
Halaman Soal .....	vi
Intisari .....	vii
Daftar Isi .....	viii
Daftar Gambar .....	xv
Daftar Tabel .....	xvii
Daftar Notasi .....	xix

## BAB I PENDAHULUAN

1. Oksigen .....	1
1. Sifat Fisis .....	2
2. Sifat Kimia .....	3
2. Spesifikasi Oksigen .....	3
3. Pemanfaatan Oksigen .....	7
1. Produksi Baja .....	7
2. Nonferrous Metallurgy .....	8
3. Oxidizing Agent .....	9
4. Industri Lain .....	10
5. Bidang Kedokteran .....	10
4. Proses Pembuatan Oksigen .....	11
5. Kriogenik .....	14
1. Metoda untuk Mendapatkan Efek Temperatur Rendah .....	15
1. Perubahan Fase .....	15
2. Efek Joule - Thomson .....	16



3. Mesin Ekspansi .....	17
4. Efek Magnetik .....	18
6. Material Konstruksi Bidang Kriogenik .....	19
1. Modulus Elastisitas .....	19
2. Tegangan Luluh dan Tarik .....	19
3. Toughness .....	20
4. Kelelahan .....	20
5. Creep .....	21

## BAB II PERENCANAAN SISTEM PENDINGIN

1. Sistem Pencair Udara .....	22
1. Pencair Gas Linde .....	22
2. Pencair Gas Claude .....	26
3. Pencair Gas Heylandt .....	28
2. Rencana Pencair Udara .....	29
1. Aspek Teoritis Efek Joule - Thomson .....	30
2. Koefisien Joule - Thomson .....	31
3. Penentuan Kuantitas Udara Proses .....	34
4. Deskripsi Rancangan Kerja Proses .....	34
1. Kompresi .....	34
2. Pemurnian Udara ( Scrubbing ) .....	39
1. Pemurnian dengan Larutan Soda .....	40
2. Pemurnian dengan Molecular Sieve ( MS ) .....	40
1. Tahap Depressurising .....	41
2. Tahap Heating .....	41
3. Tahap Cooling .....	41
4. Tahap Pressurising .....	42
3. Pemurnian dengan Reversing Heat Exchanger .....	42
4. Pemurnian dengan Regenerator .....	42



5. Perencanaan Sistem Pendingin .....	43
1. Sistem Pendingin .....	44
2. Deskripsi Kerja Sistem Pendingin .....	46
6. Penyekat Panas .....	49
1. Vacuum Insulation .....	49
2. Powder Insulation .....	50
3. Multilayer Insulation .....	50
4. Foam Insulation .....	50
5. Special Insulation .....	51

### BAB III DISTILASI

1. Pendahuluan .....	52
2. Kolom Distilasi .....	53
3. ....	
1. Kolom Bawah .....	57
1. Udara Umpan .....	57
2. Tekanan Kolom Distilasi .....	60
3. Ekspansi Isenthalpic .....	60
4. Proses Pemisahan .....	64
5. Analisa Kesetimbangan Kalor dan Massa .....	77
2. Kolom Atas .....	79
1. Udara Masukan .....	79
2. Ekspansi Isenthalpic .....	79
3. Proses Pemisahan .....	82
4. Analisa Kesetimbangan Kalor dan Massa .....	92
4. Analisa Refrigeran .....	94
5. Estimasi Dimensi Kolom Distilasi .....	96
1. Diameter Kolom Distilasi .....	96
6. Penukar Panas Utama .....	100



7. Penukar Panas Koil .....	102
-----------------------------	-----

## BAB IV EVAPORATOR

1. Beban Kalor Evaporator .....	104
2. Perpindahan Panas pada Evaporator .....	105
1. Perpindahan Panas Sisi Refrigeran .....	105
2. Perpindahan Panas Sisi Udara .....	107
3. Koefisien Perpindahan Panas Total .....	109
3. ....	
1. Penurunan Tekanan dalam Pipa .....	111
2. Penurunan Tekanan di luar Pipa .....	111
4. Tinjauan Kekuatan Pipa dan Shell .....	112
5. Bocoran Kalor .....	113
1. Kalor Radiasi .....	114
2. Kalor Konduksi .....	118

## BAB V KONDENSOR DAN INTERCOOLER

1. Macam Kondensor .....	121
2. Koefisien Perpindahan Panas Kondensor .....	123
1. Koefisien Perpindahan Panas Sisi Air .....	123
2. Koefisien Perpindahan Panas Sisi Refrigeran .....	125
1. Perpindahan Panas Kondisi Uap Lanjut .....	125
2. Perpindahan Panas Kondensasi .....	126
3. Perpindahan Panas Subcooling .....	127
4. Koefisien Perpindahan Panas Total .....	127
3. Tinjauan Kekuatan Pipa dan Shell .....	129
4. Pompa Sirkulasi .....	130
5. Menara Pendingin ( Cooling Tower ) .....	131
6. Intercooler .....	131



1. Pipa Koil .....	133
1. Koefisien Perpindahan Panas Sisi Refrigeran .....	133
2. Koefisien Perpindahan Panas Luar Pipa .....	134
3. Koefisien Perpindahan Panas Total .....	135

## BAB VI KOMPRESOR

1. Klasifikasi Kompresor .....	137
2. Pemilihan Kompresor .....	140
3. Siklus pada Diagram P - V .....	142
4. Perencanaan Kompresor.....	144
1. Clearance .....	144
2. Efisiensi Volumetris .....	145
3. Efisiensi Volumetris Keseluruhan .....	145
4. Daya Poros dan Daya Motor Penggerak .....	146
5. Silinder .....	147
1. Diameter dan Panjang Langkah Torak.....	147
2. Panjang Silinder .....	148
3. Tebal Dinding Silinder .....	149
4. Kekuatan Silinder .....	149
1. Tegangan Akibat Perbedaan Temperatur .....	149
2. Tegangan Akibat Tekanan Uap dalam Silinder .....	151
3. Tegangan Akibat Pemasangan Liner .....	151
6. Tebal Kepala Silinder .....	153
1. Tegangan pada Kepala Silinder .....	154
7. Baut Pengikat Kepala Silinder .....	154
8. Pendinginan Silinder .....	155
9. Torak .....	155
1. Kekuatan Torak .....	157
1. Tegangan Spesifik .....	157



2. Tegangan Akibat Perbedaan Temperatur .....	157
2. Pertambahan Diameter Akibat Pemuaiian .....	158
10. Cincin Torak .....	158
1. Kekuatan Cincin Torak .....	159
11. Katup .....	160
1. Perencanaan Katup Isap .....	160
2. Perencanaan KatupBuang .....	161
3. Rugi - Rugi pada Katup .....	163
12. Batang Torak .....	164
13. Poros Engkol .....	166
5. Pemilihan Motor dan Alat Pengawalan .....	168
6. Puli dan Sabuk Transmisi .....	169

## BAB VII KATUP PENGONTROL ALIRAN REFRIGERAN

1. Jenis Pengontrol .....	170
1. Cappillary Tube ( Pipa Kapiler ) .....	170
2. Automatic Expansion Valve ( AEV ) .....	170
3. Thermostatic Expansion Valve ( TEV ) .....	171
4. Low - Side Float .....	172
5. High - Side Float .....	173
2. Sistem Kontrol .....	173
1. Prinsip Dasar dalam Sistem Kontrol .....	173
2. Sistem Pengendalian .....	174
3. Macam - Macam Alat Kontrol .....	173
1. Kontrol Temperatur .....	174
2. Kontrol Aliran Fluida .....	175
3. Kontrol Pengaman .....	176

## BAB VIII PERALATAN TAMBAHAN



1. Pemisah Oli .....	179
2. Saringan Pengering ( Drier ) .....	179
3. Akumulator .....	180
4. Tabung Receiver .....	181
1. Kebutuhan Refrigeran .....	181
2. Ukuran Tangki Penampung .....	182
5. Pengontrolan Korosi .....	182
6. Endapan .....	183
7. Pengolahan Limbah Refrigeran .....	184
1. Pemisahan Ammonia .....	185
2. Closed - Loop Ammonia Stripping .....	188

## BAB IX UNJUK KERJA MESIN REFRIGERASI

1. Pengaruh Perubahan Temperatur Lingkungan .....	189
2. Watak Mesin terhadap Perubahan Temperatur Evaporator dan Kondensor .....	191
1. Evaporator .....	191
2. Kondensor .....	192
3. Kompresor .....	193
3. Penyelesaian Persamaan secara Simultan .....	194

X PENUTUP .....	196
-----------------	-----

Daftar Pustaka .....	200
----------------------	-----

Daftar Lampiran .....	202
-----------------------	-----

Gambar 1 - 1	Proses Kerja Vacuum Pressure Swing Adsorption .....	13
Gambar 1 - 2	Proses Produksi Oksigen dengan Vacuum Pressure Swing Adsorption ( VPSA ) .....	13
Gambar 1 - 3	Skema Proses Refrigerasi Metode Perubahan Fase .....	15
Gambar 1 - 4	Prinsip Proses Joule - Thomson .....	16
Gambar 1 - 5	Mesin Ekspansi .....	17
Gambar 1 - 6	Prinsip Pendinginan dengan Efek Magnetik .....	18
Gambar 1 - 7	Diagram Tegangan Tarik dan Tegangan Luluh Alumunium dan paduannya .....	20
Gambar 1 - 8	Perpanjangan Tarik dan Energi Impact Beberapa Logam .....	21
Gambar 2 - 1	Pencair Gas Linde .....	22
Gambar 2 - 2	Diagram Temperature - Entropi Linde .....	23
Gambar 2 - 3	Pencair Gas Linde Tekanan Tinggi .....	25
Gambar 2 - 4	Diagram Temperature - Entropi Linde Tekanan Tinggi .....	25
Gambar 2 - 5	Pencair Gas Claude .....	27
Gambar 2 - 6	Diagram Temperature - Entropi Claude .....	28
Gambar 2 - 7	Rencana Siklus Pencair Udara .....	29
Gambar 2 - 8	Kurva Inversi pada Diagram Tekanan - Temperature .....	32
Gambar 2 - 9	Koefisien Joule - Thomson untuk Udara sebagai Fungsi dari Temperatur .....	33
Gambar 2 - 10	Temperatur Buang Refrigeran sebagai Akibat Kompresi Isentropik..	45
Gambar 2 - 11	Intercooler tipe Shell & Coil dan tipe Flash .....	46
Gambar 2 - 12	Skema Kerja Sistem Pendingin .....	47
Gambar 2 - 13	Diagram Siklus Kerja Sistem Pendingin .....	48
Gambar 3 - 1	Kolom Distilasi .....	53
Gambar 3 - 2	Kolom Distilasi Ganda .....	54
Gambar 3 - 3	Kecepatan Flooding untuk Sieve Plate .....	97



Gambar 4 - 1	Grafik Konstanta Sieder - Tate .....	108
Gambar 4 - 2	Ujung Kiri Evaporator .....	114
Gambar 4 - 3	Ujung Kanan Evaporator .....	116
Gambar 4 - 4	Bagian Tengah Evaporator .....	117
Gambar 5 - 1	Beda Temperatur Rata - Rata Logaritmik .....	128
Gambar 6 - 1	Daerah Operasi Kompresor .....	137
Gambar 6 - 2	Proses Kompresi .....	142
Gambar 6 - 3	Nilai $k_1$ dan $k_2$ .....	150
Gambar 6 - 4	Nilai Koefisien A dan B.....	153
Gambar 6 - 5	Macam Profil Batang Torak .....	164
Gambar 6 - 6	Alat Pengawasan .....	169
Gambar 7 - 1	Katup Ekspansi Otomatis .....	171
Gambar 7 - 2	Katup Ekspansi Thermostatic tipe Diaphragma .....	172
Gambar 7 - 3	Konstruksi Thermostat .....	175
Gambar 7 - 4	Kontrol Pengaman Oli .....	177
Gambar 7 - 5	Dual Pressure Switch .....	178
Gambar 8 - 1	Pemisah Oli .....	179
Gambar 8 - 2	Saringan Pengering .....	180
Gambar 8 - 3	Akumulator.....	180
Gambar 8 - 4	Distribusi Ammonia dan Ion Ammonia pada Air Relatif terhadap pH dan Temperatur .....	186
Gambar 8 - 5	Instalasi Proses Pemisah Ammonia - Nitrogen di Danau Tahoe .....	187
Gambar 8 - 6	Proses Closed - Loop untuk Pemisahan Ammonia .....	188
Gambar 9 - 1	Siklus Kerja Sistem Pendingin .....	189
Gambar 9 - 2	Skema Aliran pada Evaporator .....	191
Gambar 9 - 3	Skema Aliran pada Kondensor.....	193

Tabel 1 - 1	Komposisi Gas Penyusun Udara .....	2
Tabel 1 - 2	Spesifikasi Komoditi Oksigen .....	5
Tabel 1 - 3	Konsumsi Oksigen untuk Produksi Baja di USA .....	7
Tabel 3 - 1	Komposisi Udara untuk Unsur - Unsur dan Fraksi uap serta Cair yang dihasilkan .....	62
Tabel 3 - 2	Enthalpi Fraksi Cair .....	63
Tabel 3 - 3	Enthalpi Fraksi Uap .....	63
Tabel 3 - 4	Komposisi Fraksi Cair Udara Kolom Bawah .....	71
Tabel 3 - 5	Komposisi Hasil Bawah dan Atas Kolom Bawah .....	71
Tabel 3 - 6	Distribusi temperatur dan Tekanan Kolom Bawah .....	71
Tabel 3 - 7	Harga Konstanta Kesetimbangan dan Volatilitas Relatif Kolom Bawah .....	72
Tabel 3 - 8	Enthalpi Cair dari Fraksi Uap Hasil Ekspansi .....	73
Tabel 3 - 9	Enthalpi Uap dari Fraksi Uap Hasil Ekspansi.....	73
Tabel 3 - 10	Komposisi Uap yang dibuang .....	74
Tabel 3 - 11	Kuantitas dan Enthalpi Hasil Atas yang Diambil .....	74
Tabel 3 - 12	Enthalpi Cair dari Reflux .....	75
Tabel 3 - 13	Enthalpi Uap .....	75
Tabel 3 - 14	Hasil Bawah dan Enthalpi yang dimilikinya .....	76
Tabel 3 - 15	Udara Sisa yang Dibuang .....	78
Tabel 3 - 16	Enthalpi Udara Sisa Fraksi Uap .....	78
Tabel 3 - 17	Enthalpi Udara Sisa Fraksi Cair .....	79
Tabel 3 - 18	Komposisi Udara Mula - Mula, Fraksi Uap dan Cairnya karena Ekspansi Kedua .....	81
Tabel 3 - 19	Enthalpi Fraksi Cair .....	81
Tabel 3 - 20	Enthalpi Fraksi Uap .....	82
Tabel 3 - 21	Komposisi Uap yang Terjadi Akibat Pemisahan .....	82



Tabel 3 - 22	Distribusi Temperatur dan Tekanan pada Kolom Atas .....	83
Tabel 3 - 23	Komposisi Uap yang Terjadi Akibat Pemisahan .....	83
Tabel 3 - 24	Komposisi Udara Mula - Mula, Fraksi Cair dan Fraksi Uap .....	85
Tabel 3 - 25	Enthalpi Fraksi Cair .....	85
Tabel 3 - 26	Enthalpi Fraksi Uap .....	85
Tabel 3 - 27	Enthalpi Kedua Fraksi Setelah Terpisah ( Uap ) .....	86
Tabel 3 - 28	Enthalpi Kedua Fraksi Setelah Terpisah ( Cair ) .....	86
Tabel 3 - 29	Enthalpi Cair Fraksi Cair .....	87
Tabel 3 - 30	Enthalpi Uap Fraksi Cair .....	88
Tabel 3 - 31	Kalor Latent Fase Cair Fraksi Cair .....	91
Tabel 3 - 32	Kalor Latent Fase Uap Fraksi Cair .....	91
Tabel 3 - 33	Hasil Akhir Kolom Distilasi dan Enthalpinya .....	91
Tabel 3 - 34	Komposisi Udara Sisa .....	92
Tabel 3 - 35	Enthalpi Udara Sisa Fraksi Cair .....	93
Tabel 3 - 36	Enthalpi Udara Sisa Fraksi Uap .....	94
Tabel 3 - 37	Komposisi Udara Sisa Fraksi Cair .....	95
Tabel 3 - 38	Komposisi Udara Sisa Fraksi Uap .....	96
Tabel 3 - 39	Kerapatan Uap Hasil Bawah Kolom Atas .....	99
Tabel 3 - 40	Kerapatan Cair Hasil Bawah Kolom Atas .....	99
Tabel 3 - 41	Kerapatan Uap Hasil Bawah Kolom Bawah .....	99
Tabel 3 - 42	Kerapatan Cair Hasil Bawah Kolom Bawah .....	100



A	Luas permukaan perpindahan panas total .....	$\text{ft}^2$
a	Luas permukaan pipa per satuan panjang .....	$\text{ft}^2/\text{ft}$
B	Kelajuan massa fluida hasil bawah .....	$\text{kmol}/\text{jam}$
BM	Berat molekul .....	$\text{kg}/\text{kmol}$
C	Clearance	
COP	Coeficient of Performance	
Cp	Panas jenis pada tekana konstan .....	$\text{Btu}/\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{F}$
D	Kelajuan massa fluida hasil atas .....	$\text{kmol}/\text{jam}$
De	Diameter ekivalen .....	$\text{ft}$
E	Modulus Elastisitas .....	$\text{psi}$
F	Laju fluida umpan .....	$\text{kmol}/\text{jam}$
F <sub>LV</sub>	Faktor aliran cair - uap	
f	Faktor gesekan	
G	Laju massa per satuan luas .....	$\text{lb}_m/\text{ft}^2$
g	Percepatan gravitasi .....	$\text{ft} / \text{s}^2$
H, h	Enthalpi spesifik .....	$\text{Btu}/\text{lb}_m$
h	Koefisien perpindahan panas .....	$\text{Btu}/\text{j} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$
h <sub>fg</sub>	Kalor latent .....	$\text{Btu}/\text{lb}_m$
j <sub>H</sub>	Konstanta Sieder - Tate	
k	Konduktivitas termal .....	$\text{Btu}/\text{j} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$
K <sub>m</sub>	Faktor koreksi momen	
K <sub>t</sub>	Faktor koreksi torsi	
LMTD	Beda temperatur Rata - Rata Logaritmik .....	$^\circ\text{F}$
m	Laju aliran massa .....	$\text{lb}_m / \text{det}$
N	Putaran .....	$\text{rpm}$
Nu	Bilangan Nussel	



n	Jumlah lintasan ( laluan )	
P	Tekanan .....	psi
Pd	Daya poros yang direncanakan .....	hp
Q	Laju perpindahan panas .....	Btu/jam
R	Konstanta gas universal .....	Btu/lbmol.R
Re	Bilangan Reynold	
R <sub>min</sub>	Reflux minimum	
r	Jari - jari .....	ft , inci
S, s	Entropi .....	Btu/lb <sub>m</sub> .R
sp.gr	Spesifik gravity	
SHP	Daya Kuda Poros.....	hp
T, t	Temperatur .....	°F
t	Tebal .....	inci
U	Koefisien perpindahan panas total .....	Btu/j.ft <sup>2</sup> .R
V	Volume .....	in <sup>3</sup> , ft <sup>3</sup>
W	Kerja .....	Btu/jam
X	Fraksi mol hasil atas	
Y	Fraksi mol hasil bawah	

Huruf - Huruf Yunani

$\beta$	Koefisien ekspansi termal .....	R <sup>-1</sup>
$\Delta D$	Pertambahan diameter .....	in
$\Delta P$	Pressure drop .....	psi
$\varepsilon$	Rasio clearance, emisivitas	
$\gamma$	Rasio panas jenis pada tekanan konstan terhadap volume konstan	
$\eta$	Efisiensi	
$\lambda$	Perbandingan jari - jari poros terhadap batang torak	
$\mu$	Angka Poisson, viskositas .....	lb <sub>m</sub> /jam. ft



$\theta$	Rasio panjang langkah torak terhadap diameter silinder	
$\rho$	Massa jenis .....	$\text{lb}_m/\text{ft}^3$
$\sigma$	Tegangan .....	psi
	Konstanta Stefan - Boltzmann .....	$\text{Btu}/\text{jam}.\text{ft}^2.\text{R}^4$

### Tikalas

av	Average, rata - rata.
B	bottom, bawah.
D	distilate, atas.
f	feed, masukan.
g	gas.
HK	Heavy Key, komponen berat
I	inner, bagian dalam
LK	Light Key, komponen ringan.
l	Liquid
o	Outside, bagian luar
ov	Overall, total.
oad	Overall Adiabatic
trk	torak
v	vapor