



TEKNIK MESIN INDUSTRI JILID 3

untuk SMK

Sunyoto



Sunyoto

# Teknik Mesin INDUSTRI

JILID 3

untuk  
Sekolah Menengah Kejuruan



Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan  
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional

Sunyoto, dkk.

# TEKNIK MESIN INDUSTRI

## JILID 3

**SMK**



**Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan**  
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional  
Dilindungi Undang-undang

# TEKNIK MESIN INDUSTRI JILID 3

Untuk SMK

Penulis : Sunyoto  
Karnowo  
S. M. Bondan Respati

Perancang Kulit : TIM

Ukuran Buku : 17,6 x 25 cm

SUN SUNYOTO

t Teknik Mesin Industri Jilid 3 untuk SMK /oleh Sunyoto,  
Karnowo, S. M. Bondan Respati ---- Jakarta : Direktorat Pembinaan  
Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen  
Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan  
Nasional, 2008.

xii, 169 hlm

Daftar Pustaka : Lampiran. A

Daftar Gambar : Lampiran. B

ISBN : 978-979-060-085-0

ISBN : 978-979-060-088-1

Diterbitkan oleh

**Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan**

Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional

Tahun 2008

## KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional, telah melaksanakan kegiatan penulisan buku kejuruan sebagai bentuk dari kegiatan pembelian hak cipta buku teks pelajaran kejuruan bagi siswa SMK. Karena buku-buku pelajaran kejuruan sangat sulit di dapatkan di pasaran.

Buku teks pelajaran ini telah melalui proses penilaian oleh Badan Standar Nasional Pendidikan sebagai buku teks pelajaran untuk SMK dan telah dinyatakan memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh penulis yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para pendidik dan peserta didik SMK.

Buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*download*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Dengan ditayangkan *soft copy* ini diharapkan akan lebih memudahkan bagi masyarakat khususnya para pendidik dan peserta didik SMK di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri untuk mengakses dan memanfaatkannya sebagai sumber belajar.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para peserta didik kami ucapkan selamat belajar dan semoga dapat memanfaatkan buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, 17 Agustus 2008  
Direktur Pembinaan SMK

## **PENGANTAR PENULIS**

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas bimbingan dan petunjukNya, penulis dapat menyelesaikan buku ini.

Buku yang diberi judul "Teknik Mesin Industri" ini disusun dengan memperhatikan rambu-rambu yang ada, antara lain Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2005 tentang Standar Nasional Pendidikan, Standar Isi, Standar Kompetensi Lulusan, dan Kurikulum Tingkat Satuan Pendidikan (KTSP) Sekolah Menengah Kejuruan (SMK), khususnya bidang keahlian Teknik Mesin.

Buku ini banyak membahas tentang mesin-mesin konversi energi, dimana sesuai dengan silabus dalam KTSP bidang Teknik Mesin materi tersebut terdapat dalam mata pelajaran produktif kategori dasar kompetensi kejuruan. Sesuai spektrum Pendidikan Kejuruan Kurikulum Edisi 2004, bidang keahlian Teknik Mesin terdiri dari 9 (sembilan) program keahlian dimana materi dasar kompetensi kejuruan diberikan kepada sembilan program keahlian tersebut.

Diharapkan buku ini dapat dijadikan pedoman atau rujukan bagi siswa dan guru SMK bidang keahlian Teknik Mesin khususnya, dan bidang keahlian lain pada umumnya.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktur Pembinaan SMK, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Depdiknas yang telah memberi kepercayaan kepada penulis untuk menyelesaikan buku ini. Ucapan terimakasih penulis sampaikan juga kepada seluruh pihak yang terlibat dalam penulisan buku ini, baik dari kalangan akademisi maupun praktisi.

Akhir kata, mudah-mudahan buku ini bermanfaat bagi seluruh pembaca dan masyarakat luas pada umumnya. Kritik dan saran demi perbaikan buku ini akan penulis terima dengan senang hati. Wassalam.

Tim Penulis

## ABSTRAK

Buku Teknik Mesin Industri ini dibuat dengan harapan memberikan manfaat bagi para siswa Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) khususnya bidang keahlian Teknik Mesin, sehingga mereka mempunyai pengetahuan dasar tentang prinsip konversi energi dan mesin-mesinnya. Buku ini memaparkan teori dasar konversi energi dan ditambah dengan penjelasan konstruksi-konstruksi mesin pada setiap bab. Pada bab-bab awal dipaparkan tentang dasar-dasar kejuruan serta ilmu-ilmu dasar meliputi mekanika fluida, termodinamika, perpindahan panas. Penjelasan pada setiap bab dilengkapi dengan gambar-gambar dan diagram untuk mempermudah pemahaman siswa.

Uraian per bagian mengacu pada standar kompetensi dalam Kurikulum Tingkat Satuan Pendidikan (KTSP) Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) khususnya bidang keahlian Teknik Mesin. Penjelasan ditekankan pada konsep dasar, mulai dari sejarah perkembangan sampai teknologi terbaru yang ada. Pembuktian secara kuantitatif terhadap konsep-konsep konversi energi dibatasi. Siswa dalam membaca buku ini diarahkan hanya untuk melogika teori dasar dengan tujuan mempermudah pemahaman.

Konsep konversi energi diuraikan dengan membahas terlebih dahulu teori yang mendasari. Untuk pompa, kompresor dan turbin air teori dasar yang diuraikan adalah sama, yaitu penerapan mekanika fluida. Pada mesin-mesin kalor, motor bakar, turbin gas, dan turbin uap, teori yang mendasari adalah termodinamika, mekanika fluida, dan perpindahan panas.

Untuk melengkapi paparan konsep-konsep dasar pada setiap bab diberikan contoh-contoh aplikasinya. Fokus pembahasan di dalam buku ini adalah mesin-mesin yang mengkonversi sumber-sumber energi yang tersedia di alam untuk menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan. Mesin-mesin pompa dan kompresor, dibahas detail dalam buku ini karena mesin-mesin tersebut dianggap sebagai alat bantu untuk pengoperasian mesin-mesin konversi. Selanjutnya dibahas tentang mesin-mesin panas, seperti motor bakar, turbin gas, dan turbin uap. Pada bagian akhir buku dibahas tentang turbin air, refrigerasi dan pengkondisian udara.

## DAFTAR ISI

### JILID 1

<b>BAB 1 DASAR KEJURUAN .....</b>	<b>1</b>
A. Dasar ilmu statiska .....	1
A.1. Tegangan tarik dan tekan. ....	1
A.2. Rasio poison .....	2
A.3. Tegangan Geser .....	2
A.4. Tegangan Bending .....	2
A.5. Tegangan Maksimum .....	3
A.7. Torsi.....	3
B. Mengenal Elemen Mesin.....	4
B.1. Rem .....	5
B.2. Roda gigi.....	5
B.3. Bantalan.....	7
B.4. Pegas.....	8
B.5. Poros .....	10
B.6. Transmisi .....	11
C. Mengenal material dan kemampuan proses .....	14
C.1. Besi cor.....	14
C.2. Baja karbon .....	16
C.3. Material non logam .....	17
<b>BAB 2 MEMAHAMI PROSES–PROSES DASAR KEJURUAN .....</b>	<b>19</b>
A. Mengenal Proses Pengecoran Logam .....	19
B. Mengenal Proses Pembentukan Logam .....	21
B.1. Pembentukan plat .....	21
B.2. Kerja bangku.....	21
C. Proses Mesin Perkakas .....	24
C.1. Mesin bubut.....	24
C.2. Mesin fris .....	26

<b>D. MENGENAL PROSES MESIN KONVERSI ENERGI .....</b>	<b>27</b>
D.1. Termodinamika .....	27
D.2. Bentuk-bentuk energi .....	
D.3. Sifat energi .....	33
D.4. Hukum termodinamika .....	38
D.5. Gas Ideal.....	43
<b>E. Dasar Fluida.....</b>	<b>46</b>
E.1. Massa jenis .....	46
E.2. Tekanan .....	46
E.3. Kemampumampatan .....	48
E.4. Viskositas .....	49
E.5. Aliran fluida dalam pipa dan saluran .....	50
E.6. Kondisi aliran fluida cair .....	54
<b>F. Perpindahan Panas.....</b>	<b>55</b>
F.1. Konduksi.....	55
F.2. Konveksi.....	55
F.3. Radiasi.....	56
<b>G. Bahan Bakar.....</b>	<b>57</b>
G.1. Penggolongan bahan baker.....	58
G.2. Bahan-bakar cair.....	59
G.3. Bahan bakar padat.....	64
<b>BAB 3 MEREALISASIKAN KERJA AMAN BAGI MANUSIA, ALAT DAN LINGKUNGAN.....</b>	<b>66</b>
<b>A. Keselamatan dan Kesehatan Kerja .....</b>	<b>66</b>
A.1. Pendahuluan .....	66
A.2. Peraturan Perundangan K3.....	66
A.3. Prosedur Penerapan K3.....	68
A 4. Penerapan K3 Bidang Pesawat Uap dan Bejana Tekan....	70
A.5. Kebakaran dan Penanganannya.....	72
A.6. Kesehatan Kerja dan Lingkungan .....	74

<b>BAB 4 MENGGAMBAR TEKNIK</b> .....	77
A. Alat Gambar .....	77
A.1. Kertas gambar .....	77
B. Kop Gambar .....	82
C. Gambar Proyeksi .....	83
D. Skala .....	89
E. Ukuran dan Toleransi .....	90
F. Penyederhanaan gambar .....	92
G. Lambang Pengerjaan.....	93
<b>BAB 5 DASAR POMPA</b> .....	97
A. Prinsip Kerja Pompa.....	98
B. Klasifikasi Pompa .....	99
C. Komponen-Komponen Pompa.....	104
D. Konstruksi Pompa Khusus .....	106
D.1. Pompa sembur ( <i>jet pump</i> ) .....	106
D.2. Pompa <i>viscous</i> .....	107
D.3. Pompa dengan volute ganda .....	108
D.4. Pompa CHOPPER .....	110
D.5. Pompa dengan <i>Reccesed Impeller</i> .....	110
D.6. Pompa lumpur ( <i>slurry</i> ) .....	111
D.7. Pompa LFH ( <i>Low Flow High Head</i> ) .....	112
<b>BAB 6 PERFORMANSI POMPA SENTRIFUGAL</b> .....	113
A. Kecepatan Spesifik.....	113
B. Kurva Karakteristik .....	115
C. Head (Tinggi Tekan) .....	117
C.1. Head statis total.....	117
C.2. Head Kerugian (Loss).....	120
C.3. Head Hisap Positif Neto NPSH .....	125
C.4. Hal yang mempengaruhi NPSH yang tersedia.....	128
C.5. Putaran dan jenis pompa.....	129
D. Kerja, Daya dan Efisiensi Pompa.....	129

D.1. Definisi .....	130
E. Pemilihan Pompa.....	132
E.1. Kapasitas.....	133
E.2. Grafik kerja berguna.....	133
E.3. Hal yang mempengaruhi efisiensi pompa .....	133
F. Kavitasi.....	134
F.1. Tekanan uap zat cair .....	134
F.2. Proses kavitasi .....	134
F.3. Pencegahan kavitasi .....	135
G. Pemilihan Penggerak Mula.....	137
G.1. Roda gigi transmisi .....	140
G.2. Pompa dengan penggerak turbin angin.....	141
H. Kurva Head Kapasitas Pompa dan Sistem.....	142
I. Operasi Pompa pada Kapasitas tidak Normal .....	144
I.1. Operasi dengan kapasitas tidak penuh .....	145
I.2. Operasi dengan kapasitas melebihi normal.....	146
J. Kontrol Kapasitas Aliran .....	146
J.1. Pengaturan katup.....	147
J.2. Pengaturan putaran .....	148
J.3. Pengaturan sudut sudu impeler .....	148
J.4. Pengaturan jumlah pompa.....	150
<b>BAB 7 GANGGUAN OPERASI POMPA.....</b>	<b>154</b>
A. Benturan Air ( <i>Water Hammer</i> ) .....	154
A.1. Kerusakan akibat benturan air .....	155
A.2. Pencegahan benturan air .....	155
B. Gejala Surjing .....	156
C. Tekanan Berubah-ubah .....	157

## JILID 2

<b>BAB 8 POMPA PERPINDAHAN POSITIF .....</b>	<b>159</b>
A. Klasifikasi Pompa Perpindahan Positif.....	159
B. Penggunaan.....	162
C. Pompa Gerak Bolak balik.....	162
C.1.Cara kerja pemompaan .....	162
C.2. Pemakaian.....	163
C.3. Kekurangan pompa bolak-balik.....	164
C.4. Komponen pompa gerak bolak-balik .....	164
C.5. Pompa daya .....	165
C.6. Pompa aksi langsung .....	168
D. Pompa Rotari .....	170
D.1. Pompa roda gigi .....	170
D.2. Lobe, Skrup, vanes, flexibel tube , radial axial, plunger dan circumferential pump.....	171
<b>BAB 9 DASAR KOMPRESOR.....</b>	<b>180</b>
A. Prinsip Kerja Kompresor .....	180
B. Klasifikasi Kompresor.....	183
C. Penggunaan Udara Mampat .....	188
D. Dasar Termodinamika Kompresi.....	189
D.1. Proses Kompresi .....	189
D.2. Temperatur Kompresi, Perbandingan Tekanan dan Kerja	192
E. Efisiensi Kompresor .....	194
E.1. Efisiensi laju kerja adiabatik kompresor.....	194
E.2. Efisiensi volumetrik .....	198
F. Jenis Penggerak dan Spesifikasi Kompresor .....	199
G. Konstruksi Kompresor Perpindahan positif.....	202
G.1. Konstruksi kompresor torak.....	202
G.2. Konstruksi kompresor sekrupKompresor sekrup injeksi minyak.....	211

G.3. Konstruksi kompresor sudu luncur.....	215
G.4. Konstruksi kompresor jenis roots .....	218
H. Konstruksi Kompresor Rotari Aksial dan Radial .....	219
I. Gangguan Kerja Kompresor dan Cara Mengatasinya .....	222
I.1. Pembebanan lebih dan pemanasan lebih pada motor penggerak.....	222
I.2. Pemanasan lebih pada udara hisap .....	222
I.3. Katup pengaman yang sering terbuka .....	223
I.4. Bunyi dan getaran .....	223
I.5. Korosi .....	224
<b>BAB 10 DASAR MOTOR BAKAR</b>	
A. Sejarah Motor Bakar .....	230
B. Siklus 4 Langkah dan 2 Langkah.....	237
B.1. Siklus 4 langkah .....	237
B.2. Siklus 2 langkah .....	238
C. Daftar Istilah-Istilah Pada Motor Bakar .....	240
<b>BAB 11 SIKLUS MOTOR BAKAR .....</b>	<b>245</b>
A. Siklus Termodinamika Motor Bakar .....	245
A.1. Siklus udara ideal .....	245
A.2. Siklus aktual .....	250
B. Menghitung Efisiensi Siklus Udara Ideal.....	251
B.1. Efisiensi dari siklus Otto .....	252
B.2. Efisiensi siklus tekanan konstan.....	254
<b>BAB 12 PRESTASI MESIN .....</b>	<b>256</b>
A. Propertis Geometri Silinder.....	258
A.1. Volume langkah dan volume ruang bakar.....	261
A.2. Perbandingan kompresi ( compression ratio).....	261
A.3. Kecepatan piston rata-rata.....	262
B. Torsi dan Daya Mesin .....	262
C. Perhitungan Daya Mesin .....	264
C.1. Daya indikator .....	265
C.2. Daya poros atau daya efektif .....	279

C.3. Kerugian daya gesek .....	279
D. Efisiensi Mesin .....	279
D.1. Efisiensi termal .....	280
D.2. Efisiensi termal indikator.....	280
D.3. Efisiensi termal efektif.....	281
D.4. Efisiensi mekanik.....	281
D.5. Efisiensi volumetric.....	282
E. Laju pemakaian bahan bakar spesifik .....	283
F. Perhitungan performasi motor bakar torak .....	283
<b>BAB 13 KOMPONEN MESIN .....</b>	<b>289</b>
A. Mesin Motor Bakar .....	289
B. Bagian Mesin.....	289
B.1. Blok silinder .....	290
B.1.1. Silinder.....	292
B.2. Kepala silinder .....	295
B.2.1. Bentuk ruang bakar .....	295
B.3. Piston atau torak.....	296
B.4. Batang torak .....	300
B.5. Poros engkol.....	301
B.6. Roda gaya .....	302
B.7. Bantalan.....	302
B.8. Mekanik Katup.....	303
<b>BAB 14 KELENGKAPAN MESIN.....</b>	<b>304</b>
A Sistim Pelumasan .....	304
A.1.Minyak pelumas.....	305
A.2.Model pelumasan .....	308
A.3.Bagian-bagian utama pada sistim pelumasan tekan.....	311
A.4. Sistim ventilasi karter.....	313
A.5. Saringan minyak pelumas .....	313
A.6.Tangkai pengukur minyak.....	314
B. Sistim Pendinginan .....	315

B.1. Pendinginan air .....	315
B.2. Pendingin udara .....	320

### JILID 3

#### **BAB 15 TURBIN**

B. Asas Impuls dan Reaksi .....	322
C. Segitiga Kecepatan.....	324
D. Turbin Impuls .....	327
D.1. Turbin impuls satu tahap ( Turbin De Laval) .....	330
D.2. Turbin impuls gabungan.....	332
E. Turbin Reaksi.....	336

#### **BAB 16 TURBIN GAS ..... 340**

A. Sejarah Perkembangan .....	342
B. Dasar Kerja Turbin Gas .....	344
B.1. Bahan bakar turbin gas .....	346
B.2. Proses pembakaran .....	347

#### **BAB 17 SIKLUS TERMODINAMIKA ..... 351**

A. Klasifikasi Turbin Gas .....	352
A.1 Turbin gas sistem terbuka ( langsung dan tidak langsung) .....	352
A.2. Turbin gas sistem tertutup ( langsung dan tidak langsung) .....	355
A.3. Turbin gas dua poros terpisah.....	357
A.4. Turbin gas dua poros terpusat .....	358
B. Efisiensi Turbin Gas.....	359
C. Modifikasi Turbin Gas.....	364
C.1. Turbin gas dengan regenerator.....	364
C.2. Turbin gas dengan pendingin sela (intercooler).....	366
C.3. Intercooler, Reheater, dan Regenerato.....	368

#### **BAB 18 KONTRUKSI TURBIN GAS ..... 370**

A. Rotor .....	374
----------------	-----

B. Ruang Bakar .....	375
C. Kompresor.....	377
D. Turbin.....	380
E. Aplikasi Turbin Gas .....	381
<b>BAB 19 MESIN TENAGA UAP.....</b>	<b>383</b>
A. Siklus Termodinamika Mesin Uap.....	384
B. Siklus Aktual dari Siklus Rankine .....	385
C. Peralatan Sistem Tenaga Uap .....	386
C.1. Boiler	386
C.2. Turbin Uap.....	391
C.3. Kondensor .....	394
D. Ekonomiser .....	395
E. Superheater.....	396
F. Burner.....	397
F.1. Burner untuk bahan bakar cair .....	398
F.2. Burner dengan bahan-bakar gas.....	399
F.3. Burner untuk bakar padat. ....	401
<b>BAB 20 PRINSIP DASAR ALIRAN .....</b>	<b>405</b>
A. Sejarah Turbin Air .....	408
B. Instalasi Pembangkit Tenaga Air.....	411
C. Energi Potensial Aliran Air .....	414
C.1. Head air.....	415
D. Prinsip Peralian Energi Aliran .....	416
E. Daya Turbin.....	417
F. Kecepatan Putar Turbin dan Kecepatan Spesifik.....	419
G. Perhitungan Performasi Turbin .....	420

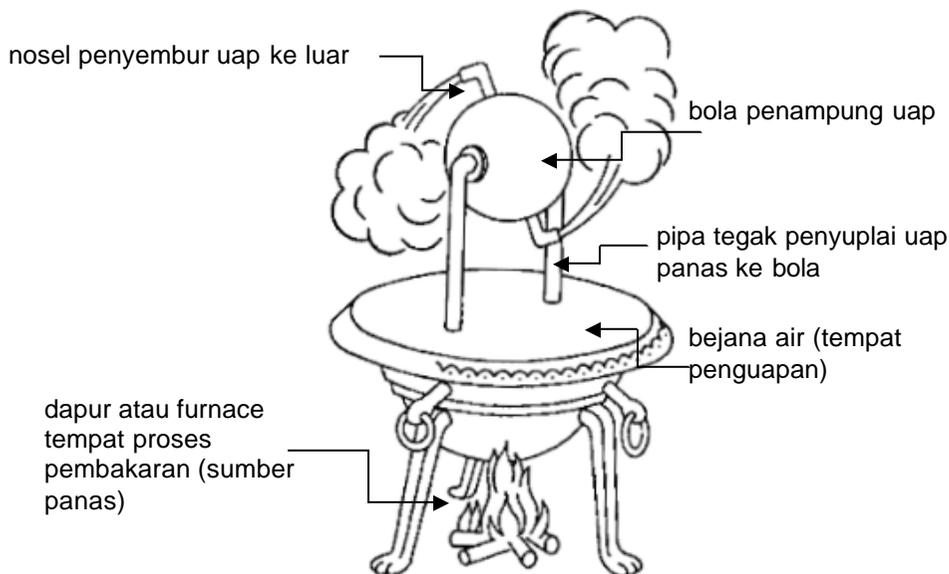
<b>BAB 21 KLASIFIKASI TURBIN AIR .....</b>	<b>423</b>
A. Turbin Impuls atau Turbin Tekanan Sama.....	424
A.1. Turbin pelton .....	424
A.2. Turbin aliran ossberger .....	428
B. Turbin Reaksi atau Turbin Tekan Lebih.....	429
B.1. Turbin Francis413 .....	429
B.2. Turbin Kaplan .....	430
C. Perbandingan Karakteristik Turbin .....	432
<b>BAB 22 DASAR REFRIGERASI DAN</b>	
<b>PENKONDISIAN UDARA .....</b>	<b>434</b>
A. Klasifikasi Mesin Refrigerasi .....	434
B. Penggunaan.....	435
B.1. Pengkondisian udara untuk industri .....	435
B.2. Pengkondisian udara untuk Laboratorium.....	436
B.3. Pengkondisian udara Ruang Komputer .....	436
B.4. Instalasi penkondisian udara pada	
Instalasi power plant .....	436
B.5. Pengkondisian udara pada rumah tangga .....	436
B.6. Pengkondisian udara untuk Automobil.....	437
B.7. Penyimpanan dan pendistribusian .....	437
C. Sistem Pengkondisian Udara .....	438
D. Peralatan Pengkondisian udara.....	439
E. Beban Pemanasan dan Pendinginan .....	440
F. Kualitas udara .....	444
<b>BAB 23 SIKLUS KOMPRESI UAP.....</b>	<b>446</b>
A. Prinsip Kerja.....	446
B. Daur Refrigerasi Kompresi Uap .....	448
C. Peralatan Utama Sistem Refrigerasi Kompresi Uap.....	452
D. Refrigeran .....	454
E. Perhitungan Koefisien Unjuk Kerja .....	455
F. Heat pump atau Pompa Kalor.....	458
G. Refrigerasi Absorpsi .....	459

# BAB 15 TURBIN

## A. Pendahuluan

Penggunaan turbin uap untuk keperluan industri merupakan pilihan yang cukup menguntungkan karena mempunyai efisiensi yang relatif tinggi dan bahan bakar yang digunakan untuk pembangkitan uap dapat bervariasi. Penggunaan turbin uap yang paling banyak adalah untuk mesin pembangkitan tenaga listrik. Sumber uap panas sebagai fluida yang mempunyai energi potensial tinggi berasal dari sistem pembangkit uap (boiler) atau dari sumber uap panas geotermal.

Adapun definisi turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik kemudian energi kinetik tersebut diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Poros turbin dihubungkan dengan yang digerakkan, yaitu generator atau peralatan mesin lainnya, menggunakan mekanisme transmisi roda gigi. Berdasarkan definisi tersebut maka turbin uap termasuk mesin rotari. Jadi berbeda dengan motor bakar yang merupakan mesin bolak-balik (*reciprocating*).



Gambar 15.1 Mesin uap Hero

Dalam sejarah, mesin uap pertama kali dibuat oleh Hero dari Alexandria, yaitu sebuah prototipe turbin uap primitif yang bekerja menggunakan prinsip reaksi. Gambar 15.1 menunjukkan turbin uap Hero

dimana tubin ini terdiri dari sumber kalor, bejana yang diisi dengan air dan pipa tegak yang menyangga bola dimana pada bola terdapat dua nosel uap. Proses kerjanya adalah sebagai berikut, sumber kalor akan memanasi air di dalam bejana sampai air menguap, lalu uap tersebut mengalir melewati pipa tegak masuk ke bola. Uap tersebut terkumpul di dalam bola, kemudian melalui nosel menyembur ke luar, karena semburan tersebut, bola mejadi berputar.

Selanjutnya setelah penemuan Hero, beberapa abad kemudian dikembangkan turbin uap oleh beberapa orang yang berusaha memanfaatkan uap sebagai sumber energi untuk peralatan mereka. Thomas Savery (1650-1715) adalah orang Inggris yang membuat mesin uap bolak-balik pertama, mesin ini tidak populer karena mesin sering meledak dan sangat boros uap. Untuk memperbaiki kinerja dari mesin Savery, Denis Papin (1647-1712) membuat katup-katup pengaman dan mengemukakan gagasan untuk memisahkan uap air dan air dengan menggunakan torak.

Gagasan Papin direspons oleh Thomas Newcomen ( 1663-1729) yang merancang dan membangun mesin menggunakan torak. Prinsip kerja yaitu uap tekanan rendah dimasukkan ke silinder dan menekan torak sehingga bergerak ke atas. Selanjutnya, silinder disemprot air sehingga terjadi kondensasi uap, tekanan menjadi turun dan vakum. Karena tekanan atmosfer dari luar torak turun maka terjadi langkah kerja.

Perkembangan mesin uap selanjutnya adalah mesin uap yang dikembangkan oleh James Watt. Selama kurang lebih 20 tahun ia mengembangkan dan memperbaiki kinerja dari mesin Newcomen. Gagasan James Watt yang paling penting adalah mengkonversi gerak bolak-balik menjadi gerak putar (1781). Mesin tersebut kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh Corliss (1817-1888), yaitu dengan mengembangkan katup masuk yang menutup cepat, untuk mencegah pencekikan katup pada waktu menutup. Mesin Corliss menghemat penggunaan bahan bakar batu bara separo dari batu bara yang digunakan mesin uap James watt.

Kemudian Stumpf (1863) mengembangkan mesin *uniflow* yang dirancang untuk mengurangi susut kondensasi. Mesin uap yang dibuat paling besar pada abad 18 adalah menghasikan daya 5 MW, pada waktu itu dianggap raksasa, karena tidak adal agi mesin yang lebih besar. Seiring dengan kebutuhan tenaga listrik yang besar, kemudian banyak pengembangan untuk membuat mesin yang lebih efisien yang berdaya besar.

Mesin uap bolak-balik memiliki banyak keterbatasan, antara lain mekanismenya terlalu rumit karena banyak penggunaan katup-katup dan juga mekanisme pengubah gerak bolak-balik menjadi putaran. Maka untuk memenuhi tuntutan kepraktisan mesin uap dengan efisiensi berdaya lbih besar, dkembangkan mesin uap rotari. Mesin uap rotari

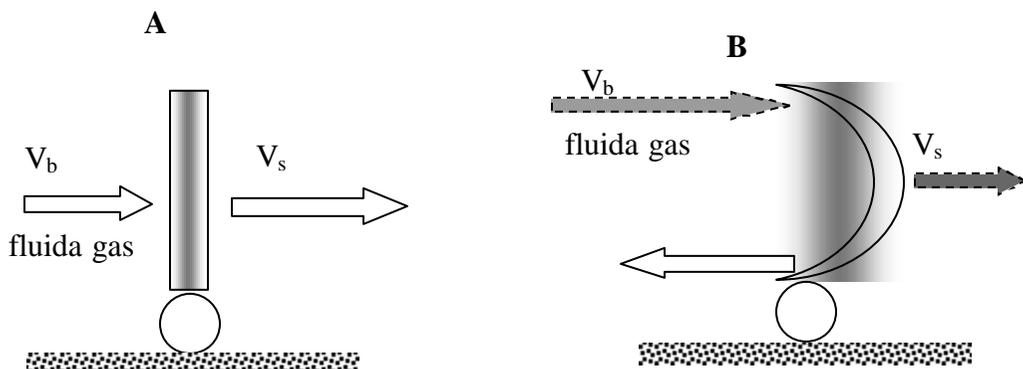
komponen utamanya berupa poros yang bergerak memutar. Model konversi energi potensial uap tidak menggunakan torak lagi, tetapi menggunakan sudu-sudu turbin.

Gustav de Laval (1845-1913) dari Swedia dan Charles Parson (1854-1930) dari Inggris adalah dua penemu awal dari dasar turbin uap modern. De laval pada mulanya mengembangkan turbin rekasi kecil berkecepatan tinggi, namun menganggapnya tidak praktis dan kemudian mengembangkan turbin impuls satu tahap yang andal, dan namanya digunakan untuk nama turbin jenis impuls. Berbeda dengan De laval, Parson mengembang turbin rekasi tingkat banyak, turbinnya dipakai pertama kali pada kapal laut.

Disamping para penemu di atas, penemu-penemu lainnya saling melengkapi dan memperbaiki kinerja dari turbin uap. Rateau dari Prancis mengembangkan turbin impuls tingkat banyak, dan C.G. Curtis dari Amerika Serikat mengembangkan turbin impuls gabungan kecepatan. Selanjutnya, penggunaan turbin uap meluas dan praktis menggantikan mesin uap bolak-balik, dengan banyak keuntungan. Penggunaan uap panas lanjut yang meningkatkan efisiensi sehingga turbin uap berdaya besar (1000 MW, 3600 rpm, 60 Hz) banyak dibangun.

## B. Asas Impuls dan Reaksi

Turbin adalah mesin rotari yang bekerja karena terjadi perubahan energi kinetik uap menjadi putaran poros turbin. Proses perubahan itu terjadi pada sudu-sudu turbin. Sebagai perbandingan dengan mesin torak yang bekerja karena ekspansi energi panas gas atau uap di dalam silinder yang mendorong torak untuk bergerak bolak-balik. Pada dasarnya, prinsip kerja mesin torak dengan turbin uap adalah sama. Fluida gas dengan energi potensial yang besar berekspansi sehingga mempunyai energi kinetik tinggi yang akan mendorong torak atau sudu, karena dorongan atau tumbukan tersebut, torak atau sudu kemudian bergerak. Proses tumbukan inilah yang dinamakan dengan Impuls



Gambar 15.2 Azas impuls pada plat datar dan sudu

Azas impuls dapat dijelaskan dengan metode sebagai berikut. Pada gambar 15.2 A adalah sebuah pelat yang ditumbuk dengan fluida gas berkecepatan  $V_s$ , dan laju massa  $\dot{m}$ , karena pelat itu beroda sehingga bergerak dengan kecepatan  $V_b$ . Besarnya daya dapat dihitung dengan persamaan:

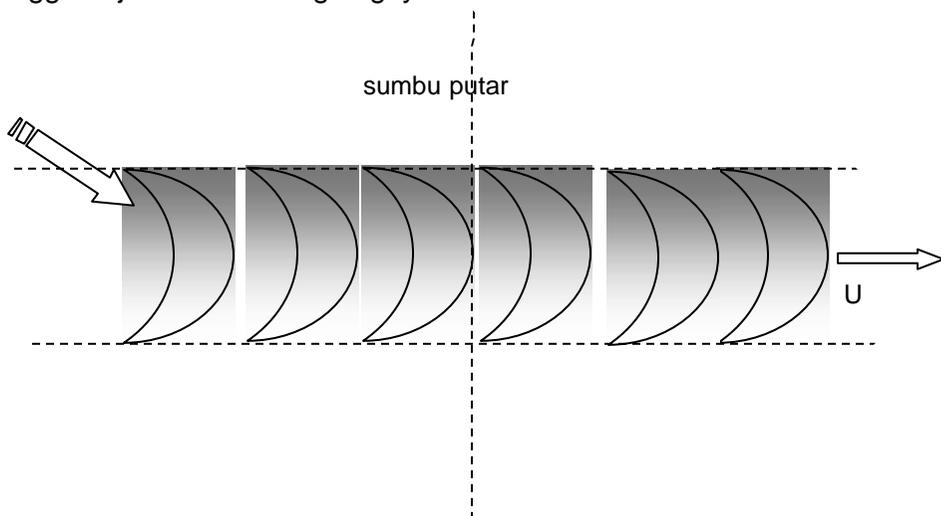
$$\dot{W}_{optimum}(plat) = \frac{\dot{m}V_s^2}{4}$$

sedangkan pada gambar B adalah sebuah sudu yang ditumbuk fluida gas dengan laju masa  $\dot{m}$ , maka daya yang dihasilkan adalah:

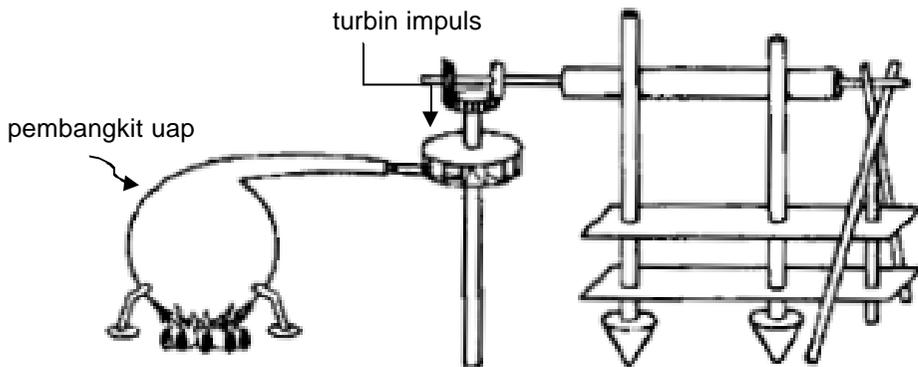
$$\dot{W}_{optimum}(sudu) = \frac{\dot{m}V_s^2}{2}$$

Dari dua model di atas, dapat dilihat bahwa model sudu mempunyai daya yang lebih besar pada kecepatan dan laju massa fluida gas yang sama. Maka dengan alasan tersebut, bentuk sudu dianggap yang paling efisien untuk diterapkan pada turbin uap atau jenis turbin lainnya seperti turbin gas dan air.

Penerapan model sudu tersebut di atas pada turbin uap, penataannya kurang lebih seperti pada gambar 15.3, yaitu menata sudu-sudu tersebut sebaris mengelilingi roda jalan atau poros turbin uap, sehingga terjadi keseimbangan gaya.



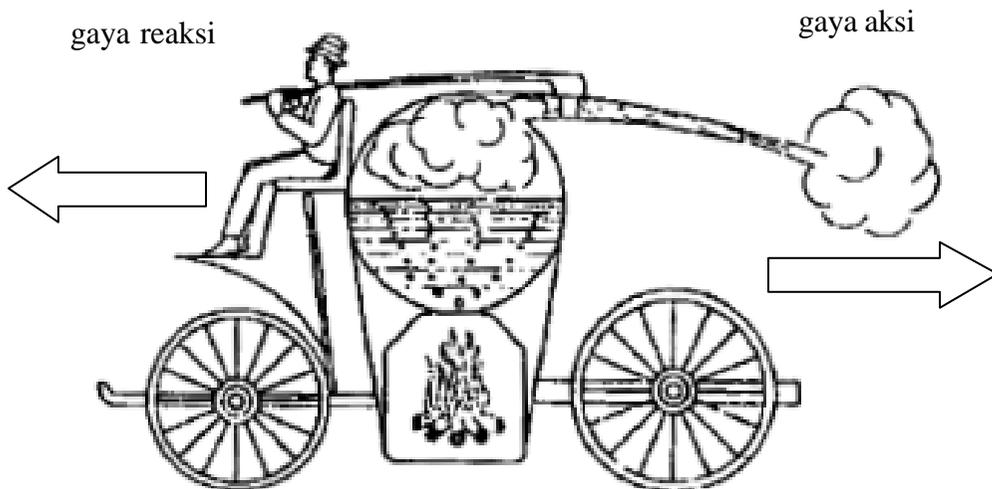
Gambar 15.3 Sudu sudu impuls pada rotor turbin uap



Gambar 15.4 Mesin uap Branca dengan turbin impuls

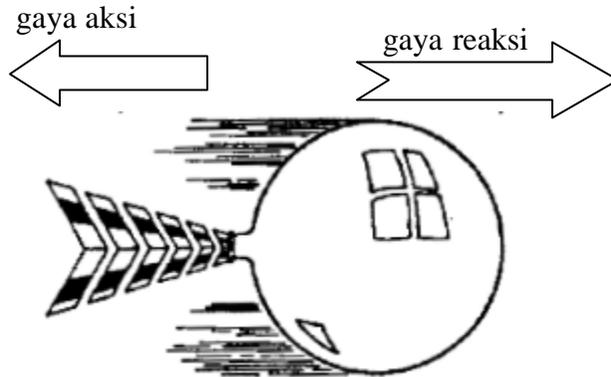
Model turbin impuls dalam sejarahnya sudah pernah dibuat oleh Branca (Gambar 15.4). Prinsip kerjanya adalah dengan menyemburkan uap berkecepatan tinggi melalui nosel ke sudu-sudu impuls pada roda jalan. Akibat adanya tumbukan antara semburan gas dengan sudu-sudu jalan turbin impuls, poros turbin menjadi berputar.

Berbeda dengan azas impuls azas reaksi, untuk sebagian orang lebih sulit dipahami. Untuk menggambarkan azas reaksi bekerja pada gambar adalah model jet uap dari Newton.



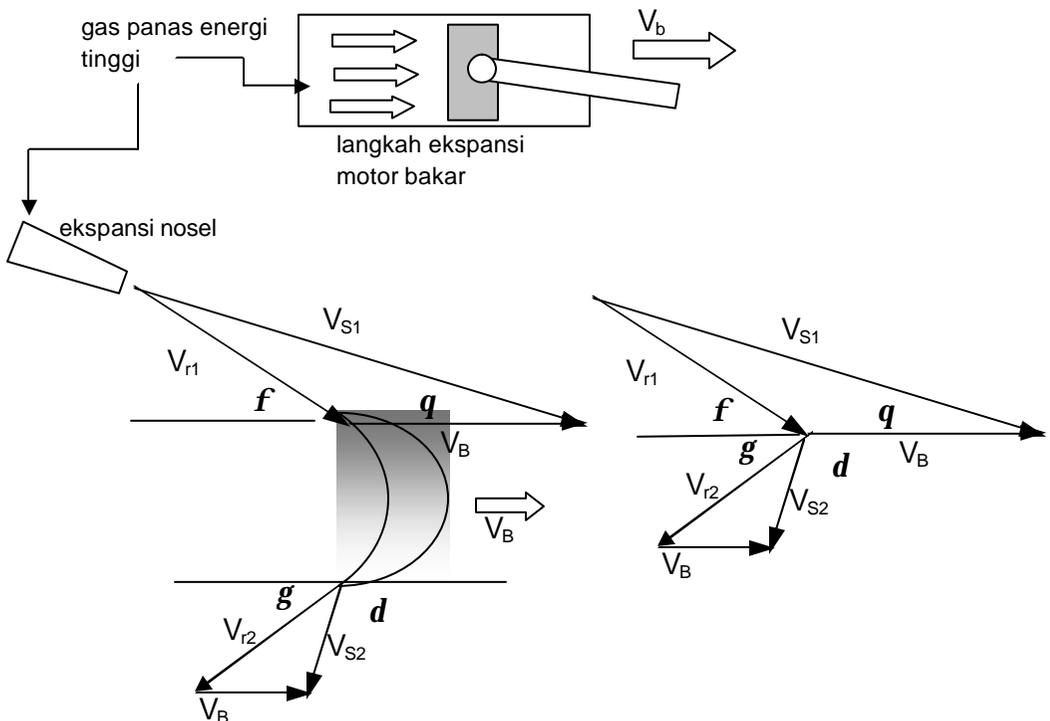
Gambar 15.5 Mesin uap Newton gaya aksi reaksi

Semburan uap dari tabung mempunyai energi kinetik yang besar sehingga sepeda akan bergerak ke kiri. Dari hal tersebut dapat dipahami bahwa mesin tersebut bekerja dengan azas reaksi, yaitu semburan uap melakukan aksi sehingga timbul reaksi pada sepeda untuk bergerak melawan aksi. Pada gambar adalah contoh lain dari aksi-reaksi.



Gambar 15.6 Gaya aksi-reaksi pada balon

### C. Segitiga Kecepatan



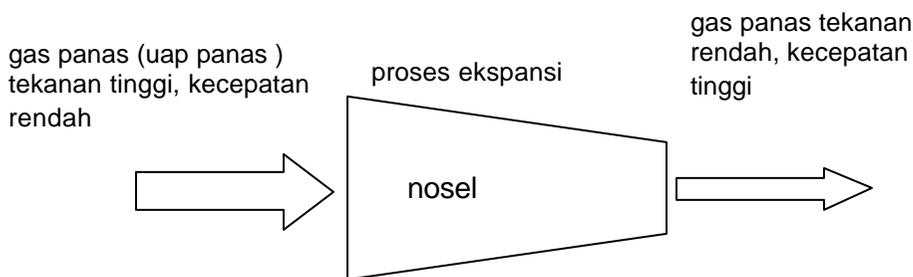
Gambar 15.7 Segitiga kecepatan pada sudu turbin impuls

Segitiga kecepatan adalah dasar kinematika dari aliran fluida gas yang menumbuk sudu turbin. Dengan pemahaman segitiga kecepatan akan sangat membantu dalam pemahaman proses konversi pada sudu-sudu turbin uap atau pada jenis turbin yang lain. Adapun notasi dari segitiga kecepatan adalah sebagai berikut

- $V_{s1}$  = kecepatan absolut fluida meninggalkan nosel
- $V_B$  = kecepatan sudu
- $V_{r1}$  = kecepatan relatif fluida
- $V_{r2}$  = kecepatan relatif fluida meninggalkan sudu
- $V_{s2}$  = kecepatan absolut fluida meninggalkan sudu
- $q$  = sudut nosel
- $f$  = sudut masuk sudu
- $d$  = sudut ke luar sudu
- $g$  = sudut ke luar fluida

Dari segitiga kecepatan di atas, panjang pendeknya garis adalah mewakili dari besar kecepatan masing-masing. Sebagai contoh, fluida masuk sudu dari nosel dengan kecepatan  $V_{s1}$  kemudian ke luar dari nosel sudah berkurang menjadi  $V_{s2}$  dengan garis yang lebih pendek. Artinya sebagian energi kinetik fluida masuk sudu diubah menjadi energi kinetik sudu dengan kecepatan  $V_B$ , kemudian fluida yang sudah memberikan energinya meninggalkan sudu dengan kecepatan  $V_{s2}$ .

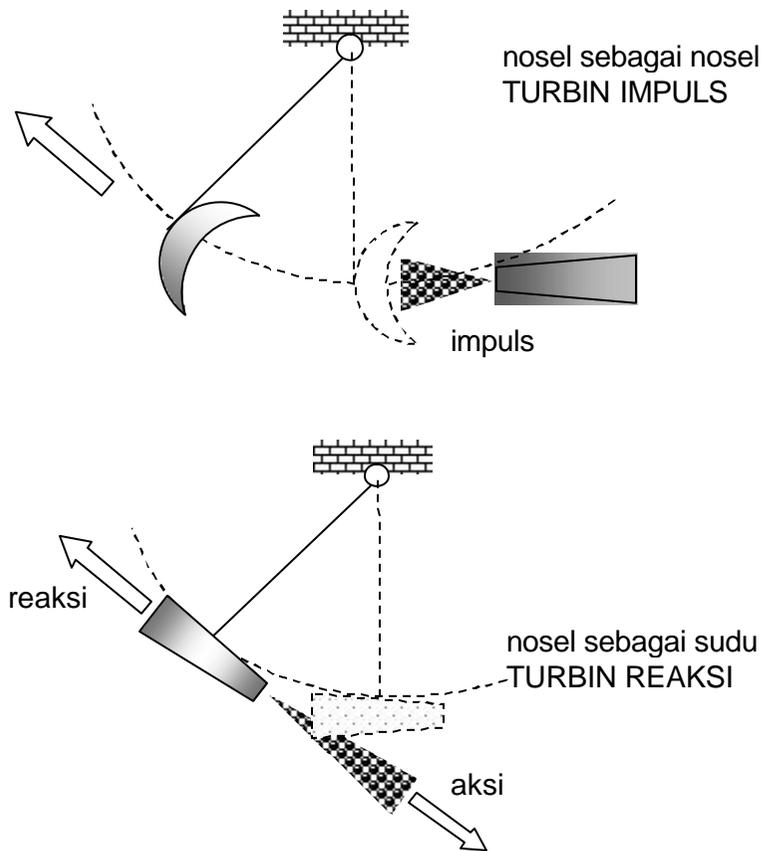
Proses perubahan atau konversi energi pada turbin adalah sama dengan perubahan energi pada motor bakar, tetapi dengan metode yang berbeda. Untuk motor bakar, pada langkah ekspansi fluida gas yaitu gas pembakaran energinya mengalami penurunan bersamaan dengan penurunan tekanan di dalam silinder. Hal itu terjadi karena sebagian energinya diubah menjadi energi kinetik gas pembakaran dan dikenakan langsung pada torak. Karena ada dorongan dari energi kinetik gas pembakaran torak bergerak searah dengan gaya dorong tersebut, kondisi ini disebut langkah tenaga.



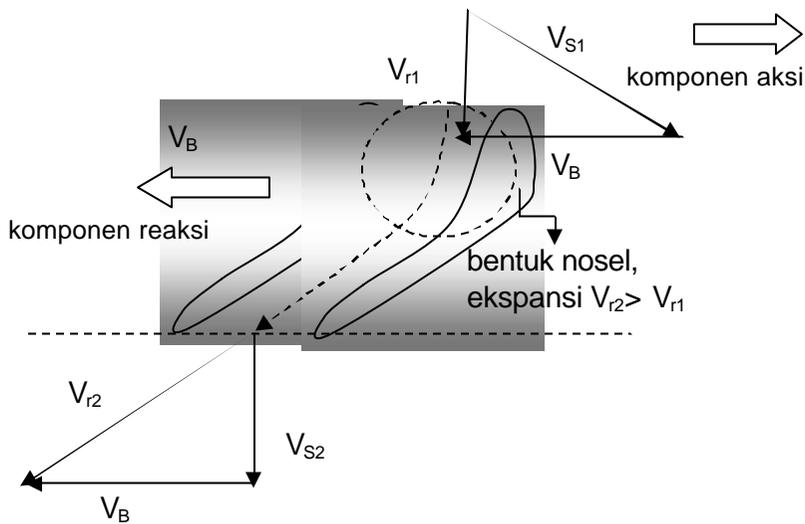
Gambar 15.8 Proses ekspansi pada nosel

Pada turbin, proses perubahan energi mulai terjadi di nosel, yaitu ekspansi fluida gas pada nosel. Pada proses ekspansi di nosel, energi fluida mengalami penurunan, demikian juga tekanannya. Berbarengan dengan penurunan energi dan tekanan, kecepatan fluida gas naik, dengan kata lain energi kinetik fluida gas naik karena proses ekspansi. Kemudian, fluida gas dengan energi kinetik tinggi menumbuk sudu turbin dan memberikan sebagian energinya ke sudu, sehingga sudu pun bergerak. Perubahan energi dengan tumbukan fluida di sudu adalah azas impuls.

Untuk perubahan energi dengan azas reaksi, sudu turbin reaksi berfungsi seperti nosel. Hal ini berarti, pada sudu turbin reaksi terjadi proses ekspansi, yaitu penurunan tekanan fluida gas dengan dibarengi kenaikan kecepatan. Karena prinsip reaksi adalah gerakan melawan aksi, jadi dapat dipahami dengan kenaikan kecepatan fluida gas pada sudu turbin reaksi, sudu turbin pun akan bergerak sebesar nilai kecepatan tersebut dengan arah yang berlawanan.



Gambar 15.9 Fungsi nosel



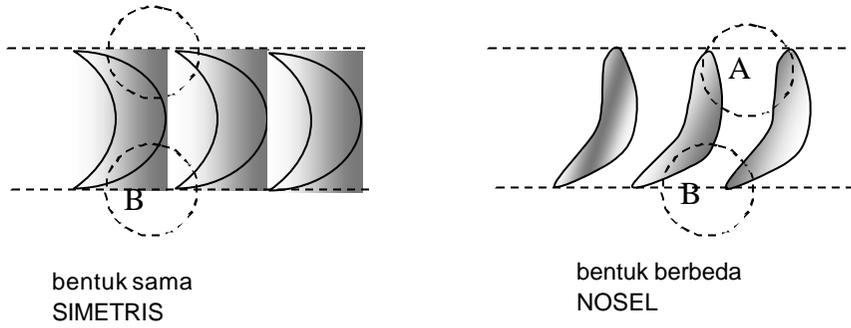
Gambar 15.10 Segitiga kecepatan sudu bergerak turbin reaksi

#### D. Turbin Impuls

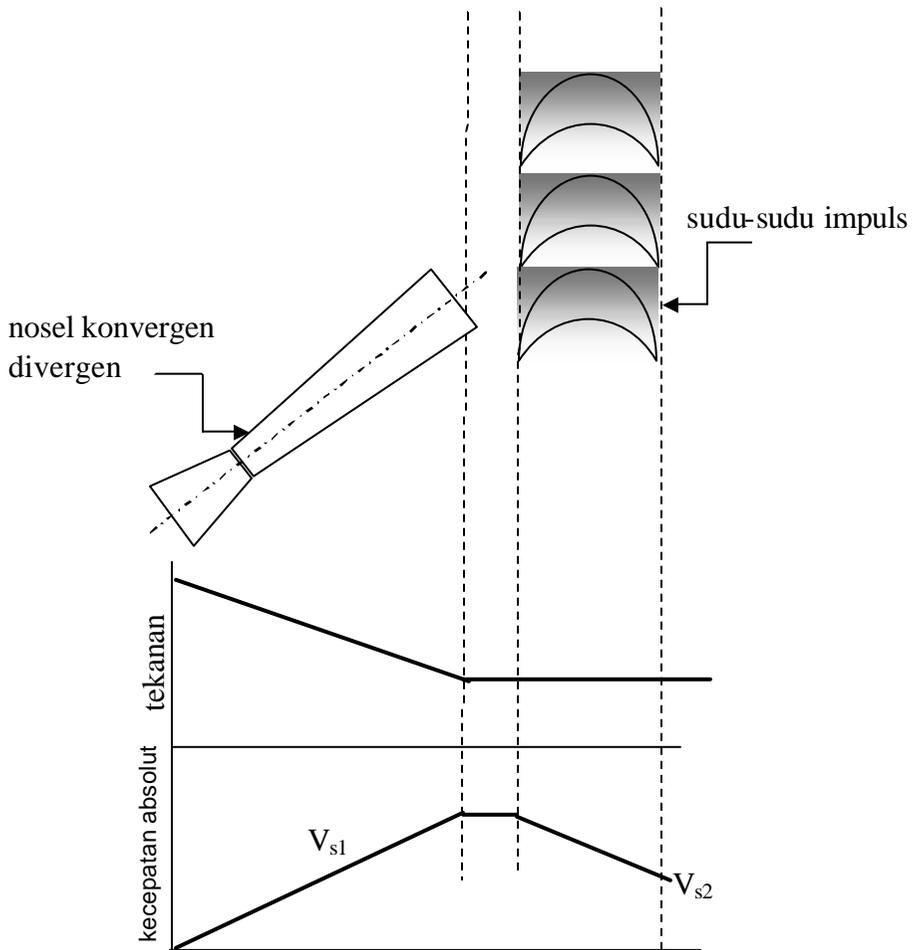
Turbin impuls adalah turbin yang mempunyai roda jalan atau rotor dimana terdapat sudu-sudu impuls. Sudu-sudu impuls mudah dikenali bentuknya, yaitu simetris dengan sudut masuk  $f$  dan sudut ke luar  $g$  yang sama ( $20^\circ$ ), pada turbin biasanya ditempatkan pada bagian masuk dimana uap bertekanan tinggi dengan volume spesifik rendah. Bentuk turbin impuls pendek dengan penampang yang konstan.

Ciri yang lain adalah secara termodinamika penurunan energi terbanyak pada nosel, dimana pada nosel terjadi proses ekspansi atau penurunan tekanan. Sudu-sudu turbin uap terdiri dari sudu tetap dan sudu gerak. Sudu tetap berfungsi sebagai nosel dengan energi kinetik yang naik, sedangkan pada sudu bergerak tekanannya konstan atau tetap. Berdasarkan karakteristik tersebut, turbin impuls sering disebut turbin tekanan sama.

Bentuk dari sudu tetap turbin impuls ada dua macam yaitu bentuk simetris dan bentuk tidak simetris. Pada bentuk sudu tetap simetris, profil kecepatan dan tekanan adalah sama, tidak ada perubahan kecepatan dan tekanan. Sedangkan pada sudu tetap yang berfungsi sebagai nosel mempunyai bentuk seperti nosel, yaitu antar penampang sudu membentuk penampang yang menyempit pada ujungnya. Karena bentuknya nosel, kecepatan akan naik dan tekanan turun. Bentuk pertama simetri dipakai pada turbin uap Curtis dan bentuk yang kedua dipakai turbin uap Rateau.



Gambar 15.11 Bentuk sudu tetap turbin impuls



Gambar 15.12 Turbin uap impuls satu tahap

## D.1 Turbin impuls satu tahap ( Turbin De Laval)

Pada gambar 15.12 di atas adalah skema turbin De laval atau turbin impuls satu tahap. Turbin terdiri dari satu atau lebih nosel konvergen divergen dan sudu-sudu impuls terpasang pada roda jalan (rotor). Tidak semua nosel terkena semburan uap panas dari nosel, hanya sebagian saja. Pengontrolan putaran dengan jalan menutup satu atau lebih nosel konvergen divergen.

Adapun cara kerjanya adalah sebagai berikut. Aliran uap panas masuk nosel konvergen divergen, di dalam nosel uap berekspansi sehingga tekanannya turun. Berbarengan dengan penurunan tekanan, kecepatan uap panas naik, hal ini berarti terjadi kenaikan energi kinetik uap panas. Setelah berekspansi, uap panas menyembur ke luar nosel dan menumbuk sudu-sudu impuls dengan kecepatan absolut  $V_{s1}$ . Pada sudu-sudu impuls uap panas memberikan sebagian energinya ke sudu-sudu, dan mengakibatkan sudu-sudu bergerak dengan kecepatan  $V_b$ . Tekanan pada sudu-sudu turbin adalah konstan atau tetap, sedangkan kecepatan uap ke luar sudu berkurang menjadi  $V_{s2}$ .

## D.2. Turbin impuls gabungan

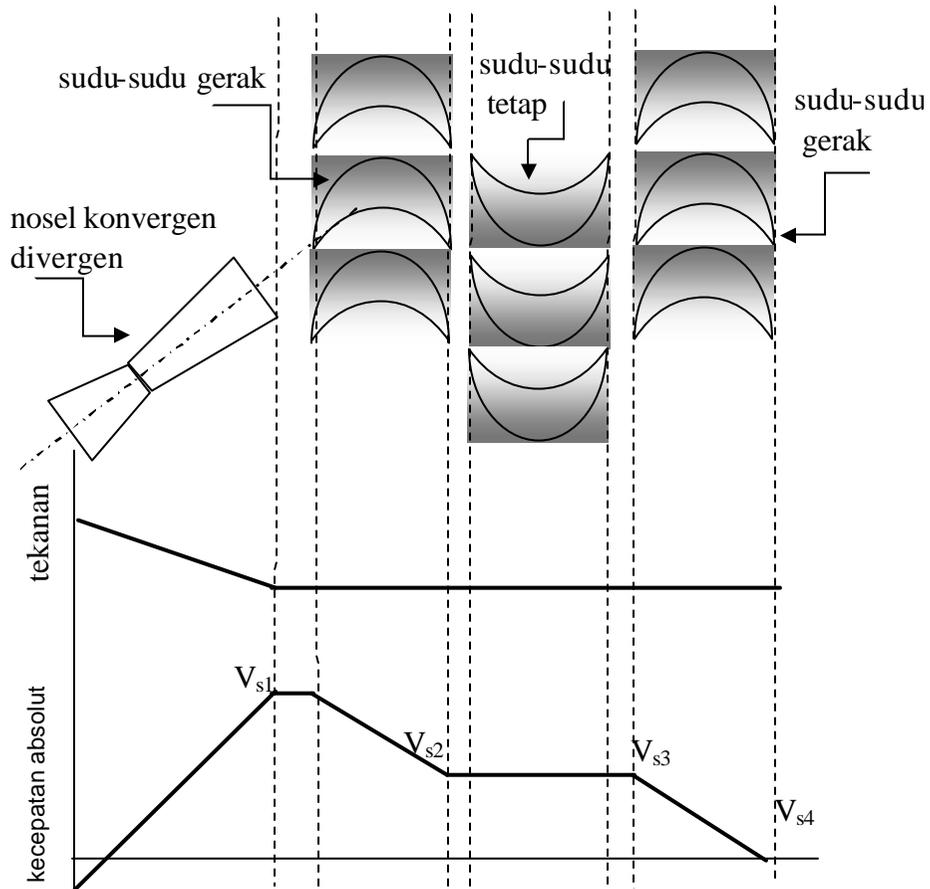
Turbin impuls satu tahap atau turbin De laval mempunyai kendala-kendala teknis yang tidak menguntungkan. Sebagai contoh, kecepatan uap masuk sudu terlalu tinggi kalau hanya untuk satu baris sudu, efeknya kecepatan putar sudu menjadi tinggi, dan melampaui batas keselamatan yang diizinkan, karena tegangan sentrifugal yang harus ditahan material rotor. Disamping itu dengan kecepatan rotor yang tinggi diperlukan roda gigi reduksi yang besar dan berat untuk menghubungkan rotor dengan generator listrik. Dengan alasan-alasan tersebut, dikembangkan dua pilihan turbin impuls gabungan yaitu turbin gabungan kecepatan atau turbin Curtiss dan turbin impuls gabungan tekanan atau turbin Rateau

### D.2.1. Turbin impuls Curtiss

Turbin uap Curtiss adalah turbin yang bekerja dengan prinsip impuls secara bertahap. Berbeda dengan turbin satu tahap, turbin Curtiss mempunyai beberapa baris sudu bergerak dan baris sudu tetap. Pada gambar 15.13 adalah susunan turbin uap Curtiss, proses ekspansi uap panas pada nosel, dimana kecepatan uap panas naik ( $V_{s1}$ ) dan tekanan turun.

Uap panas yang mempunyai kecepatan tinggi masuk baris pertama sudu bergerak, pada tahap ini uap memberikan sebagian energinya sehingga kecepatannya turun ( $V_{s2}$ ). Selanjutnya, sebelum masuk baris sudu bergerak tahap II, terlebih dahulu melewati sudu tetap. Pada sudu-sudu tetap yang berbentuk simetris, uap tidak kehilangan energinya, kecepatan ( $V_{s3}$ ) dan tekanannya konstan. Uap dengan kecepatan  $V_{s3}$  setelah melewati sudu tetap masuk baris sudu bergerak tahap II, uap

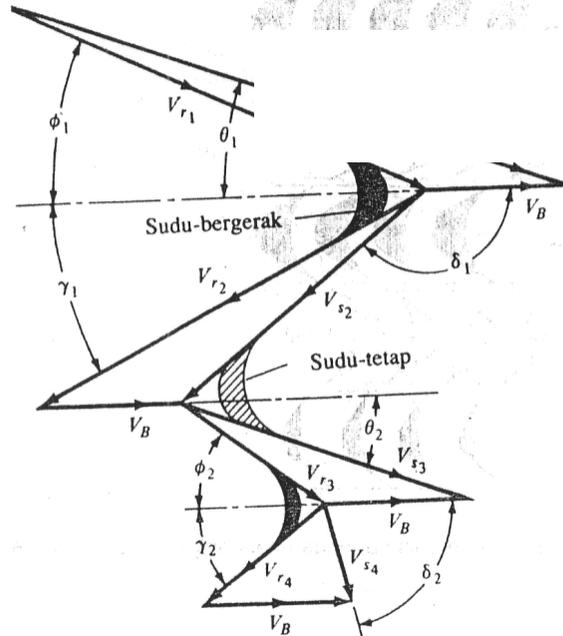
memberikan energinya yang tersisa ke sudu-sudu bergerak, karena itu kecepataannya turun kembali menjadi  $V_{s4}$ .



Gambar 15.13 Susunan turbin uap Curtiss

Pada turbin Curtiss penurunan uap terjadi dengan sempurna pada nosel sehingga tidak ada penurunan tekanan lagi pada sudu-sudu, dan energi kinetik dari nosel dipakai oleh dua baris sudu bergerak tidak hanya satu baris saja. Ciri khas dari turbin ini adalah kecepatan akan turun setelah melewati sudu bergerak, dan kecepataannya konstan pada sudu tetap. Untuk memahami lebih lanjut tentang perubahan nilai kecepatan, dapat menggunakan analisis segitiga kecepatan dari turbin Curtiss. Sebagai contoh dapat dilihat pada gambar 15.14.

$$\dot{W} = \dot{m}[(V_{s1}^2 - V_{s2}^2) - (V_{r1}^2 - V_{r2}^2)]$$



Gambar 15.14 Segitiga kecepatan turbin uap Curtiss

## D.2.2. Turbin impuls Rateau

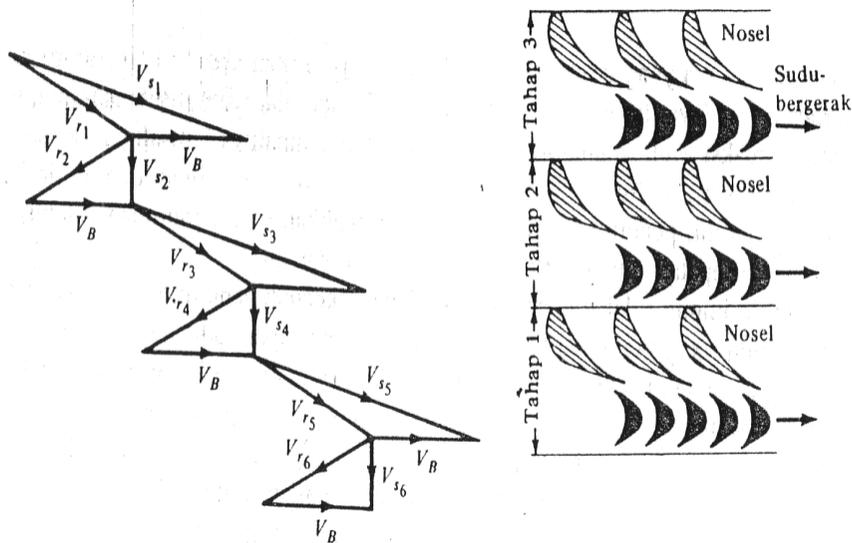
Pada turbin Curtiss yaitu turbin gabungan kecepatan yang sudah dibahas pada sub-bab di atas, masih mempunyai kelemahan yaitu kecepatan uapnya masih tinggi, sehingga timbul gesekan yang merupakan kerugian aliran. Kondisi ini sama dengan turbin impuls satu tahap. Untuk mengatasi hal tersebut, Rateau membuat turbin impuls gabungan tekanan. Pada turbin ini, turbin dibagi menjadi beberapa bagian dengan susunan seri, dimana setiap bagian terdiri dari nosel dan sudu bergerak, yaitu sama dengan susunan turbin satu tahap.

Gambar 15.15 adalah skema sederhana dari turbin Rateau. Dari gambar tersebut didapat susunan dasar turbin, yaitu terdiri dari dua bagian kombinasi nosel dan sudu bergerak. Dari diagram tekanan dan kecepatan absolut dapat dibahas sebagai berikut. Uap panas pertama masuk pada bagian pertama, kecepatan akan naik pada nosel dan kemudian turun pada sudu bergerak. Selanjutnya, uap panas masuk ke nosel bagian dua, kecepatan naik lagi pada nosel dan turun kembali pada

sudu bergerak. Pada setiap bagian, uap akan mengalami penurunan tekanan setelah dari nosel.

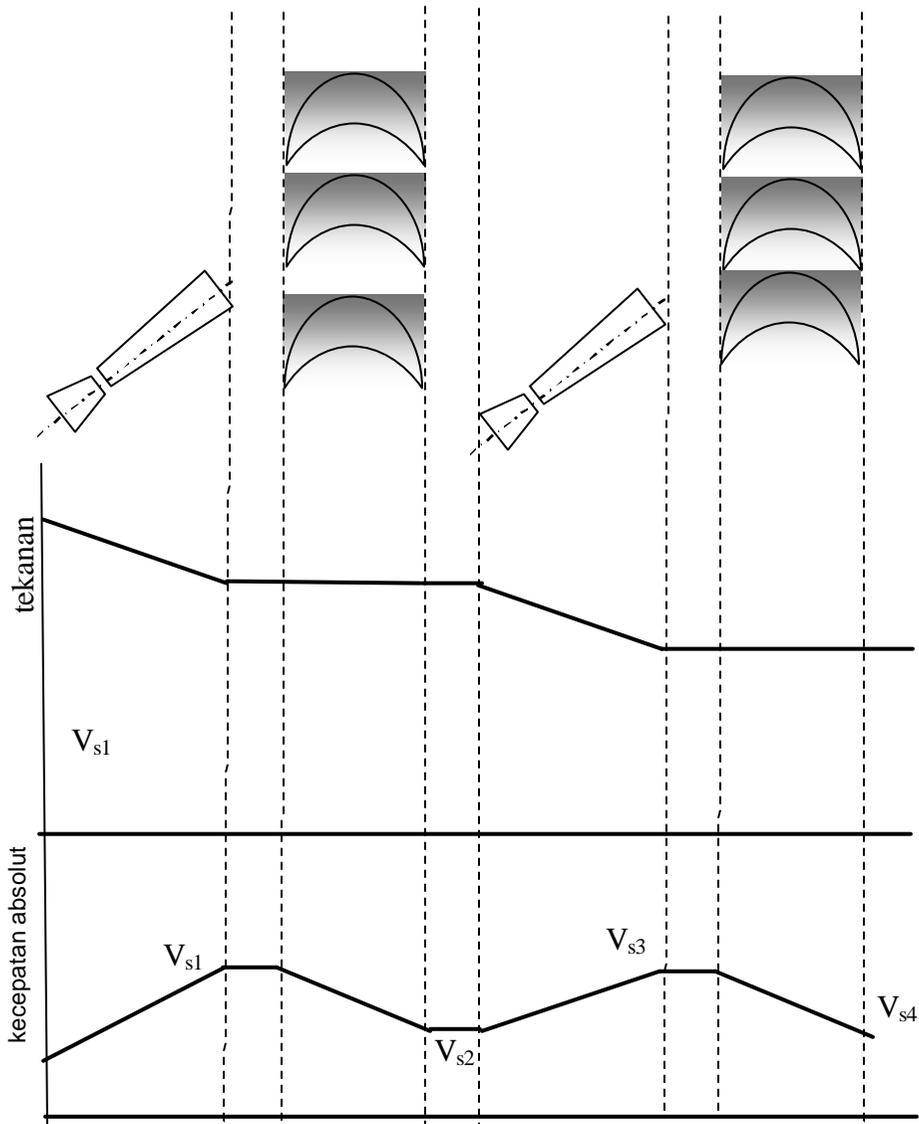
Jadi pada turbin Rateau, uap panas akan berekspansi setiap masuk nosel, dengan demikian energi uap akan terbagi merata. Jika dibandingkan dengan turbin satu tahap, pada turbin ini jumlah energi uap panas yang berekspansi per noselnya jauh lebih kecil, sehingga kenaikan kecepatan absolutnya tidak terlalu tinggi.

Turbin ini mempunyai keunggulan yaitu kecepatan sudunya rendah, kecepatan uap rendah (gesekan kecil), dan distribusi kerja per bagian merata. Kelemahannya adalah penurunan tekanan yang terus menerus pada setiap bagian, sehingga resiko kebocoran uap lebih besar. Untuk memperoleh efisiensi tinggi, turbin Rateau juga harus mempunyai tahapan yang banyak. Dengan alasan-alasan tersebut, turbin Rateau banyak dipakai untuk unit yang besar, dimana efisiensi lebih penting daripada biaya investasi.



Gambar 15.15 Segitiga kecepatan turbin uap Rateau

Pada gambar adalah contoh segitiga kecepatan dari turbin Rateau. Berdasarkan segitiga tersebut terlihat bahwa bentuk dari segitiga adalah sama untuk setiap tahap, dimana bentuknya adalah segitiga kecepatan turbin satu tahap yang disusun seri. Kecepatan  $V_{s1}$  dari sudu tetap yang berfungsi nosel, akan masuk ke sudu bergerak dan nilainya turun menjadi  $V_{s2}$ , demikian juga untuk kecepatan relatifnya juga turun. Kemudian, kecepatan  $V_{s2}$  naik lagi setelah melewati sudu bergerak menjadi  $V_{s3}$ , dimana nilai kecepatan ini secara ideal adalah sama dengan  $V_{s1}$ , dan prosesnya berlanjut sampai tahap terakhir turbin.

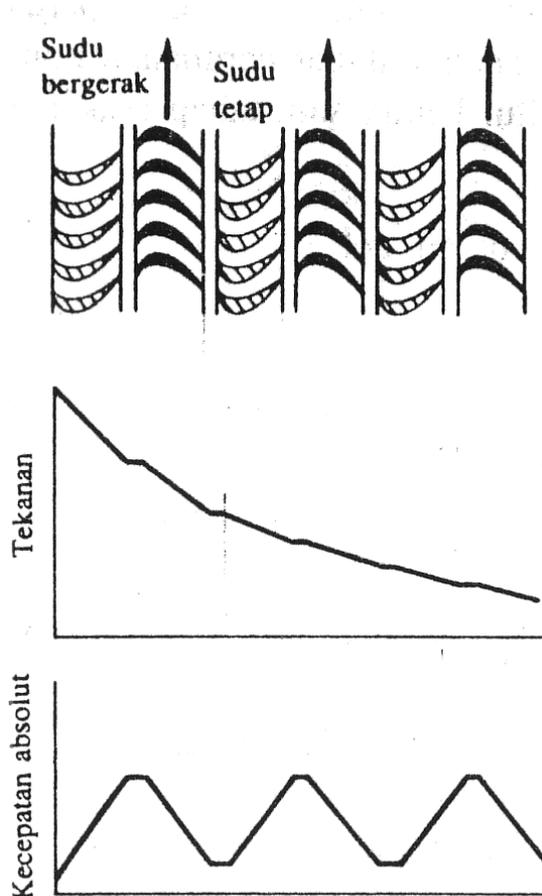


Gambar 15.16 Susunan turbin uap Rateau

### E. Turbin Reaksi

Turbin reaksi pertama kali dikenalkan oleh Parson. Gambar 15.17 adalah contoh turbin reaksi tiga tahap, terdiri dari 3 baris sudu tetap dan 3 baris sudu bergerak. Sudu tetap dibuat sedemikian rupa sehingga fungsinya sama dengan nosel. Sedangkan sudu bergerak dapat dibedakan dengan jelas dengan sudu impuls karena tidak simetris. Sudu bergerak pun difungsikan sebagai nosel, karena fungsinya yang sama

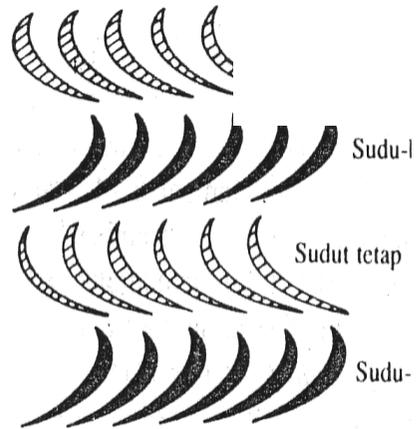
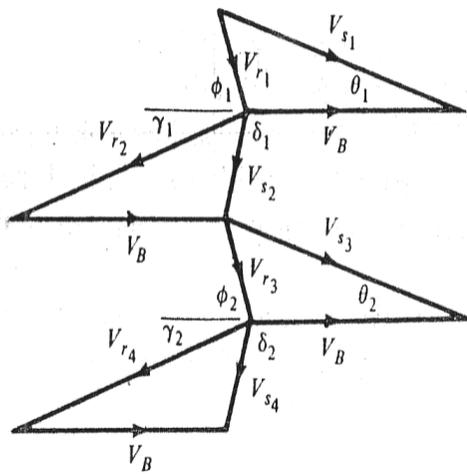
dengan sudu tetap, maka bentuknya sama dengan sudu tetap, tetapi arah lengkungannya berlawanan.



Gambar 15.17 Susunan turbin uap Rateau

Penurunan tekanan adalah sinambung dari tahap satu ke tahap berikutnya, dari sudu tetap dan sudu bergerak. Kecepatan absolutnya setiap melewati sudu tetap akan naik dan setelah melewati sudu bergerak akan turun, selanjutnya akan berulang sampai akhir tahap.

Pada gambar 15.18 adalah contoh segitiga kecepatan dari turbin rekasi dua tahap. Dari gambar segitiga kecepatan tersebut menunjukkan bentuk segitiga kecepatan untuk sudu tetap akan sama, demikian juga untuk sudu gerak. Kecepatan  $V_{s1}$  dari sudu tetap akan turun nilainya setelah melwati sudu bergerak menjadi  $V_{s2}$ , akan tetapi kecepatan relatifnya menjadi besar yaitu  $V_{r2}$ . Selanjutnya,  $V_{s2}$  dinaikan lagi nilainya setelah masuk ke sudu tetap, menjadi  $V_{s3}$  yang sama dengan  $V_{s1}$ , dan seterusnya sampai tahap akhir turbin.



Gambar 15.18 Susunan turbin uap Rateau

Daya yang dihasilkan turbin rekasi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{W} = \dot{m}[(V_{s1}^2 - V_{s2}^2) - (V_{r1}^2 - V_{r2}^2)]$$

dan daya optimum tercapai pada kecepatan sudu optimum yaitu:

$$\dot{W} = \dot{m}V_{b \text{ optimum}}^2$$

### Rangkuman

1. Definisi turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik kemudian energi kinetik tersebut diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Poros turbin dihubungkan dengan yang digerakan, yaitu generator atau peralatan mesin lainnya, menggunakan mekanisme transmisi roda gigi. Turbin adalah mesin rotari yang bekerja karena terjadi perubahan energi kinetik uap menjadi putaran poros turbin. Proses perubahan itu terjadi pada sudu-sudu turbin.
2. Pada turbin, proses perubahan energi mulai terjadi di nosel, yaitu ekspansi fluida gas pada nosel. Pada proses ekspansi di nosel, energi fluida mengalami penurunan, demikian juga tekanannya.

Berbarengan dengan penurunan energi dan tekanan, kecepatan fluida gas naik, dengan kata lain energi kinetik fluida gas naik karena proses ekspansi. Kemudian, fluida gas dengan energi kinetik tinggi menumbuk sudu turbin dan memberikan sebagian energinya ke sudu, sehingga sudu pun bergerak. Perubahan energi dengan tumbukan fluida di sudu adalah azas impuls.

3. Perubahan energi dengan azas reaksi, sudu turbin reaksi berfungsi seperti nosel. Pada sudu turbin reaksi terjadi proses ekspansi, yaitu penurunan tekanan fluida gas dengan dibarengi kenaikan kecepatan. Karena prinsip reaksi adalah gerakan melawan aksi, jadi dapat dipahami dengan kenaikan kecepatan fluida gas pada sudu turbin reaksi, sudu turbin pun akan bergerak sebesar nilai kecepatan tersebut dengan arah yang berlawanan.
4. Bentuk dari sudu tetap turbin impuls ada dua macam yaitu bentuk simetris dan bentuk tidak simetris. Pada bentuk sudu tetap simetris, profil kecepatan dan tekanan adalah sama, tidak ada perubahan kecepatan dan tekanan. Sedangkan pada sudu tetap yang berfungsi sebagai nosel mempunyai bentuk seperti nosel yaitu antar penampang sudu membetuk penampang yang menyempit pada ujungnya. Bentuk pertama simetrisi dipakai pada turbin uap Curtis dan bentuk yang kedua dipakai turbin uap Rateau.
5. Turbin De laval atau turbin impuls satu tahap. Turbin terdiri satu atau lebih nosel konvergen divergen dan sudu-sudu impuls terpasang pada roda jalan (rotor). Tidak semua nosel terkena semburan uap panas dari nosel, hanya sebagian saja. Pengontrolan putaran dengan jalan menutup satu atau lebih nosel konvergen divergen.
6. Pada Turbin reaksi sudu tetap dibuat sedemikian rupa sehingga fungsinya sama dengan nosel. Sedangkan sudu bergerak dapat dibedakan dengan jelas dengan sudu impuls karena tidak simetris. Sudu bergerak pun difungsikan sebagai nosel, karena fungsinya yang sama dengan sudu tetap, maka bentuknya sama dengan sudu tetap, tetapi arah lengkungannya berlawanan.

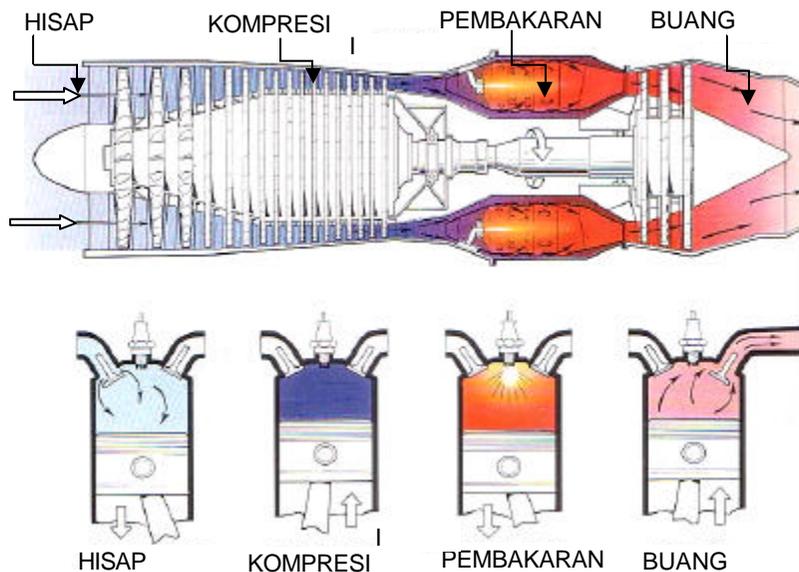
Soal :

1. Jelaskan prinsip dari kerja turbin dan bagaimana urutan konversi energinya.
2. Sebutkan macam-macam turbin yang anda ketahui selain turbin uap !
3. Jelaskan keraj turbin impuls dan reaksi !
4. Apa perbedaan antara turbin De laval, Curtis dan Rateau. ?

## BAB 16 TURBIN GAS

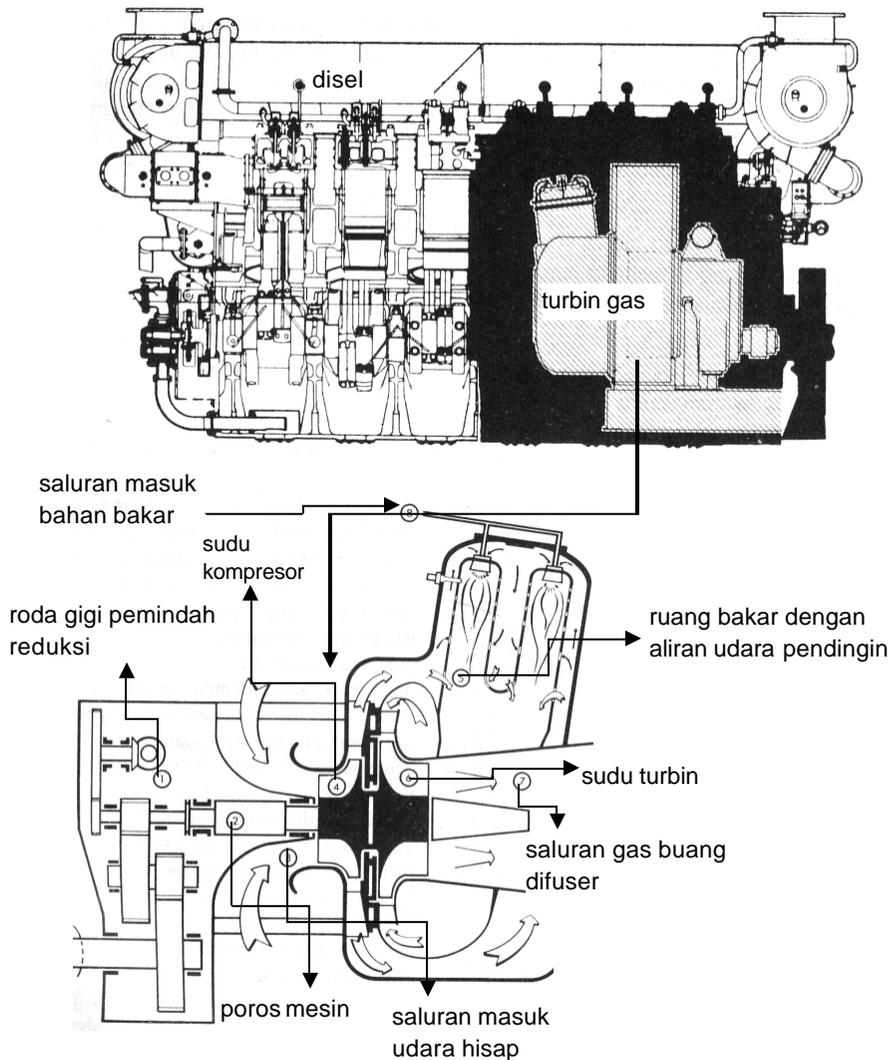
Turbin gas adalah sebuah mesin panas pembakaran dalam, proses kerjanya seperti motor bakar [gambar 16.1] yaitu udara atmosfer dihisap masuk kompresor dan dikompresi, kemudian udara mampat masuk ruang bakar dan dipakai untuk proses pembakaran, sehingga diperoleh suatu energi panas yang besar. Energi panas tersebut diekspansikan pada turbin dan menghasilkan energi mekanik pada poros. Sisa gas pembakaran yang ke luar turbin menjadi energi dorong (turbin gas pesawat terbang). Jadi jelas bahwa turbin gas adalah mesin yang dapat mengubah energi panas menjadi energi mekanik atau dorong.

Persamaan turbin gas dengan motor bakar adalah pada proses pembakarannya yang terjadi di dalam mesin itu sendiri. Disamping itu proses kerjanya adalah sama yaitu: hisap, kompresi, pembakaran, ekspansi dan buang. Perbedaannya adalah terletak pada konstruksinya. Motor bakar kebanyakan bekerja gerak bolak-balik (*reciprocating*) sedangkan turbin gas adalah mesin rotasi, proses kerja motor bakar bertahap (*intermiten*), untuk turbin gas adalah kontinu dan gas buang pada motor bakar tidak pernah dipakai untuk gaya dorong.



Gambar 16.1 Mesin pembakaran dalam (turbin gas dan motor bakar)

Turbin gas bekerja secara kontinyu tidak bertahap, semua proses yaitu hisap, kompresi, pembakaran dan buang adalah berlangsung bersamaan. Pada motor bakar yang prosesnya bertahap yaitu yang dinamakan langkah, yaitu langkah hisap, kompresi, pembakaran, ekspansi dan langkah buang. Antara langkah satu dan lainnya saling bergantung dan bekerja bergantian. Pada proses ekspansi turbin gas, terjadi perubahan energi dari energi panas mejadi energi mekanik putaran poros turbin, sedangkan pada motor bakar pada langkah ekspansi terjadi perubahan dari energi panas menjadi energi mekanik gerak bolak-balik torak. Dengan kondisi tersebut, turbin gas bekerja lebih halus dan tidak banyak getaran.



Gambar 16.2 Perbandingan turbin gas dan mesin disel

Turbin gas banyak digunakan untuk mesin propulsi atau jet [gambar 16.1], mesin otomotif, tenaga pembangkit listrik [gambar 16.2], atau penggerak peralatan-peralatan industri seperti penggerak kompresor atau pompa. Daya yang dihasilkan turbin gas mulai dari 250.000 HP untuk pembangkit listrik sampai 5 HP pada *turbocharger* pada mesin motor.

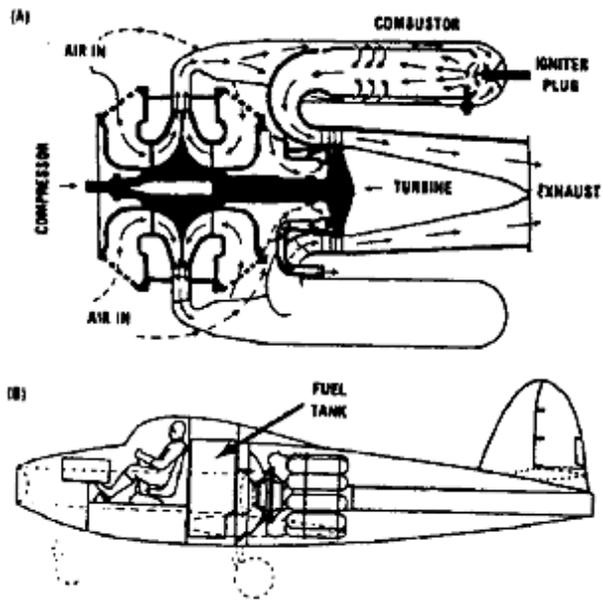
Keunggulan dari turbin gas adalah mesinnya yang ringan dan ukuran yang kecil namun dapat menghasilkan daya yang besar. Sebagai contoh pada gambar 16.2 adalah turbin gas yang biasa dipakai untuk penggerak generator listrik kecil. Generator ini banyak dipakai untuk mengantisipasi beban puncak jaringan, sehingga fungsinya dapat menggantikan kalau terjadi pemadaman listrik. Gedung-gedung perkantoran, rumah sakit, universitas, perusahaan dan lainnya, banyak yang menggunakan generator jenis ini. Dibandingkan dengan penggunaan generator penggerak disel, dengan penggerak turbin gas ukurannya menjadi lebih kecil, sehingga dapat menghemat tempat dan mudah dipindahkan.

Pesawat terbang memerlukan mesin dengan persyaratan yang spesifik yaitu mesin dengan daya besar untuk daya dorong, tetapi ringan dan dari segi ukuran harus kecil. Dengan alasan tersebut, penggunaan turbin gas pada pesawat terbang menjadi pilihan yang tepat, dan tidak dapat digantikan jenis mesin lain. Pada industri dan pembangkitan listrik turbin gas sangat menguntungkan karena mesin mudah diinstal, operasinya tidak ruwet, dan tidak memerlukan ruangan yang besar.

## **A. Sejarah Perkembangan**

Pengembangan turbin gas sebagai salah satu mesin penggerak sudah menghabiskan waktu yang lama sekali. Dimulai abad ke-19 Charles Curtis mengajukan paten untuk turbin gas yaitu pada tanggal 24 Juni 1885. Kemudian pada tahun 1903 Aegedius Elling berhasil membuat mesin turbin gas dengan daya 11 HP. Pada tahun 1939 perusahaan Swiss, Brown Boveri Company berhasil membuat turbin gas untuk pembangkit tenaga dengan daya 4.000 kW. Untuk industri pesawat terbang mulai dikembangkan pada tahun 1930-an. Hans von Ohain (Jerman) berhasil menjalankan turbin gasnya pada bulan maret 1937. Frank Whittles pada april 1937 juga berhasil menjalankan mesin turbin gasnya.

Pesawat terbang pertama yang terbang dengan mesin turbin gas adalah mesin jet Jerman pada 27 agustus 1939, sedangkan Inggris tahun 1941. Penggunaan turbin gas untuk lokomotif pertama kali tahun 1941 di Swiss, dan untuk mesin mobil tahun 1950 di Inggris. Pengembangan terus dilanjutkan sampai ke era modern, mesin-mesin jet tempur canggih sudah berhasil diciptakan. Efisiensi juga terus diperbaiki sehingga turbin gas masa kini menjadi salah satu pilihan utama sebagai mesin penggerak.



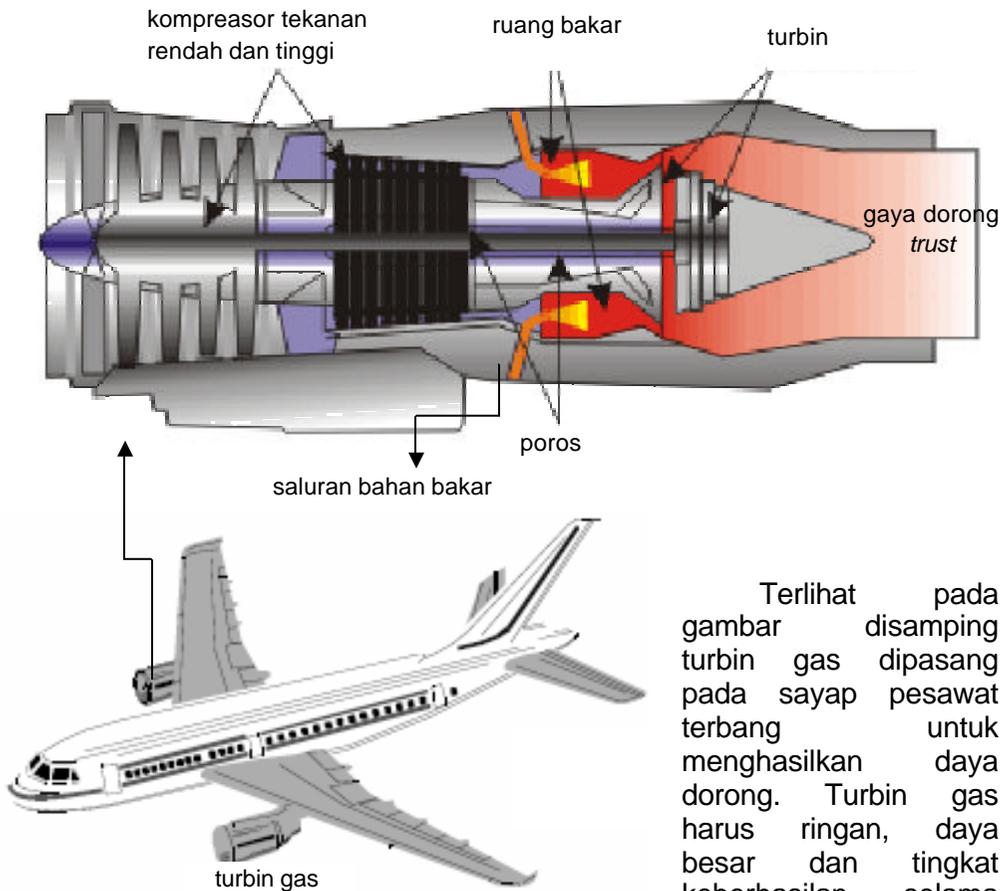
Gambar 16.3 Pesawat terbang pendahulu dengan turbin gas



Gambar 16.4 Perkembangan turbin gas menjadi mesin modern

## B. Dasar Kerja Turbin Gas

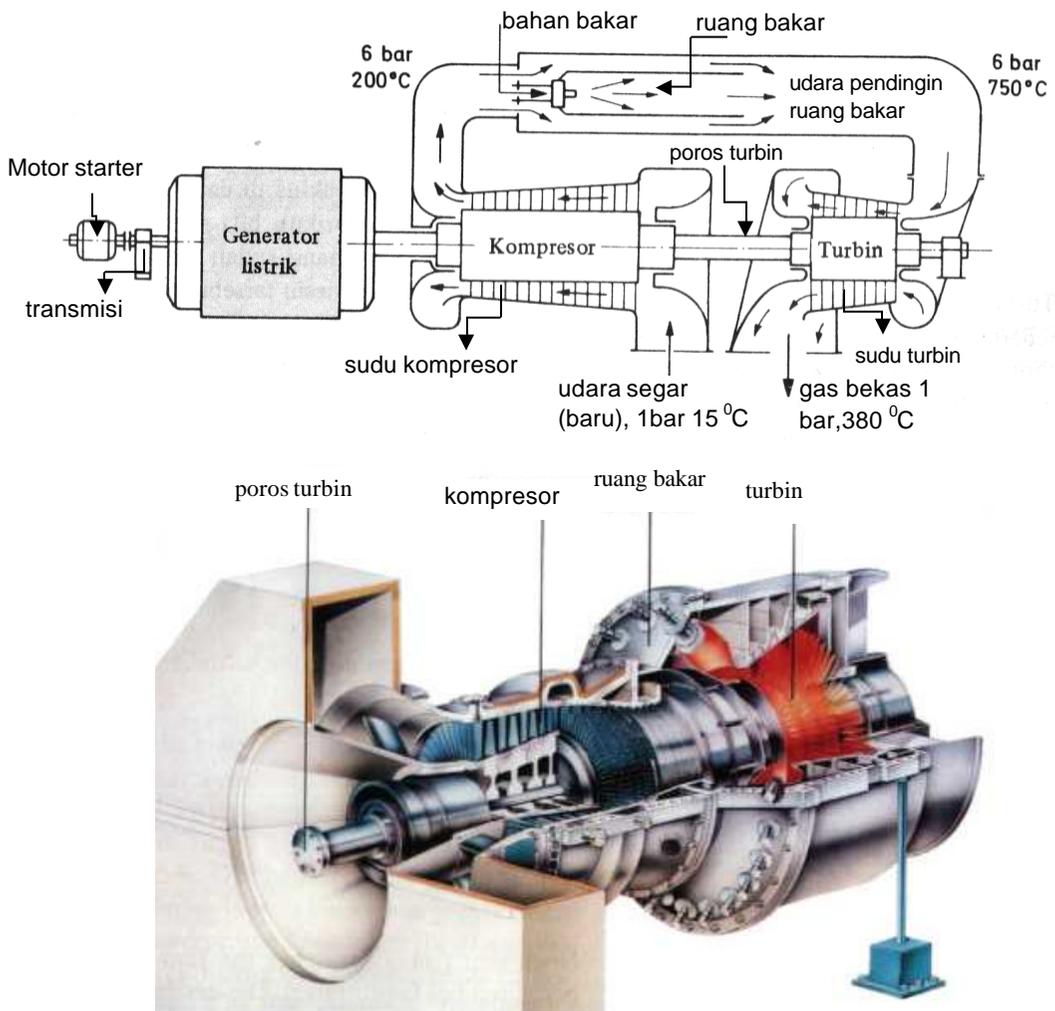
Pada gambar 16.5 adalah salah satu mesin turbin gas pesawat terbang, adapun cara kerjanya adalah sebagai berikut. Motor starter dinyalakan, kompresor berputar dan mulai bekerja menghisap udara sekitar, udara kemudian dimampatkan. Udara pada tahap pertama dimampatkan dahulu pada kompresor tekanan rendah, diteruskan kompresor tekanan tinggi. Udara mampat selanjutnya masuk ruang bakar, bercampur dengan bahan bakar yang sudah disemprotkan. Campuran bahan bakar-udara mampat kemudian dinyalakan dan terjadi proses pembakaran. Gas hasil proses pembakaran berekspansi pada turbin, terjadi perubahan dari energi panas menjadi energi putaran poros turbin, sebagian gas pembakaran menjadi gaya dorong. Setelah memberikan sisa gaya dorongnya, gas hasil pembakaran ke luar melalui saluran buang. Dari proses kerja turbin gas pesawat terbang tersebut, dihasilkan daya turbin yang digunakan untuk menggerakkan kompresor, menghasilkan daya dorong, dan menggerakkan peralatan bantu lainnya.



Terlihat pada gambar disamping turbin gas dipasang pada sayap pesawat terbang untuk menghasilkan daya dorong. Turbin gas harus ringan, daya besar dan tingkat keberhasilan selama beroperasi harus 100%.

Gambar 16.5 Turbin gas pesawat terbang

Turbin gas yang dipakai industri dapat dilihat pada gambar 15.6 dan cara kerjanya sama dengan turbin gas pesawat terbang. Motor starter dinyalakan untuk memutar kompresor, udara segar terhisap masuk dan dimampatkan. Kemudian udara mampat dengan temperatur dan tekanan yang cukup tinggi ( $200^{\circ}\text{C}$ , 6 bar) mengalir masuk ruang bakar bercampur dengan bahan bakar. Campuran udara mampat bahan-bakar kemudian dinyalakan dan terjadi proses pembakaran, temperatur gas pembakaran naik drastis. Gas pembakaran dengan temperatur tinggi (6 bar,  $750^{\circ}\text{C}$ ) berekspansi pada turbin, sehingga terjadi perubahan energi, dari energi panas menjadi energi putaran poros turbin. Gas pembakaran setelah berekspansi di turbin, lalu ke luar sebagai gas bekas. Selanjutnya, turbin gas bekerja dengan putaran poros turbin, yaitu sebagai sumber tenaga penggerak kompresor dan generator listrik.



Gambar 16.6 Turbin gas untuk industri (pembangkit listrik)

Dari uraian cara kerja turbin gas di atas, dapat disebutkan komponen-komponen mesin turbin gas yang penting, yaitu kompresor, ruang bakar, dan turbin. Jadi, daya yang dihasilkan turbin tidak hanya menggerakkan beban, yaitu generator listrik, tetapi juga harus menggerakkan kompresor.

### **B.1. Bahan bakar turbin gas**

Bahan bakar untuk turbin gas harus memenuhi persyaratan tertentu sebelum digunakan pada proses pembakaran. Persyaratan tersebut yaitu bahan bakar mempunyai kadar abu yang tidak tinggi. Dengan alasan, bahan bakar yang mempunyai kadar abu yang tinggi, pada proses pembakaran dihasilkan gas pembakaran yang mengandung banyak partikel abu yang keras dan korosif. Gas pembakaran dengan karakteristik tersebut, akan mengenai dan merusak sudu-sudu turbin pada waktu proses ekspansi pada temperatur tinggi.

Dengan persyaratan tersebut di atas, bahan bakar yang memenuhi persyaratan adalah bahan bakar cair dan gas. Bahan bakar cair dan gas cenderung mempunyai kadar abu yang rendah jika dibandingkan dengan bahan bakar padat, sehingga lebih aman digunakan sebagai bahan bakar turbin gas.

Bahan bakar yang digunakan turbin gas pesawat terbang, persyaratan yang harus dipenuhi adalah lebih ketat, hal ini karena menyangkut faktor keamanan dan keberhasilan selama turbin gas beroperasi. Adapun persyaratannya adalah :

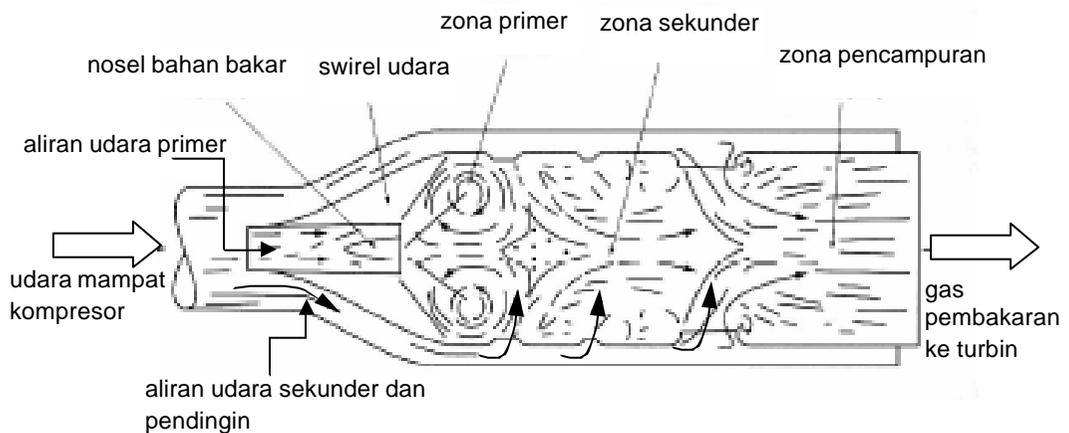
1. Nilai kalor per satuan berat dari bahan bakar harus tinggi. Dengan jumlah bahan bakar yang sedikit dan ringan dengan tetapi nilai kalornya tinggi sangat menguntungkan karena mengurangi berat pesawat terbang secara keseluruhan.
2. Kemampuan menguap (*volatility*) dari bahan bakar tidak terlalu tinggi, oleh karena pada harga *volatility* yang tinggi bahan bakar akan mudah sekali menguap, terutama pada ketinggian tertentu. Hal ini akan membahayakan karena bahan bakar menjadi mudah terbakar. Disamping itu, saluran bahan bakar mudah tersumbat karena uap bahan bakar.
3. Kemurnian dan kestabilan bahan bakar harus terjamin, yaitu bahan bakar tidak mudah mengendap, tidak banyak mengandung zat-zat seperti air, debu, dan belerang. Kandungan zat-zat tersebut apabila terlalu banyak akan sangat membahayakan pada proses pembakaran. Khusus untuk belerang, zat ini akan korosif sekali pada material sudu turbin.
4. Flash point dan titik nyala tidak terlalu rendah, sehingga penyimpanan lebih aman.
5. Gradenya harus tinggi, bahan bakar harus mempunyai kualitas yang bagus, tidak banyak mengandung unsur-unsur yang merugikan seperti *dyes* dan *tetraethyl lead*

Dengan karakteristik bahan bakar untuk turbin gas pesawat terbang seperti yang disebutkan di atas, terlihat bahwa bahan bakar tersebut adalah bermutu tinggi, untuk menjamin faktor keamanan yang tinggi pada operasi turbin gas selama penerbangan. Kegagalan operasi berakibat sangat fatal yaitu turbin gas mati, pesawat terbang kehilangan gaya dorong, kondisi ini dapat dipastikan pesawat terbang akan jatuh.

Bahan bakar pesawat yang biasa digunakan adalah dari jenis gasolin dan kerosen atau campuran keduanya, tentunya sudah dimurnikan dari unsur-unsur yang merugikan. Sebagai contoh, standar yang dikeluarkan *American Society for Tinting Material Spesification* (ASTM) seri D-1655, yaitu Jet A, Jet A1, Jet B. Notasi A, A, dan B membedakan titik bekunya.

## B.2. Proses pembakaran

Pada gambar 16.7, dapat dilihat dari konstruksi komponen ruang bakar, apabila digambarkan ulang dengan proses pembakaran adalah sebagai berikut:



Gambar 16.7 Ruang bakar dan proses pembakaran turbin gas

Proses pembakaran dari turbin gas adalah mirip dengan pembakaran mesin diesel, yaitu proses pembakarannya pada tekanan konstan. Prosesnya adalah sebagai berikut, udara mampat dari kompresor masuk ruang bakar, udara terbagi menjadi dua, yaitu udara primer yang masuk saluran primer, berada satu tempat dengan nosel, dan udara mampat sekunder yang lewat selubung luar ruang bakar. Udara primer masuk ruang bakar melewati swirler, sehingga alirannya berputar. Bahan bakar kemudian disemprotkan dari nosel ke zona primer, setelah keduanya bertemu, terjadi pencampuran. Aliran udara primer yang berputar akan membantu proses pencampuran, hal ini menyebabkan campuran lebih homogen, pembakaran lebih sempurna.

Udara sekunder yang masuk melalui lubang-lubang pada selubung luar ruang bakar akan membantu proses pembakaran pada zona sekunder. Jadi, zona sekunder akan menyempurnakan pembakaran dari zona primer. Disamping untuk membantu proses pembakaran pada zona sekunder, udara sekunder juga membantu pendinginan ruang bakar. Ruang bakar harus didinginkan, karena dari proses pembakaran dihasilkan temperatur yang tinggi yang merusak material ruang bakar. Maka, dengan cara pendinginan udara sekunder, temperatur ruang bakar menjadi terkontrol dan tidak melebihi dari yang diijinkan.

Pada gambar 16.7 di atas, terlihat zona terakhir adalah zona pencampuran (*dillute zone*), adalah zona pencampuran gas pembakaran bertemperatur tinggi dengan sebagian udara sekunder. Fungsi udara pada sekunder pada zona itu adalah mendinginkan gas pembakaran yang bertemperatur tinggi menjadi temperatur yang aman apabila mengenai sudu-sudu turbin ketika gas pembakaran berekspansi. Disamping itu, udara sekunder juga akan menambah massa dari gas pembakaran sebelum masuk turbin, dengan massa yang lebih besar energi potensial gas pembakaran juga bertambah. Apabila  $W_{kinetik}$  adalah energi kinetik gas pembakaran dengan kecepatan  $V$ , massa sebelum ditambah udara sekunder adalah  $m_1$ , maka energi kinetiknya adalah sebagai berikut:

$$W_{kinetik,1} = \frac{m_1 \cdot V^2}{2}$$

dengan penambahan massa dari udara sekunder  $m_2$ , maka energi kinetik menjadi:

$$W_{kinetik,2} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot V^2}{2}$$

jadi dapat dilihat  $W_{kinetik,2}$  ( dengan udara sekunder) lebih besar dari  $W_{kinetik,1}$  ( tanpa udara sekunder).

Dari uraian di atas, terlihat proses pembakaran pada turbin gas memerlukan udara yang berlebih, biasanya sampai 30% dari kondisi normal untuk proses pembakaran dengan jumlah bahan bakar tertentu. Kondisi ini akan berkebalikan, apabila udara pembakaran terlalu berlimpah (lebih 30%), udara justru akan mendinginkan proses pembakaran dan mati, karena panas banyak terbuang ke luar melalui gas bekas yang bercampur udara dingin sekunder. Dengan pemikiran yang sama, apabila jumlah udara kurang dari normal, yaitu terjadi *overheating*, material ruang bakar dan sudu-sudu turbin bekerja melampaui kekuatannya dan ruang bakar dapat pecah, hal ini berarti turbin gas berhenti bekerja atau proses pembakaran terhenti.

## Rangkuman

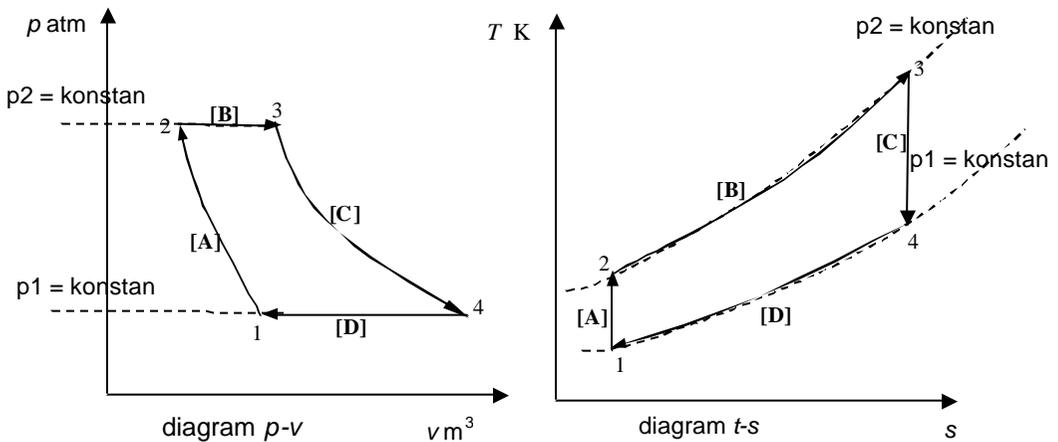
1. Turbin gas adalah sebuah mesin panas pembakaran dalam, proses kerjanya seperti motor yaitu udara atmosfer dihisap masuk kompresor dan dikompresi, kemudian udara mampat masuk ruang bakar dan dipakai untuk proses pembakaran, sehingga diperoleh suatu energi panas yang besar, energi panas tersebut diekspansikan pada turbin dan menghasilkan energi mekanik pada poros, sisa gas pembakaran yang keluar turbin menjadi energi dorong (turbin gas pesawat terbang)
2. Persamaan turbin gas dengan motor bakar adalah pada proses pembakarannya yang terjadi di dalam mesin itu sendiri, disamping itu proses kerjanya adalah sama yaitu hisap, kompresi, pembakaran, ekspansi dan buang.
3. Turbin gas banyak digunakan untuk mesin propulsi atau jet, mesin otomotif, tenaga pembangkit listrik atau penggerak peralatan-peralatan industri seperti penggerak kompresor atau pompa. Daya yang dihasilkan turbin gas mulai dari 250000 HP untuk pembangkit listrik sampai 5 HP pada *turbocharger* pada mesin motor
4. Persyaratan bahan-bakar untuk turbin gas :
  - a. Nilai kalor persatuan berat dari bahan bakar harus tinggi, dengan alasan, dengan jumlah bahan bakar yang sedikit dan ringan dengan nilai kalor yang tinggi adalah akan sangat menguntungkan, karena mengurangi berat pesawat terbang secara keseluruhan
  - b. Kemampuan menguap (volatility) dari bahan bakar tidak terlalu tinggi, oleh karena pada harga volatility yang tinggi bahan bakar akan mudah sekali menguap, terutama pada ketinggian tertentu, hal ini akan membahayakan, karena bahan bakar menjadi mudah terbakar Disamping itu, saluran bahan bakar mudah tersumbat karena uap bahan bakar.
5. Bahan bakar pesawat yang biasa digunakan adalah dari jenis gasolin dan kerosen atau campuran keduanya, tentunya sudah dimurnikan dari unsur-unsur yang merugikan. Sebagai contoh, standar yang dikeluarkan *American Society for Tinting Material Spesification* (ASTM) seri D-1655, yaitu Jet A, Jet A1, Jet B. Notasi A, A, dan B membedakan titik bekunya.

Soal :

1. Jelaskan prinsip kerja dari turbin gas dan sebutkan komponen-komponen dari turbin gas ! Kemudian jelaskan fungsi dari masing-masing komponen !
2. Jelaskan persamaan dan perbedaan antara motor bakar dan turbin gas
3. Jelaskan keuntungan dari pemakaian turbin gas sebagai penggerak pesawat terbang, dan kenapa motor bakar untuk saat ini tidak dipakai sebagai penggerak turbin gas.
4. Apa saja persyaratan yang harus ada pada bahan-akar untuk turbin gas?

## BAB 17 SIKLUS TERMODINAMIKA

Turbin gas merupakan suatu mesin yang bekerja mengikuti siklus termodinamik Brayton. Adapun siklus termodinamikanya pada diagram  $p-v$  dan  $t-s$  adalah sebagai berikut [gambar 17.1]:



Gambar 17.1 Diagram  $p-v$  dan  $T-s$

Urutan proses kerja sistem turbin gas [gambar 17.2] adalah :

- 1-2** Proses kompresi adiabatik udara pada kompresor, tekanan udara naik **[A]**
- 2-3** Proses pembakaran campuran udara dan bahan-bakar pada tekanan konstan, dihasilkan panas pada ruang bakar **[B]**
- 3-4** Proses ekspansi adiabatik gas pembakaran pada turbin dihasilkan kerja turbin berupa putaran poros dan gaya dorong, tekanan turun **[C]**
- 4-1** Proses pembuangan kalor pada tekanan konstan **[D]**

Dari diagram  $T-S$  dapat dilihat setelah proses kompresi pada kompresor temperatur naik yaitu  $T_2$  dari temperatur atmosfer  $T_1$  dan tekanan naik dari  $p_1$  menjadi  $p_2$ , temperatur dan tekanan ini diperlukan untuk proses pembakaran. Setelah bahan bakar disemprotkan dan bercampur dengan udara mampat di dalam ruang bakar dan dinyalakan, terjadi proses pembakaran, temperatur naik lagi sampai  $T_3$ . Temperatur  $T_3$  adalah temperatur gas pembakaran yang akan masuk turbin,

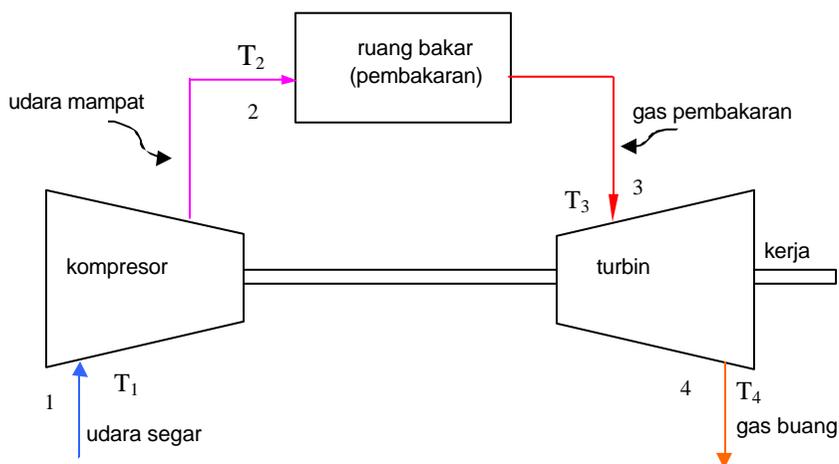
temperatur ini dibatasi oleh ketahanan material turbin pada suhu tinggi. Setelah proses ekspansi pada turbin, temperatur gas sisa menjadi turun sampai  $T_4$  dan temperatur gas sisa ini masih tinggi di atas temperatur  $T_1$ .

### A. Klasifikasi Turbin Gas

Ada banyak tipe turbin gas, tetapi dengan prinsip kerja yang sama, yaitu mengikuti siklus Bryton. Siklus tersebut adalah siklus dasar yang menjadi patokan dalam perancangan turbin gas. Secara teoritis kelihatan tidak ada kesulitan, tetapi pada kenyataannya, pembuatan turbin gas menemui banyak kesukaran, terutama yang berhubungan dengan efisiensi pemakaian bahan bakar dan ketersediaan material yang bekerja pada temperatur tinggi. Dengan berbagai alasan dan tujuan, banyak tipe turbin gas yang dikembangkan. Adapun beberapa alasan tersebut adalah

1. Pemakaian bahan bakar harus lebih bervariasi tidak hanya untuk bahan bakar cair dan gas saja atau untuk mencegah singgungan fluida kerja dengan lingkungan, khususnya untuk bahan bakar nuklir. Untuk keperluan tersebut, dibuat turbin gas terbuka dan tertutup atau turbin gas langsung dan tidak langsung
2. Pemakaian turbin gas yang semakin meluas, disamping sebagai pembangkit daya dorong dan pembangkit listrik, turbin gas sekarang banyak digunakan untuk penggerak mula, contohnya penggerak pompa dan kompresor pada industri-industri atau pusat pembangkit tenaga (*power plant*). Untuk keperluan tersebut, dibuat turbin gas dengan model satu poros dan dua poros

#### A.1 Turbin gas sistem terbuka ( langsung dan tidak langsung)



Gambar 17.2 Bagan kerja turbin gas sistem terbuka langsung

Pada sistem turbin gas terbuka langsung [gambar 17.2], fluida kerja akan ke luar masuk sistem yaitu udara lingkungan masuk kompresor dan gas bekas ke luar turbin ke lingkungan. Ruang bakar menjadi satu dengan sistem turbin gas dan bahan bakar yang digunakan terbatas yaitu hanya bahan bakar cair dan gas. Bahan bakar tersebut sebelum digunakan sudah dimurnikan, sehingga tidak mengandung unsur-unsur yang merugikan.

Permasalahan turbin gas sistem terbuka terfokus pada proses pendinginan ruang bakar dan sudu-sudu turbin. Disamping itu, karena gas pembakaran langsung bersinggungan dengan material turbin, permasalahan korosi dan abarasi pada sudu turbin, menjadi sangat penting, jika hal ini diabaikan akan berakibat fatal dan sangat merugikan, yaitu sudu-sudu turbin dapat bengkok atau patah. Kalau hal tersebut terjadi, daya turbin menurun, dan secara keseluruhan efisien kerja menjadi rendah.

Turbin gas sistem terbuka banyak dipakai untuk mesin pesawat terbang, karena bentuknya lebih simpel, ringan dan tidak banyak memakan tempat, hal ini cocok dengan persyaratan turbin gas untuk pesawat terbang.

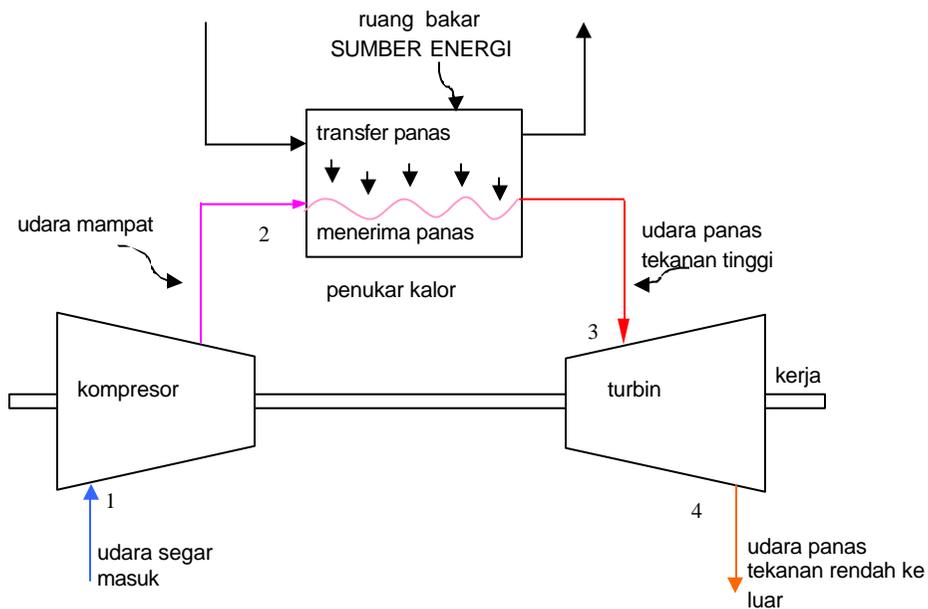
Bahan bakar padat tidak disarankan untuk digunakan pada sistem turbin gas terbuka langsung, karena hasil pembakaran banyak mengandung partikel yang bersifat korosi terhadap material turbin, yang dapat merusak sudu turbin. Kendala tersebut dapat diatasi dengan memisahkan ruang bakar dengan saluran fluida kerja, dengan kata lain, fluida kerja masuk turbin dikondisikan tidak mengandung gas hasil pembakaran. Untuk keperluan tersebut, dibuat turbin gas sistem terbuka tak langsung. Dengan sistem ini, proses pembakaran berlangsung sendiri di dalam ruang bakar yang terpisah dengan saluran fluida kerja yang akan masuk turbin. Energi panas dari proses pembakaran akan ditransfer ke fluida kerja secara langsung atau menggunakan alat penukar kalor.

Model transfer energi panas dari ruang bakar ke fluida kerja secara langsung adalah sebagai berikut. Pipa-pipa yang berisi fluida kerja udara mampat dari kompresor dilewatkan ke ruang bakar atau dapur. Panas dari proses pembakaran ditransfer secara langsung ke fluida kerja di dalam pipa-pipa, temperatur fluida akan naik sampai nilai tertentu sebelum masuk turbin.

Untuk model transfer panas dengan penukar kalor, banyak diaplikasikan pada turbin gas berbahan bakar nuklir. Ruang bakar berbahan bakar nuklir sering disebut dengan reaktor. Di dalam reaktor nuklir terjadi reaksi fusi yang menghasilkan panas yang tinggi, panas yang tinggi tersebut ditransfer ke fluida yang sekaligus berfungsi sebagai pendingin reaktor, fluida tersebut sering diistilahkan sebagai fluida primer. Kemudian, fluida primer bersuhu tinggi dialirkan ke alat penukar kalor. Di dalam alat penukar kalor terdapat pipa-pipa berisi fluida kerja bersuhu

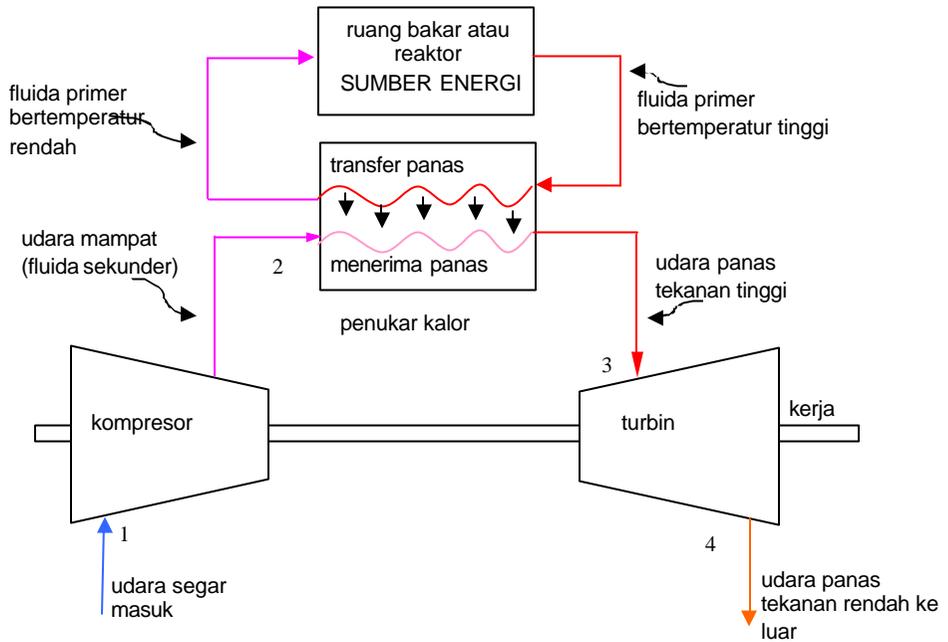
rendah, untuk fluida ini sering disebut sebagai fluida sekunder. Dengan kondisi tersebut, terjadi tranfer panas dari fluida primer bersuhu tinggi ke fluida sekunder bersuhu rendah.

Pada gambar 17.3, adalah contoh skema untuk turbin gas sistem terbuka. Dapat dilihat fluida kerja yang dipakai adalah udara. Udara masuk kompresor, dan ke luar sebagai udara mampat pada titik 2. Udara bertekanan tinggi tersebut masuk ruang bakar dan menyerap panas dari proses pembakaran, lalu ke luar ruang bakar dengan temperatur tinggi pada titik 3. Selanjutnya, fluida kerja masuk turbin dan berekspansi untuk memberikan energinya ke sudu-sudu turbin. Terjadi perubahan energi, dari energi panas fluida kerja menjadi putaran poros turbin. Sesudah berekspansi pada turbin, fluida kerja lalu ke luar turbin dengan temperatur relatif rendah ke lingkungan.



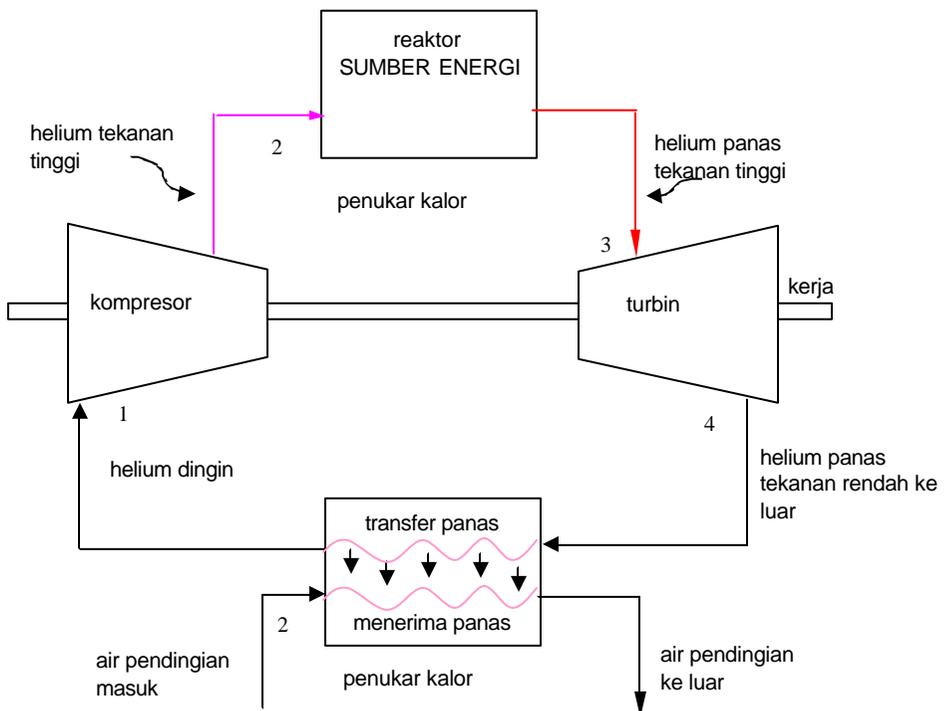
Gambar 17.3 Bagan kerja turbin gas sistem terbuka tak langsung

Pada gambar 17.3 adalah contoh sistem turbin gas tak langsung dengan penukar kalor. Dapat dilihat, fluida kerja (fluida sekunder) yang dipakai adalah udara. Udara masuk kompresor dan ke luar sebagai udara mampat pada titik 2. Udara bertekanan tinggi tersebut, masuk penukar kalor dan menyerap panas dari sumber panas. Sumber panas tersebut adalah fluida primer bertemperatur tinggi yang mengalir dari reaktor. Fluida primer ini, sebagai pembawa energi panas dari proses pembakaran bahan bakar nuklir, yang biasa digunakan adalah air atau gas helium. Proses selanjutnya adalah sama dengan skema gambar 17.4

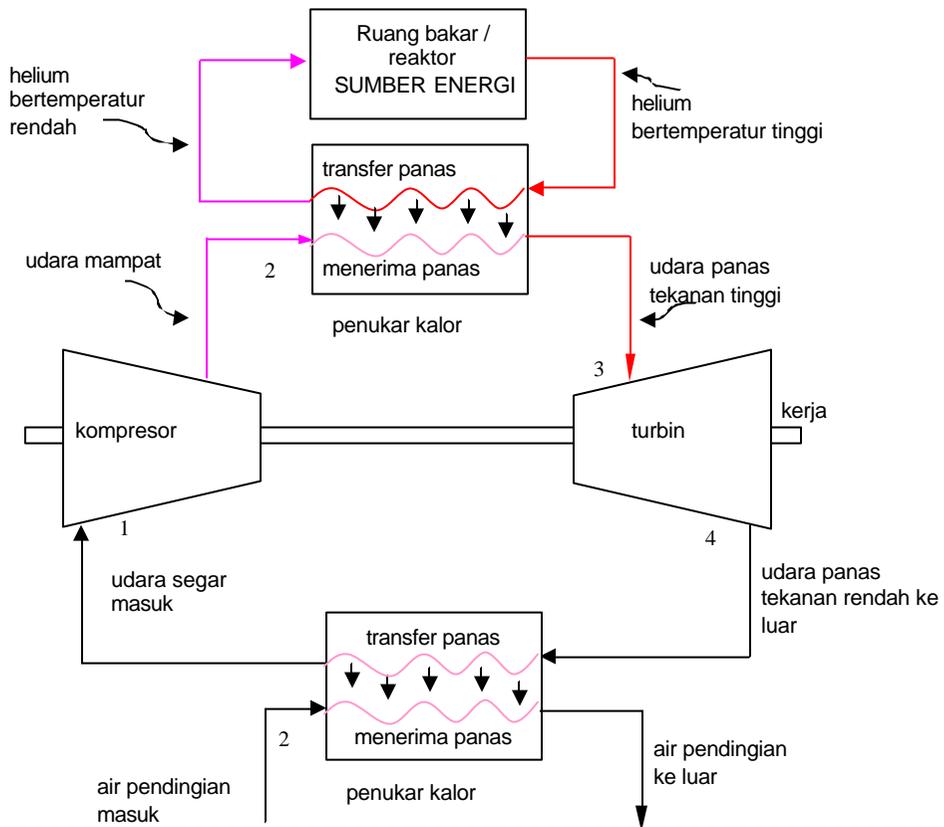


Gambar 17.4 Bagan kerja turbin gas sistem terbuka tak langsung

## A.2 Turbin gas sistem tertutup ( langsung dan tidak langsung)



Gambar 17.5 Bagan kerja turbin gas sistem tertutup langsung

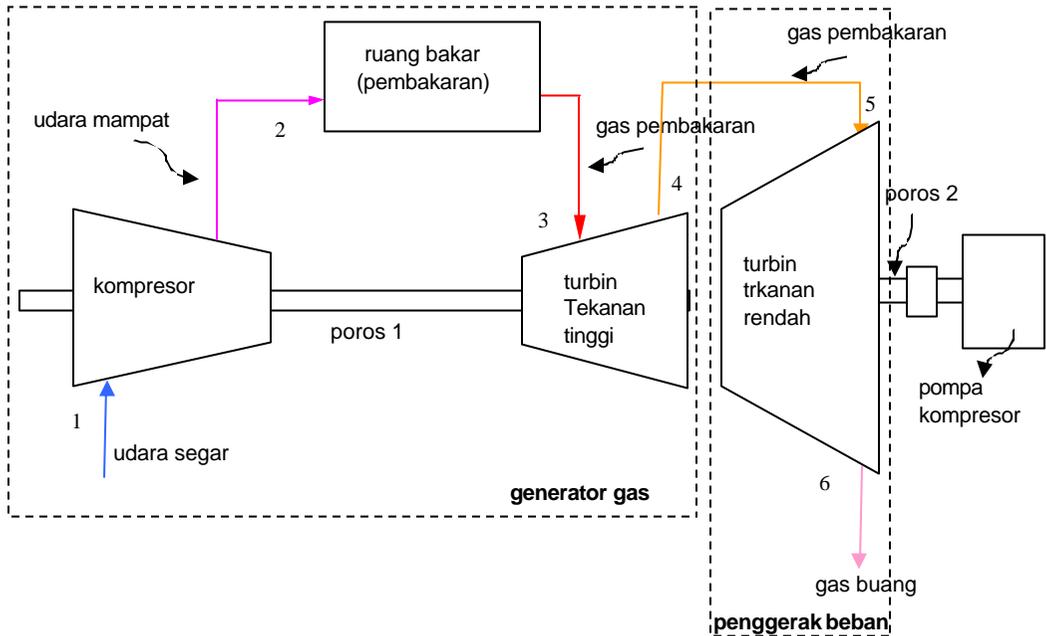


Gambar 17.6 Bagan kerja turbin gas sistem tertutup tak langsung

Sistem turbin gas tertutup langsung banyak digunakan untuk aplikasi turbin gas dengan bahan bakar nuklir [gambar 17.5]. Fluida kerja yang paling cocok adalah helium. Proses kerja dari sistem tersebut adalah sebagai berikut. Helium tekanan tinggi dari kompresor dimasukkan reaktor untuk dipanasi dan sekaligus untuk pendinginan reaktor. Setelah itu, helium berekspansi diturbin dengan melepaskan sebagian besar energinya. Energi tersebut diubah pada sudu-sudu turbin menjadi putaran poros turbin dan langsung menggerakkan kompresor ataupun beban lainnya. Helium ke luar turbin, tekanannya sudah menurun, tetapi masih bertemperatur tinggi. Helium bertemperatur tinggi harus didinginkan sebelum masuk kompresor, untuk keperluan tersebut, dipasang penukar kalor. Selanjutnya, helium dingin masuk kompresor lagi untuk dikompresi lagi.

Pada gambar 17.6 adalah sistem turbin gas tertutup tak langsung, sistem ini adalah sistem gabungan antara sistem tertutup dan sistem tak langsung. Fluida kerja primer menyerap panas dari ruang bakar atau reaktor kemudian dialirkan ke penukar kalor, kemudian diserap oleh fluida sekunder. Langkah selanjutnya, prosesnya sama dengan gambar 17.5.

### A.3. Turbin gas dua poros terpisah

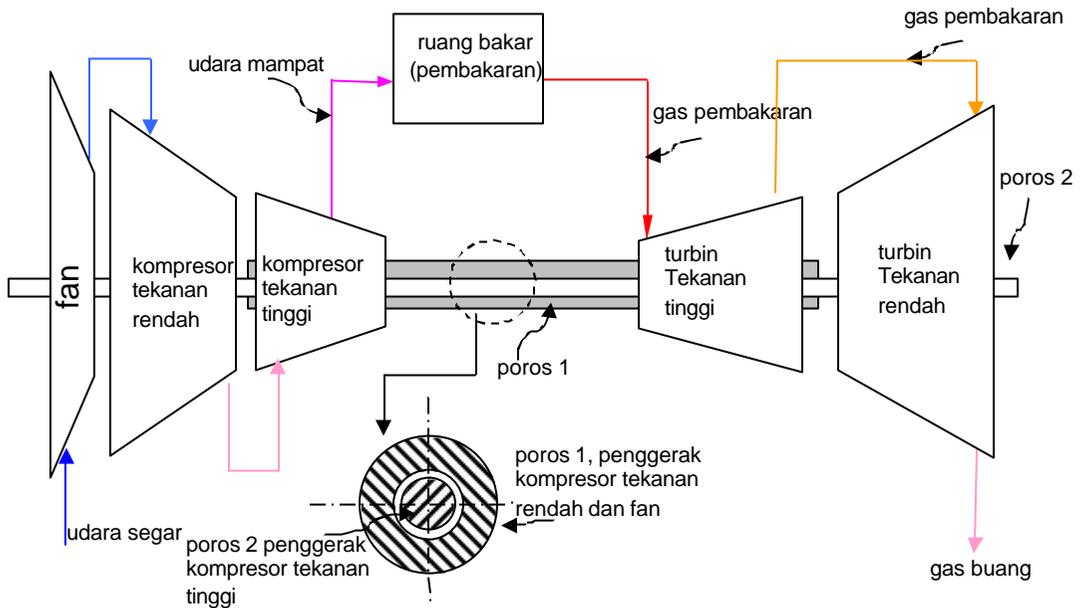


Gambar 17.7 Turbin gas industri dengan dua poros dan dua turbin

Pada pusat pembangkit daya (*power plant*) yang menggunakan turbin gas sebagai tenaga gerak, putaran poros turbin harus tetap tidak bervariasi [gambar 17.2]. Hal ini berkaitan dengan pembangkitan energi listrik pada generator yang harus stabil, sehingga energi listrik yang dihasilkan stabil dengan frekuensi (*Hz*) yang tetap. Untuk menangani beban pada putaran yang tetap, biasanya turbin gas yang dipakai hanya menggunakan satu poros saja.

Berbeda dengan aplikasi turbin gas pada pembangkit listrik yang menggunakan satu poros, turbin gas yang dipakai untuk industri khususnya sebagai penggerak kompresor dan pompa, banyak menggunakan sistem dua poros [gambar 17.7]. Alasan yang mendasari adalah kompresor dan pompa bekerja pada putaran yang berubah-ubah, dengan tujuan merespon perubahan kapasitas aliran. Untuk itu, turbin gas harus dapat bekerja pada putaran yang bervariasi, sehingga dapat digunakan sebagai penggerak pompa atau kompresor pada putaran yang bervariasi. Poros pertama terdiri dari kompresor dan turbin tekanan tinggi (*gas generator*), dan yang kedua terdiri dari turbin tekanan rendah untuk putaran poros yang terhubung dengan beban yaitu pompa atau kompresor.

#### A.4. Turbin gas dua poros terpusat



Gambar 17.8 Turbin gas pesawat terbang dengan dua poros terpusat

Pada gambar 17.8 di atas adalah sebuah bagan turbin gas dengan dua poros. Turbin gas jenis ini banyak dipakai pada turbin gas pesawat terbang dengan fan (TURBOFAN). Udara dimampatkan tiga kali yaitu di fan, kompresor tekanan rendah dan kompresor tekanan tinggi. Untuk fan dan kompresor tekanan rendah digerakan oleh turbin tekanan rendah dengan poros di dalam anulus poros pertama. Sedangkan kompresor tekanan tinggi digerakan turbin tekanan tinggi. Pengatur poros dengan tugasnya masing-masing bertujuan untuk memperoleh tingkat putaran yang berbeda antara bagian penggerak kompresor tekana tinggi dengan penghasil gaya dorong yaitu fan. Turbin gas ini digunakan untuk menghasilkan gaya dorong yang besar pada pesawat terbang.

Klasifikasi turbin gas yang sudah diuraikan di atas adalah turbin gas standar tanpa ada modifikasi dengan kinerja yang minimal. Ada beberapa metode untuk memperbaiki kinerja dari tubin gas, yaitu dengan melihat beberapa kemungkinan-kemungkinan, dari segi konstruksinya maupun dari segi proses kerjanya. Sebagai contoh, yaitu penambahan alat untuk memanfaatkan temperatur gas buang dari turbin yang masih tinggi. Untuk memahami kinerja dari turbin gas secara kwantitatif dapat menggunkan konsep dasar, yaitu konsep efisiensi.

## B. Efisiensi Turbin Gas

Pemakaian turbin gas banyak menguntungkan sebagai pengganti sumber penggerak lain, seperti yang sudah diuraikan di atas, yaitu turbin gas bentuknya lebih simpel dan tidak banyak memakan tempat. Kalau dibandingkan dengan turbin uap, turbin gas lebih mudah dioperasikan, mudah dikendalikan dan instalasinya lebih sederhana. Akan tetapi, secara aktual efisiensi turbin gas masih rendah. Sudah banyak metode yang digunakan untuk menaikkan efisiensi tersebut.

Dari gambar 17.1 diagram  $p$ - $v$  dan  $t$ - $s$ , dapat dilihat bahwa ; Pemasukan panas berlangsung pada tekanan tetap ;

$$q_{masuk} = mc_p (T_3 - T_2)$$

Pengeluaran panas juga pada tekanan konstan ;

$$q_{keluar} = mc_p (T_4 - T_1)$$

Sehingga, kerja berguna dapat dirumuskan sebagai berikut ;

$$W_{berguna} = q_{masuk} - q_{keluar} = mc_p(T_3 - T_2) - mc_p(T_4 - T_1)$$

Efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan kerja berguna dengan energi kalor yang masuk, dirumuskan sebagai berikut ;

$$h = \frac{W_{berguna}}{q_{masuk}} = \frac{q_{masuk} - q_{keluar}}{q_{masuk}},$$

dapat ditulis dalam bentuk ;

$$h = 1 - \frac{T_1}{T_2}, \text{ atau}$$

$$h = 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{g-1}{g}}$$

dimana  $c_p$  = kapasitas jenis pada tekanan konstan

$$g = \frac{c_p}{c_v}$$

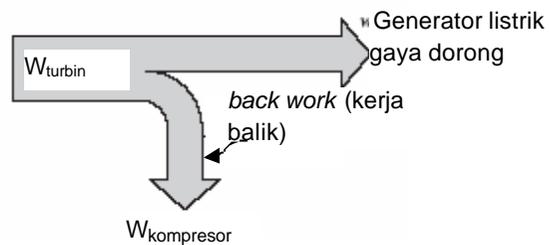
Dapat dilihat dari perumusan di atas, bahwa untuk menaikkan efisiensi turbin gas, kompresor yang digunakan harus memiliki perbandingan tekanan  $\frac{p_2}{p_1}$  yang tinggi, sehingga pemakaian bahan bakar

lebih sedikit. Kenaikan perbandingan tekan tidak selamanya menaikkan daya turbin, pada perbandingan tekanan tertentu, daya turbin mencapai

maksimum, selanjutnya daya yang berguna akan kembali turun. Hal ini dikarenakan, pada perbandingan tekanan yang tinggi diperlukan kerja kompresor yang besar, padahal kerja kompresor mengambil dari daya turbin. Dengan alasan tersebut, dapat dipahami kenaikan perbandingan tekanan tidak selalu menguntungkan pada nilai tertentu.

Bagian dari kerja turbin yang digunakan untuk menggerakkan kompresor dinamakan *back work ratio* [gambar 17.9]. Perbandingan daya pada turbin gas biasanya 3 : 2 : 1, 3 untuk daya turbin, 2 untuk kompresor, dan 1 untuk generator listrik. Sebagai contoh untuk menggerakkan generator listrik 100 kW, turbin gas harus mempunyai daya 300 kW, karena harus menggerakkan kompresor sebesar 200 kW.

Dengan alasan itu, banyak faktor yang harus diperhatikan terutama untuk mengoptimalkan kerja kompresor. Sebagai contoh, suhu masuk kompresor  $T_1$  tidak terlalu tinggi, dengan alasan pada suhu yang tinggi kerja kompresor bekerja lebih berat. Dengan kerja kompre-



Gambar 17.9 *Back work* turbin gas

sor lebih berat, daya yang diambil dari daya turbin lebih banyak sehingga mengurangi bagian yang lainnya.

Turbin gas pesawat terbang atau helikopter yang beroperasi di daerah panas, seperti di gurun, sering mengalami kesulitan. Hal ini berkebalikan pada turbin gas pesawat terbang yang beroperasi pada daerah dingin, turbin gas lebih mudah disetart, dengan  $T_1$  yang rendah. Dari perumusan kerja berguna dapat dilihat, pada  $T_1$  rendah lebih menguntungkan, karena kerja berguna turbin lebih bagus dibandingkan pada  $T_1$  sudah tinggi. Jadi, pada  $T_1$  yang tinggi, kerja kompresor menjadi lebih berat, hal ini akan menurunkan kerja berguna turbin, dan efisiensi turbin gas menjadi turun.

Dari perumusan kerja berguna turbin, terlihat bahwa temperatur  $T_3$  yaitu temperatur gas pembakaran yang masuk turbin, sangat berpengaruh terhadap kerja turbin, semakin tinggi  $T_3$  semakin besar kerja turbin yang dihasilkan. Kenaikan  $T_3$  juga tidak selalu menguntungkan, karena membutuhkan material yang kuat dan mahal. Apabila karakteristik material turbin tidak memenuhi standar, kenaikan  $T_3$  harus dibatasi untuk menghindari kegagalan operasi, karena kerusakan material turbin pada suhu tinggi.

Perhitungan daya turbin sangat penting untuk mengetahui kemampuan kerja dari turbin gas keseluruhan komponen. Perhitungan daya turbin gas seperti diwah ini :

a. Kompresor mulai bekerja memampatkan udara yang akan disuplai ke ruang bakar untuk proses pembakaran. Laju kerja persatuan kg massa udara yang dibutuhkan kompresor adalah :

$$P_{v,*} = \frac{H \cdot g}{100 h_v} \text{ KW/kg atau}$$

$$P_v = \frac{m H \cdot g}{100 h_v} \text{ Kw}$$

$$h_v = \frac{m H \cdot g}{P_v} \text{ [efisiensi pada tabel]}$$

dengan H = tinggi tekan m (dalam kolom gas)

$m_s$  = laju massa udara dalam kg/dtk

Tabel 17.1 efisiensi kompresor

Jenis Kompresor	$h_v$ politrop	$h_v$ koping	keterangan
Radial aksial	0,8.....0,85	0,78.....0,83	sampai 1500 kw
	0,84.....0,85	0,84.....0,85	$m_s = 30...350\text{kg/s}$

b,.Daya yang dihasilkan turbin gas :

$$P_T = m_s \cdot h_s \cdot h_t$$

dengan  $m_s$  = kapasitas gas panas

$h_s$  = panas jatuh turbin adiabatik

c. Daya efektif yang dihasilkan turbin gas (daya berguna)  $P_e$

$$P_e = P_T - P_v$$

dengan  $P_e$  = daya berguna Kwatt

### Contoh soal

Suatu turbin gas bekerja ( $p_s = 1 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ) dengan perbandingan

kompresi  $p = \frac{p_2}{p_1} = 7$ . Proses kompresi berlangsung adiabatik. Kapasitas

udara 100 kg/dtk. Hitung temperatur akhir kompresi, tinggi kenaikan H, daya penggerak kompresor, daya yang dihasilkan turbin ( udara 3% untuk pendinginan), dan daya berguna turbin gas. Periksa apa kaidah rasio daya 3:2:1 terpenuhi !

**Jawab**

Diketahui :

$$p = \frac{p_2}{p_1} = 7$$

$$\dot{m}_s = 100 \text{ kg/s}$$

$$p_s = 1 \text{ bar}, T_1 = 20^\circ\text{C}$$

a. Temperatur akhir kompresi dari gambar terlihat  $T_{\text{akhir}} = 189^\circ\text{C}$

b. Tinggi kenaikan dapat ditentukan :

$$p = \frac{p_2}{p_1} = 7, \text{ tinggi kenaikan } H = 23000 \text{ m}$$

c. Daya penggerak kompresor

$$P_v = \frac{\dot{m} H \cdot g}{1000 h_v} \text{ Kw}$$

$$P_v = \frac{100 \cdot 23000 \cdot 9,8}{1000 \cdot 0,85} = 26517,65 \text{ Watt}$$

$$P_v = 26517,65 \text{ KWatt}$$

d. Daya yang dihasilkan turbin gas

$$P_T = \dot{m}_s \cdot h_s \cdot h_t$$

$$P_T = (100 - 3) \cdot 500 \cdot 0,80 = 38800 \text{ KWatt}$$

dengan  $h_s = 500 \text{ kJ/Kg}$

$$h_t = 0,80$$

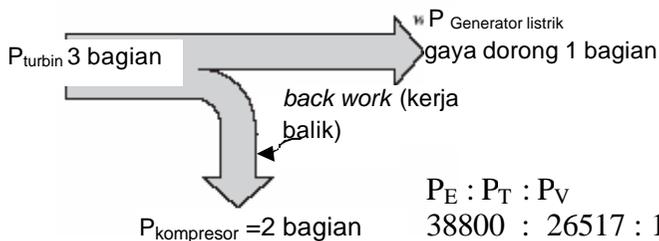
e. Daya efektif turbin Gas

$$P_e = P_T - P_v$$

$$P_e = 38800 \text{ KWatt} - 26517,65 \text{ KWatt}$$

$$= 12282,35 \text{ Kwatt}$$

f. Kaidah rasio daya TG



$$P_E : P_T : P_V$$

$$38800 : 26517 : 12282$$

$$3,15 : 2,15 : 1 \text{ terpenuhi}$$

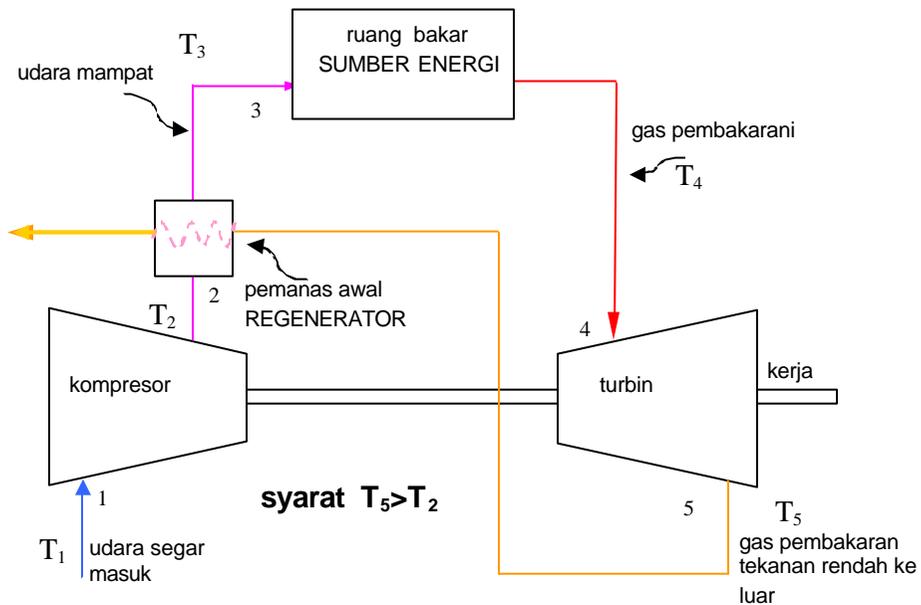
**Soal :**

1. Turbin gas dipasang sebagai penggerak generator listrik sebuah industri, beroperasi pada kondisi lingkungan ( 1 atm, 30<sup>0</sup> C), Perbandingan kompresi  $p = \frac{p_2}{p_1} = 6$ . Proses kompresi dianggap sempurna adiabatik, Kapasitas udara 150 kg/dtk sebanyak 5 % udara dipakai untuk pendinginan.
2. Hitung daya efektif turbin gas dimana kompresor memerlukan daya sebesar 30000 KW dan berapa efisiensi apabila tinggi tekan kompresi sebesar 16000 m dengan kapasitas aliran sebesar 300 kg/dtk
3. Hitung tinggi tekan yang dihasilkan kompresor apabila diketahui daya efektif turbin gas sebesar 10000 KWatt, kapasitas aliran 250 kg/dtk, kompresor yang dipasang adalah kompresor axial.

## C. Modifikasi Turbin Gas

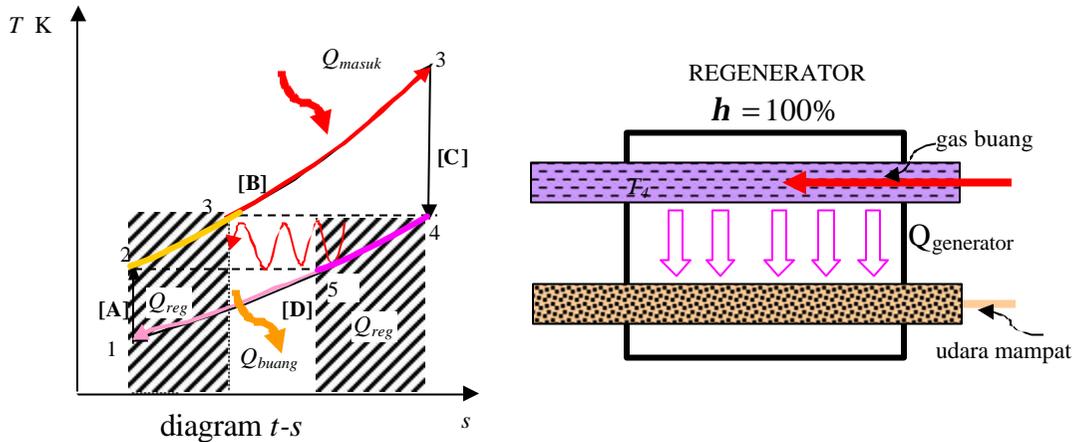
### C.1. Turbin gas dengan regenerator

Suhu gas bekas ke luar turbin yang masih relatif tinggi dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan kerja turbin gas. Pemanas awal atau regenerator adalah alat yang dipasang untuk mentransfer panas dari gas bekas turbin ke udara mampat dari kompresor sebelum masuk ruang bakar. Dengan metode tersebut, udara mampat masuk ruang bakar bertemperatur lebih tinggi, hal ini membantu menaikkan efisiensi proses pembakaran, sebagai efeknya adalah konsumsi bahan-bakar menjadi lebih irit.



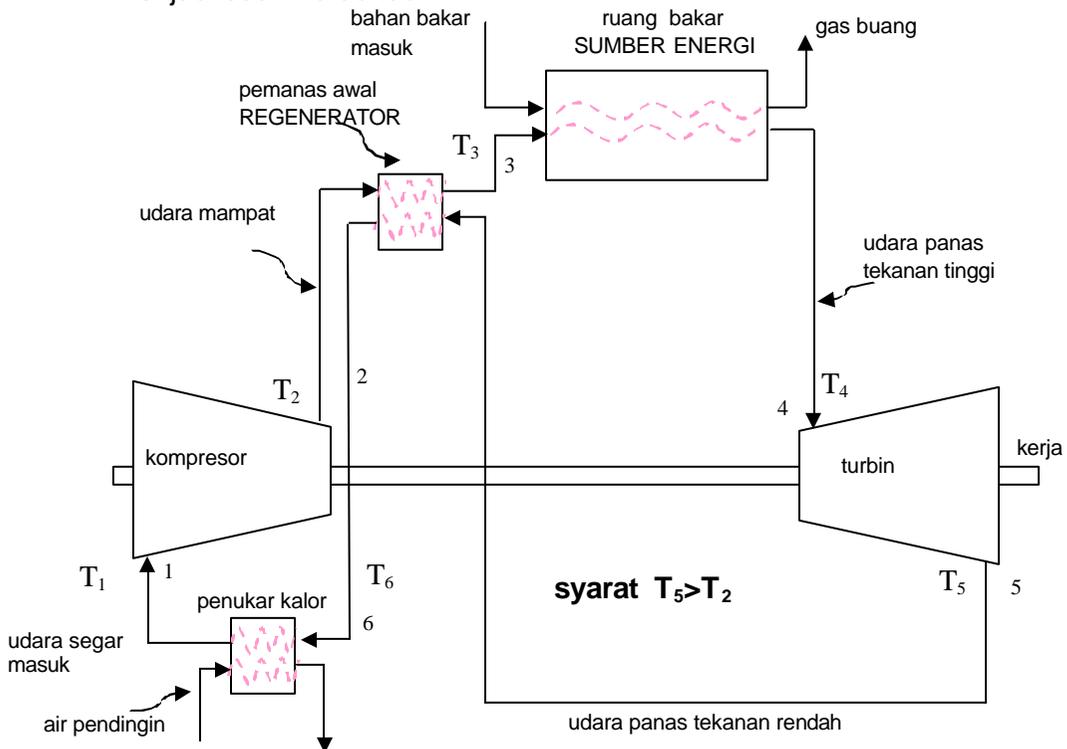
Gambar 17.10 Bagan kerja turbin gas sistem terbuka tak langsung dengan pemasangan pemanas awal atau *REGENERATOR*

Pemasangan regenerator menjadi efektif jika suhu gas bekas lebih tinggi dari suhu ke luar kompresi ( $T_5 > T_2$ ). Kebalikan dari kondisi itu, efeknya akan merugikan kerja turbin gas, hal ini karena terjadi perpindahan kalor dari udara mampat bertemperatur lebih tinggi ke gas bekas yang bertemperatur rendah. Udara mampat yang masuk ruang bakar menjadi dingin dan mengakibatkan proses pembakaran terganggu. Pada gambar 17.10 adalah diagram T-s yang menggambarkan turbin gas dengan regenerator dan pada gambar 17.10 adalah sistem turbin gas tertutup dengan *REGENERATOR*.



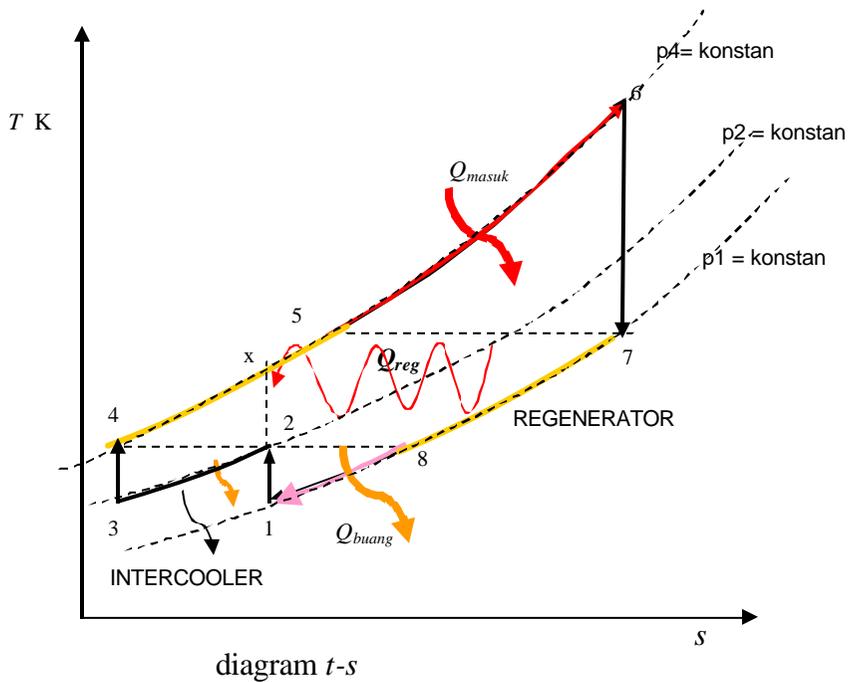
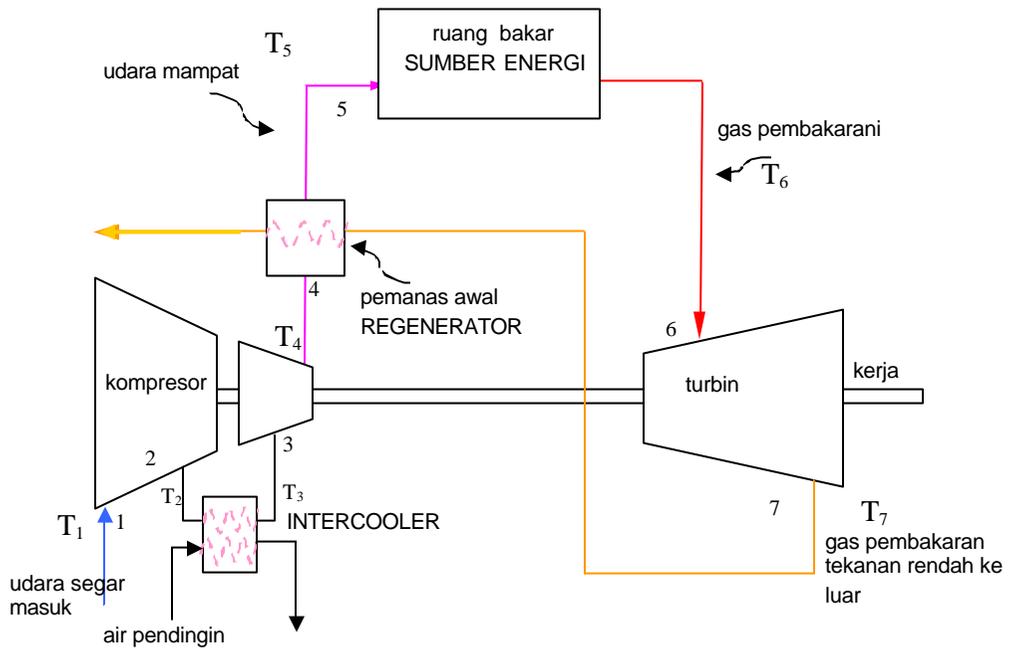
Gambar 17.11 Diagram  $t$ - $s$  turbin gas dengan regenerator

Dari diagram di atas terlihat dengan penambahan  $Q_{gen}$  dapat menaikkan suhu udara mampat, dari titik 2 ( $T_2$ ) menjadi titik 3 ( $T_3$ ). Dengan kenaikan tersebut, energi yang dibutuhkan untuk proses pembakaran menjadi berkurang atau lebih sedikit. Dengan kata lain, dengan energi yang lebih sedikit, bahan-bakar yang dibutuhkan pun menjadi sedikit atau lebih irit.



Gambar 17.12 Diagram  $t$ - $s$  turbin gas sistem tertutup dengan regenerator

## B.2. Turbin gas dengan pendingin sela (*intercooler*)



Gambar 17.13 Diagram  $t-s$  turbin gas sistem terbuka dengan regenerator dan *intercooler*

Pada akhir proses kompresi pada kompresor, terjadi kenaikan temperatur dari fluida gas. Dari perumusan termodinamika didapat bahwa kenaikan temperatur sebanding dengan rasio tekanannya. Adapapun persamaannya adalah sebagai berikut ;

$$\frac{T_b}{T_i} = \left( \frac{p_d}{p_i} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$T_b = T_i \left( \frac{p_d}{p_i} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

dimana  $T_b$  = temperatur akhir kompresi

$T_i$  = temperatur awal kompresi

$p_d$  = tekanan akhir kompresi

$p_i$  = tekanan hisap kompresi

$n$  = faktor politropie (  $n=1 \sim n = 1,4$  )

dan persamaan kerja dari kompresor adalah

$$W_{\text{kompresor}} = R_i T_s \frac{n}{n-1} \left[ \frac{T_b}{T_i} - 1 \right]$$

dan untuk kerja pada kondisi isothermal, persamaannya adalah

$$W_{\text{kompresor}} = R_i T_s \ln \frac{p_b}{p_i}$$

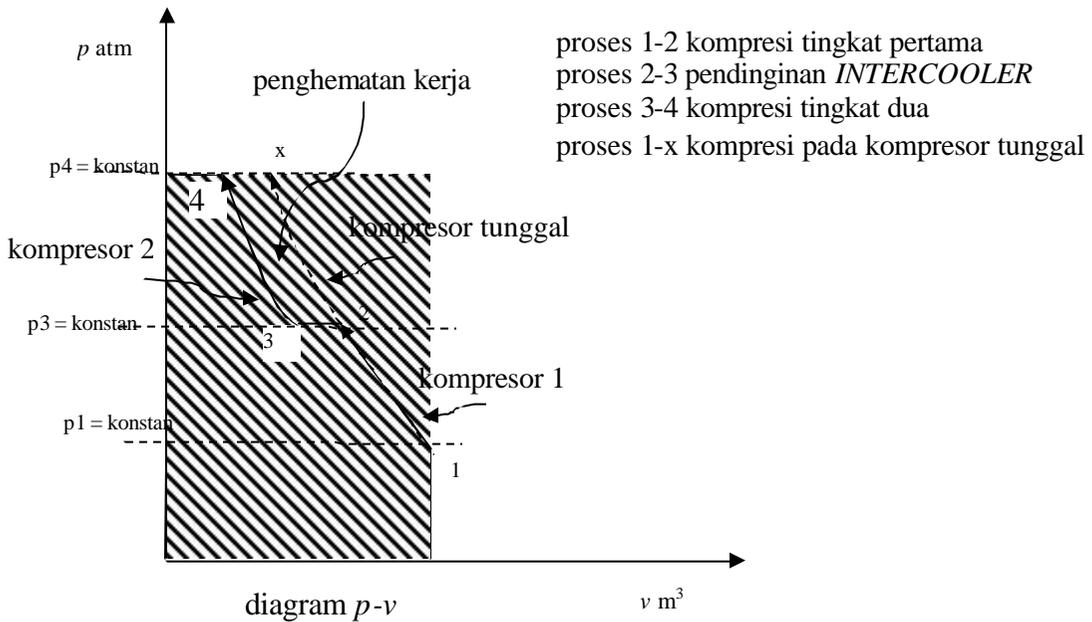
Dari perumusan temperatur dan kerja menunjukkan bahwa dengan kenaikan rasio tekanan akan menaikkan temperatur akhir dari kompresi, hal ini juga berarti kerja yang dibutuhkan kompresor naik.

Kenaikan kerja kerja kompresor sangat tidak menguntungkan, karena kerja kompresor adalah negatif. Apabila kondisi ini diaplikasikan pada kompresor turbin gas pada rasio tekanan tinggi, maka akan banyak mengurangi daya dari turbin gas, hal ini akan menurunkan efisiensi secara keseluruhan.

Untuk mengatasi hal tersebut di atas, proses kompresi dibuat bertingkat dan dengan pendinginan sela ( *intercooler* ) pada setiap tingkat kompresi. Dengan metode ini akan menggunakan kompresor yang jumlahnya sama dengan jumlah tingkat kompresi, dan jumlah *intercooler* yang dipasang adalah jumlah kompresor dikurangi satu.

Pada gambar 17.13 menunjukkan proses kerja dari turbin gas dengan penambahan regenerator dan pendingin sela ( *intercooler* ).

Dengan pemasangan *intercooler* suhu dari proses kompresi tingkat sebelumnya didinginkan kembali ke temperatur awal. Dengan keadaan tersebut kerja kompresor yang kedua adalah sama dengan kerja kompresor sebelumnya, dengan rasio tekanan yang sama. Pada gambar 17.14 terlihat dengan membuat dua tingkat kompresi, dua kompresor, dan satu intercooler, ada penghematan kerja kompresor dibandingkan dengan kerja kompresor tunggal.

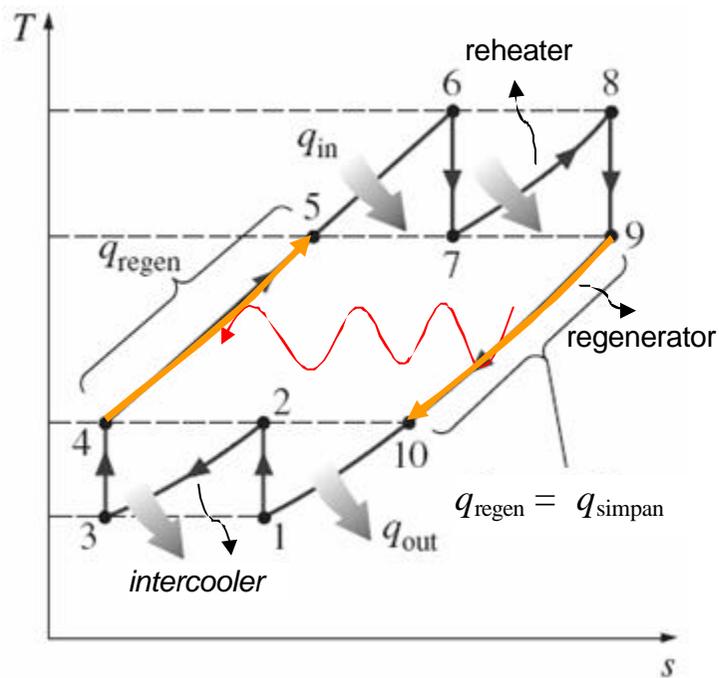
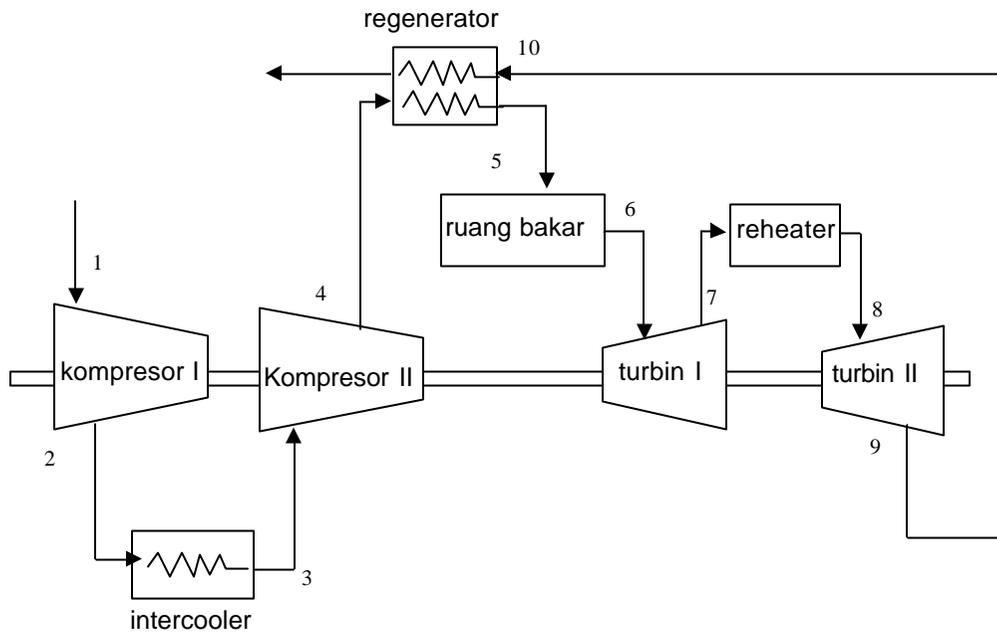


Gambar 17.14 Diagram  $p-v$  kompresor bertingkat dengan *intercooler*

### B. 3. *Intercooler, reheater, dan regenerator*

Kerja berguna dari turbin gas adalah selisih kerja positif turbin dan kerja negatif kompresor sehingga untuk menaikkan kerja berguna yaitu dengan mengurangi kerja kompresor atau memperbesar kerja turbin, atau juga kedua-duanya. Dari sistem turbin gas terbuka seperti yang telah diuraikan di atas untuk mengurangi kerja kompresor dengan cara memperendah suhu  $T_1$  dan untuk mempertinggi kerja turbin dengan mempertinggi  $T_3$ .

Dengan prinsip yang sama seperti kompresor, proses ekspansi pada turbin juga dapat bertingkat untuk menaikkan kerja turbin dengan memasang reheater pada setiap tingkat. Reheater berfungsi memanaskan kembali gas pembakaran dari proses ekspansi sebelumnya. Dari bagan dan diagram  $p-v$  terlihat modifikasi turbin gas dengan pemasangan intercooler, heater dan regenerator [gambar 17.15]. Dengan modifikasi ini efisiensi turbin gas menjadi lebih baik.

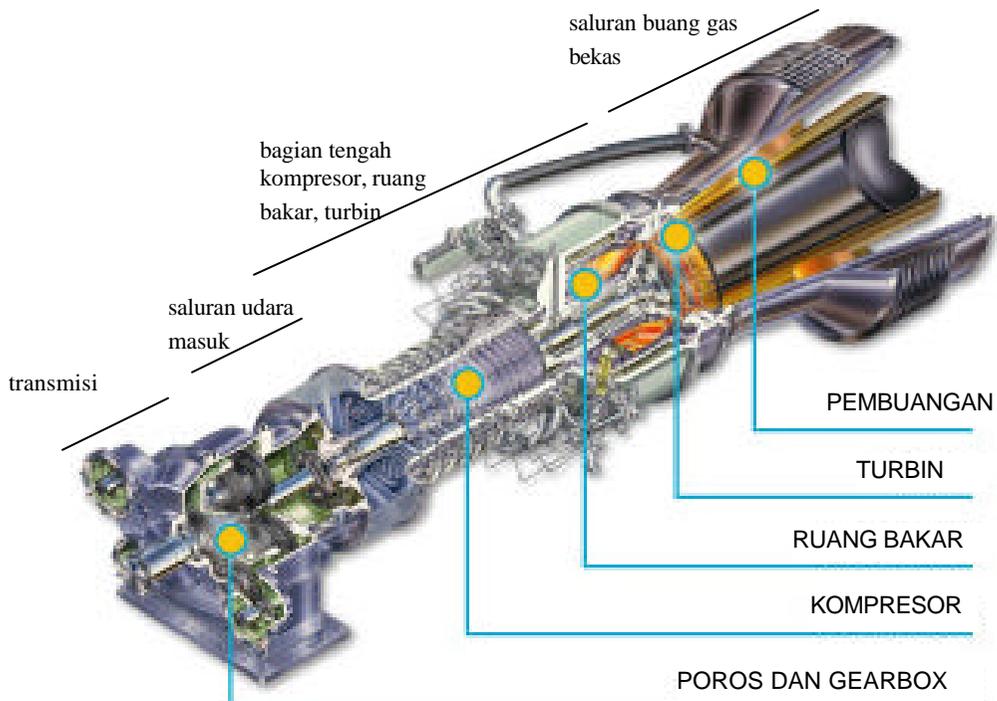


Gambar 17.15 Bagan dan diagram  $p$ - $v$  turbin gas dengan *intercooler*, *regenerator* dan *reheater*

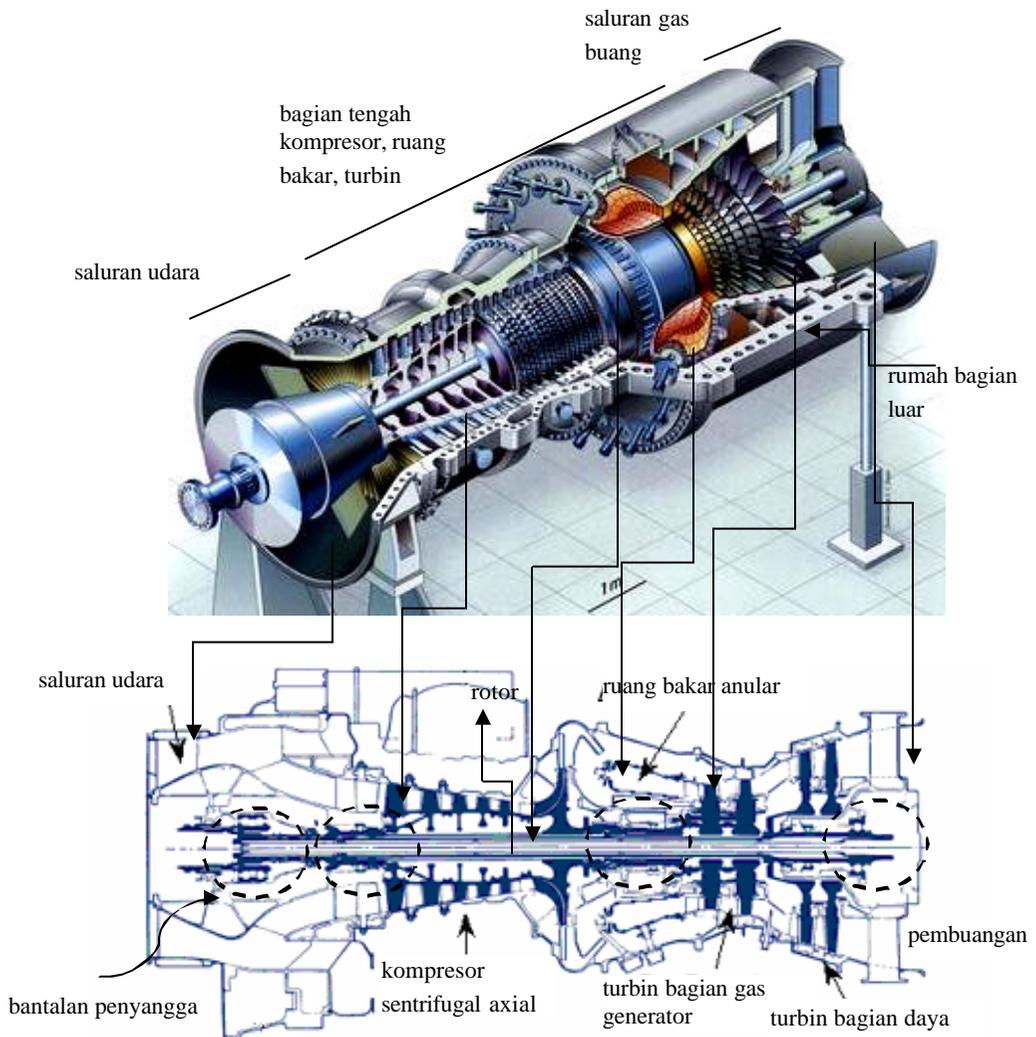
## BAB 18 KONSTRUKSI TURBIN GAS

Turbin gas terdiri dari komponen-komponen yang saling berhubungan satu dan lainya. Komponen-komponen utama turbin gas adalah kompresor, ruang bakar, dan turbin. Kompresor dan turbin mempunyai rotor yang sama, rotor tersebut ditahan dengan dua bantalan radial dan satu bantalan aksial. Rumah mesin bagian luar umumnya terdiri dari bagian tengah, rumah bagian udara masuk dan rumah bagian gas bekas ke luar satu sama lainnya dihubungkan dengan kuat [gambar 18.1, 18.2, dan 18.3].

Untuk turbin gas yang dipakai pada pesawat terbang, konstruksinya lebih simpel, antara komponen yang satu dengan yang lainnya tidak terpisah. Ukuran komponen-komponen turbin gas pesawat lebih kecil apabila dibandingkan dengan turbin gas untuk industri.



Gambar 18.1 Turbin gas dan komponen-komponennya

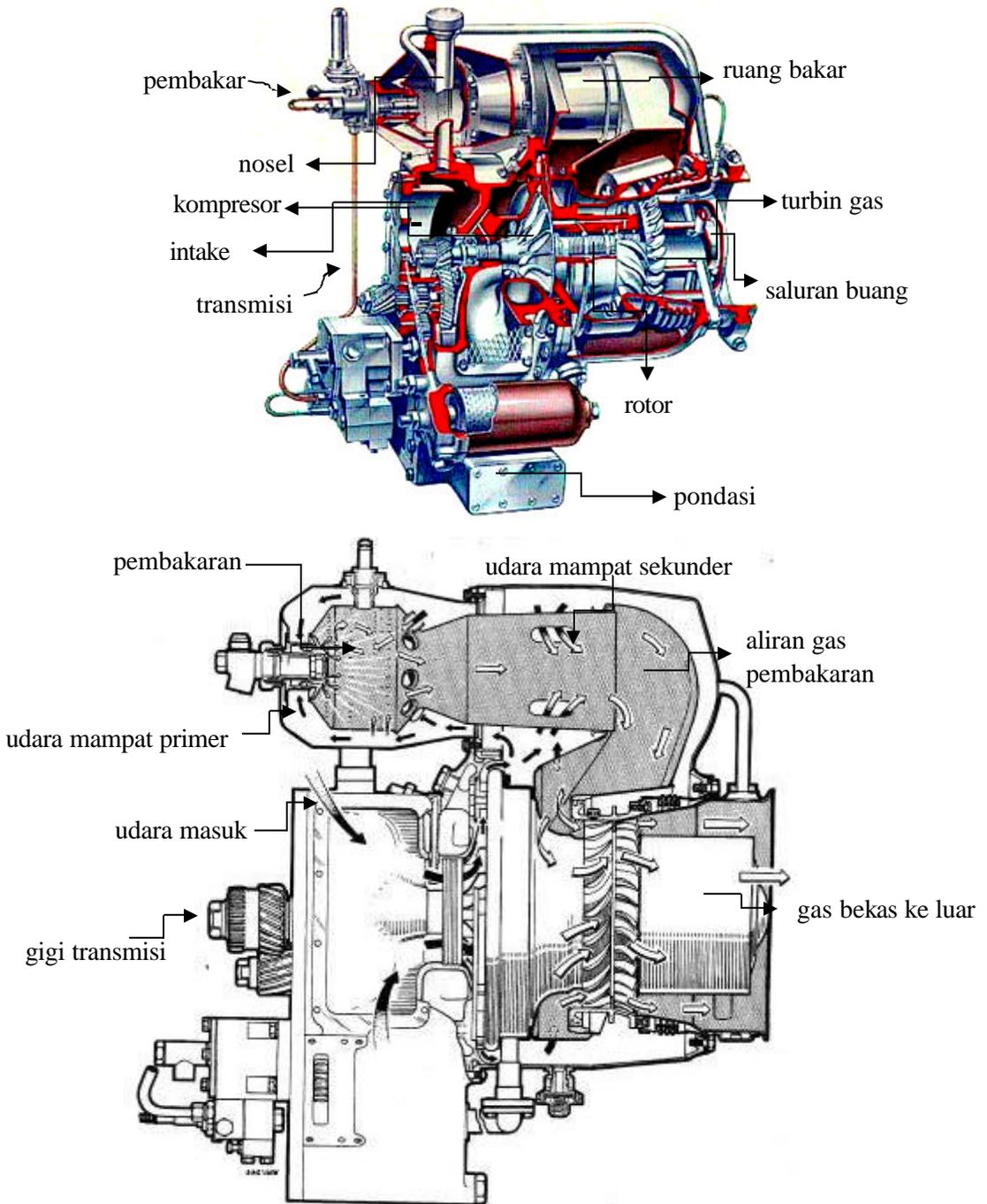


Gambar 18.2 Turbin gas dan komponen-komponennya

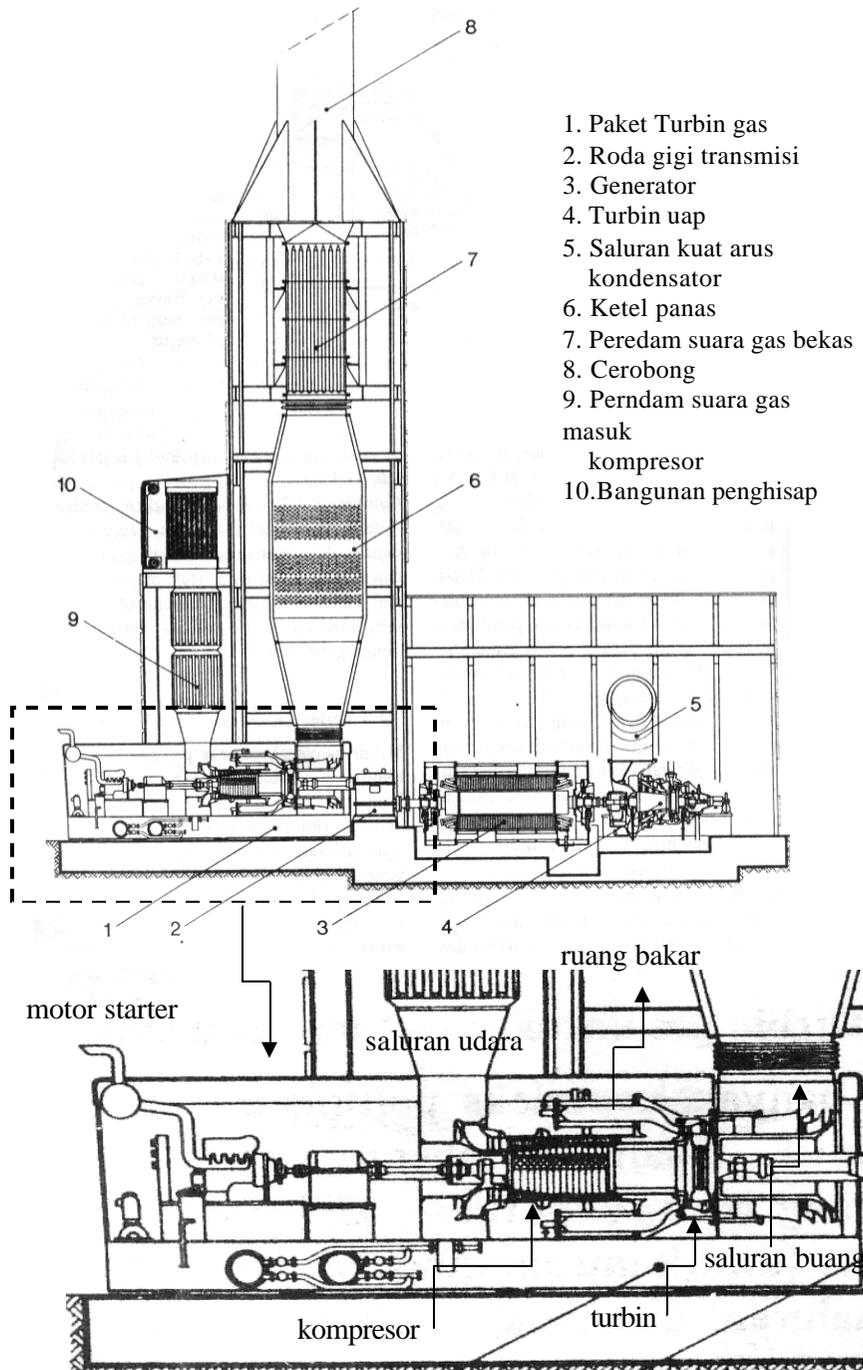
Rumah mesin tersebut dipisahkan aksial di bagian tengah setinggi tengah tengah poros. Rumah bagian luar terdiri dari selubung luar dan selubung dalam, diantara selubung tersebut terdapat gas bekas yang dialirkan lewat cerobong. Sudu pengarah kompresor dan turbin ditempatkan di dalam beberapa penyangga sudu pengarah, dan ditumpu dengan sistem elastis terhadap panas di dalam rumah mesin bagian luar.

Saluran udara, dimana pada bagian ini udara dihisap kompresor, mempunyai pelat pengarah, yang berfungsi juga untuk memperkuat luasan samping yang besar. Udara kompresor dapat dilewatkan samping

atau atas [gambar 18.3]. Sebelum masuk kompresor, udara tersebut melalui saringan dan peredam suara.



Gambar 18.3 Turbin gas mini dan komponen-komponennya



Gambar 18.4 Pusat pembangkit tenaga gabungan

## A. Rotor

Rotor konstruksinya terdiri dari beberapa piringan tersendiri yang dilengkapi sudu, dan dengan kedua ujungnya serta bagian tengahnya dilengkapi dengan jangka tarik. Bagian-bagian tersebut satu sama lain saling memegang dengan sistem Hirth berkerat-kerat seperti gergaji. Rotor menjadi ringan dan mempunyai kecepatan kritis yang lebih besar dari kecepatan putar turbin.

Bagian-bagian rotor dan sudu-sudu didinginkan dari dalam Udara dimasukan ke dalam rotor melalui lubang yang terletak dibagian belakang tingkat terakhir dari kompresor, kemudian udara tersebut dibagi untuk dialirkan ke ruang diantara piringan-piringan roda, selanjutnya dialirkan melalui kaki sudu dan kemudian bercampur dengan fluida kerja. Rotor akan mengalami gaya geser aksial, tetapi gaya geser tersebut saling berlawanan arah, kompresor ke kiri dan turbin ke kanan. Gaya geser tersebut diseimbangkan dengan membuat sudu-sudu yang disesuaikan.

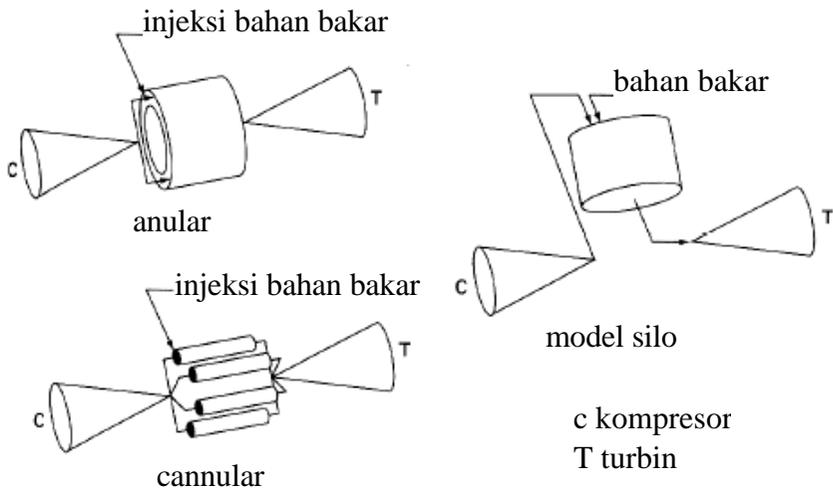
Kaki sudu pengarah dari kompresor dibuat berbentuk ekor layang-layang dan ditempatkan di dalam cincin pembagi. Gaya geser aksial yang terdapat pada penyangga sudu pengarah kompresor diterima oleh ketinggian cakar dari lis pembagi. Di antara tiga bagian penyangga sudu pengarah kompresor, kadang-kadang terdapat celah berbentuk cincin yang besar. Maksudnya, supaya udara tekan dapat dilepaskan melalui celah tersebut., sehingga pada saat kompresor berjalan terus dan kondisi sampai dibatas pemompaan, jalannya kompresor tetap tenang.

Penyangga sudu pengarah turbin dibuat sedemikian rupa, sehingga seluruh bagian tengah dari rumah bagian luar dapat diisi udara tekan dengan tekanan dan temperatur yang tertentu. Gas panas yang mengalir di dalam turbin dapat mengakibatkan rumah turbin ikut menjadi panas, sehingga di sekeliling rumah turbin diberi pelindung supaya panas jangan memancar ke luar, karena meskipun panas ke luar dari sudu turbin di sudu pengarah sudah didinginkan dan juga sudah ditahan oleh sudu pengarah, temperaturnya udara tersebut akan naik dan rumah turbin bagian luar juga ikut menjadi panas.

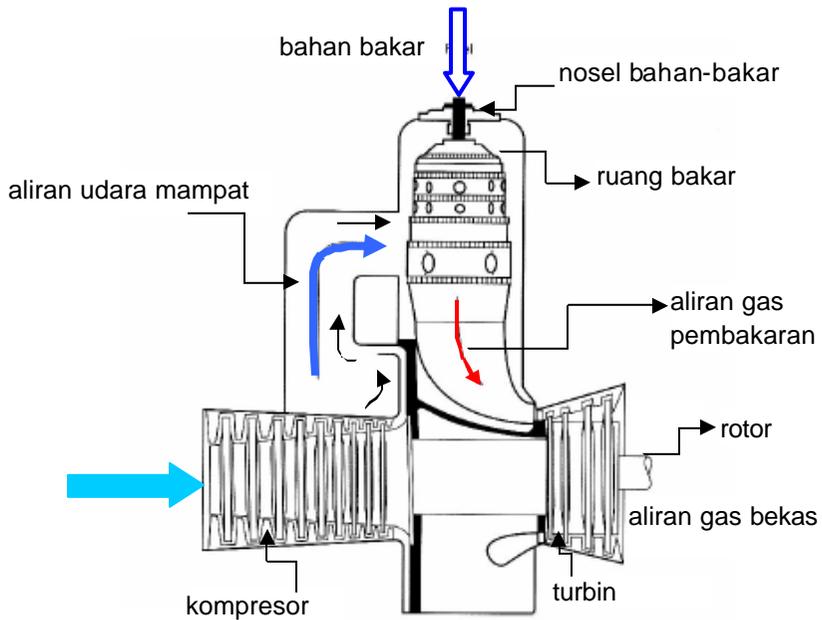


Gambar 18.5 Rotor Turbi gas

## B. Ruang Bakar



Gambar 18.6 Ruang bakar turbin gas

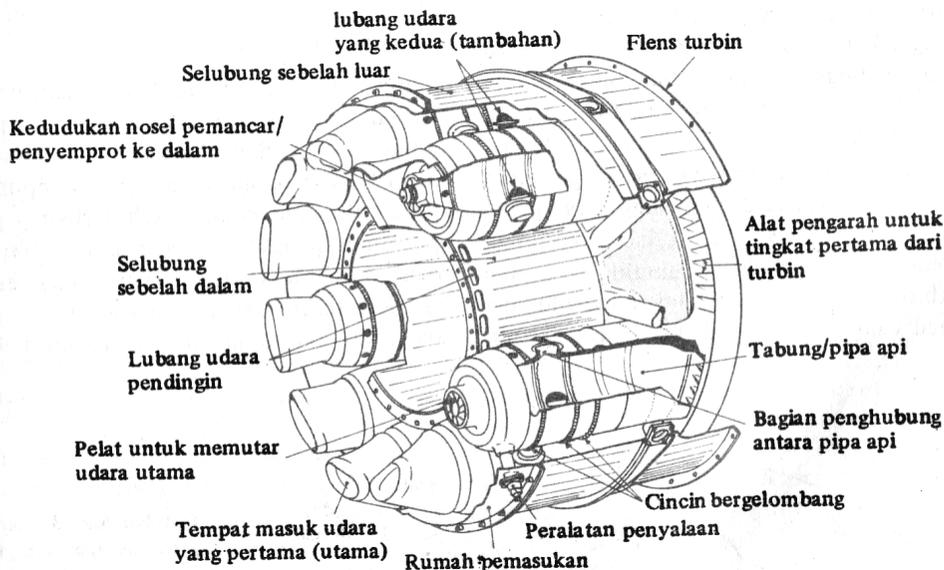


Gambar 18.7 Ruang bakar turbin gas

Ruang bakar turbin gas ditempatkan disamping rumah turbin, dengan maksud saluran udara dari kompresor dan gas pembakaran menjadi pendek sehingga kerugian aliran kecil. Saluran gas panas ditempat di dalam saluran udara kompresor sehingga tidak membutuhkan isolasi panas yang khusus. Untuk menghindari gumpalan-gumpalan gas panas karena tidak bercampur dengan udara segar, saluran gas dibuat dibelokan 90° dua kali sehingga gas panas dan udara bercampur dengan baik, sebelum masuk turbin.

Pengaturan kecepatan udara dari kompresor juga penting, kecepatan udara yang rendah akan mengakibatkan api akan merambat kearah kompresor dan sebaliknya api akan ke luar dari ruang bakar yang mengakibatkan ruang bakar menjadi dingin dan api dapat mati.

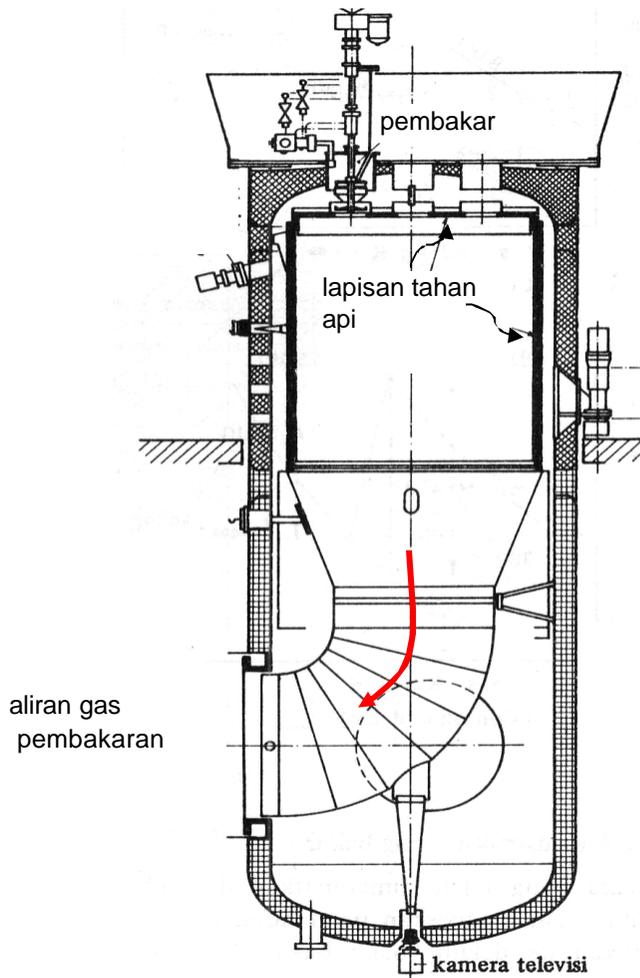
Ruang bakar turbin gas pesawat terbang konstruksinya dapat dilihat pada 20.8. Ruang bakar harus menghemat ruang dan dipasang sekeliling sumbu tengah. Ruang bakar dengan pipa api di dalamnya masing-masing berdiri sendiri sehingga apabila salah satu ruang bakar mati yang lainnya tidak terpengaruh. Dibagian luar ruang bakar terdapat lubang udara primer dan sekunder, nosel bahan-bakar dan penyalanya dan juga terdapat lubang- lubang pendingin. Disini udara pendingin sangat penting untuk menjaga ruang bakar dari temperatur yang terlampau tinggi sehingga gas pembakaran yang mengalir ke turbin juga tidak terlalu tinggi.



Gambar 18.8 Ruang bakar turbin gas pesawat terbang

Ruang bakar untuk industri dibuat terpisah dan besarnya disesuaikan dengan daya turbin gas yang akan dihasilkan. Gambar 18.9

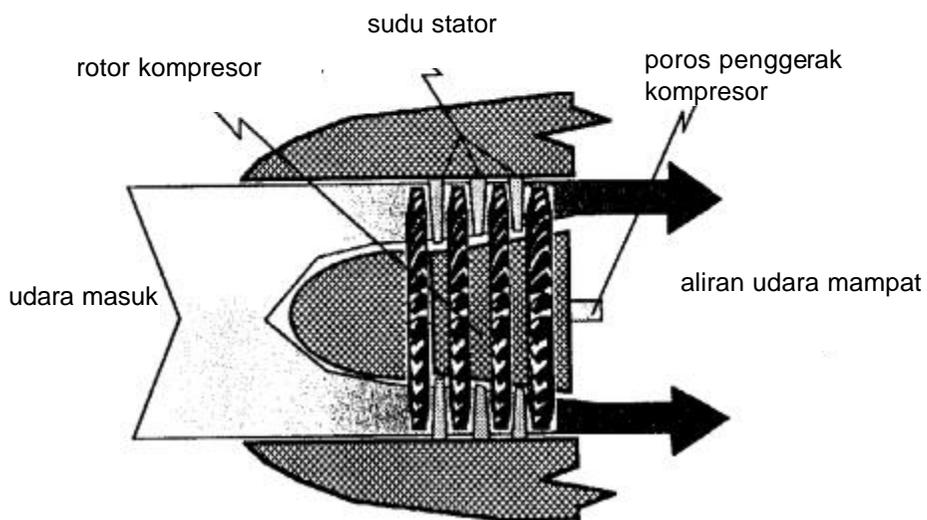
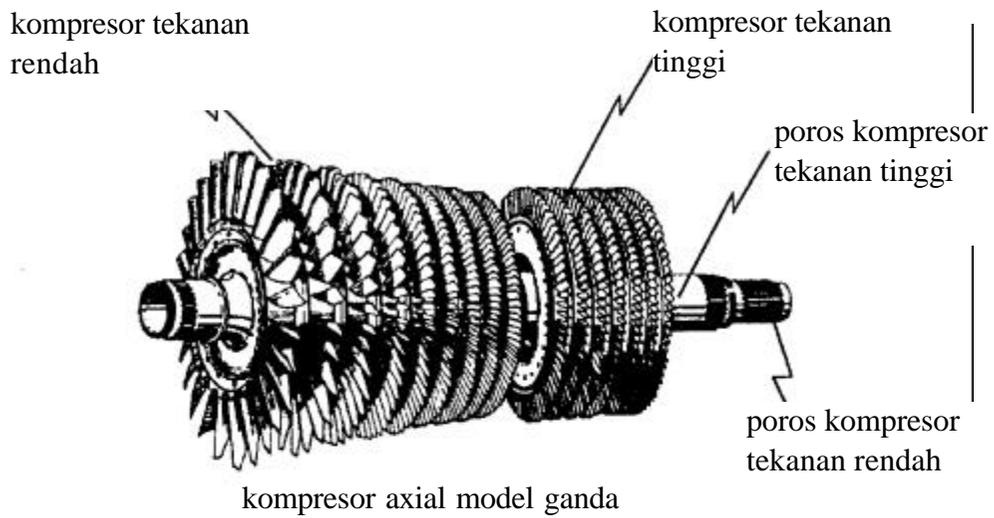
adalah ruang bakar untuk industri. Ruang bakar dipasang tegak, dan dibagian atas terdapat 3 buah burner. Dibagian dalam terdapat tabung api yang dilindungi oleh lapisan keramik tahan panas.



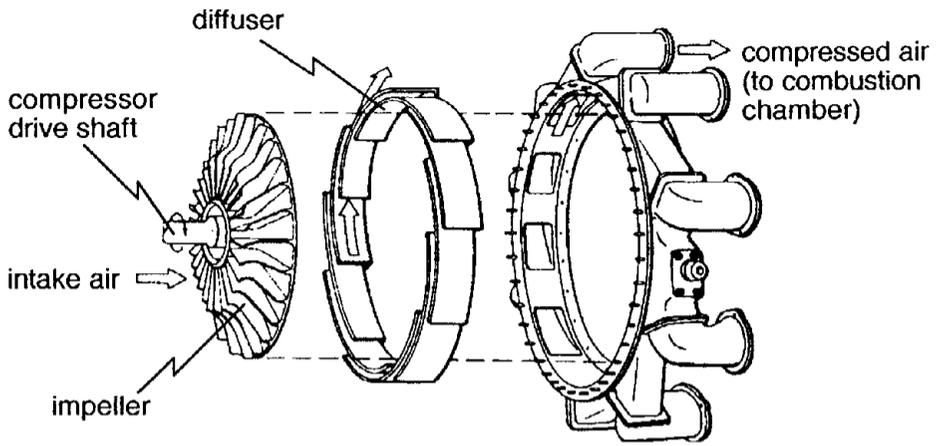
Gambar 18.9 Ruang bakar turbin gas pindustri

### C. Kompresor

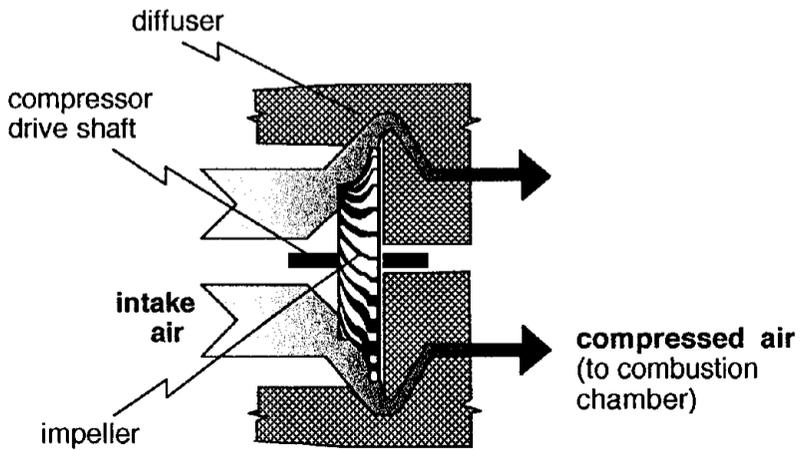
Udara dari luar ditekan dan dihisap oleh kompresor. Ada beberapa macam kompresor yang biasa digunakan turbin gas sebagai contoh yang umum dipakai adalah kompresor radial atau aksial. Kompresor radial biasanya ringan, konstruksinya lebih sederhana dan secara ekonomis lebih murah [gambar 18.10] Biasanya hanya satu tingkat untuk tekanan kompresi rendah sampai sedang. Komponennya impeler, difuser, poros dan manifold udara ke luar. Untuk yang axial biasanya bertingkat dan beroperasi pada tekanan kompresi tinggi, karena bertingkat menjadi berat dan mahal [gambar 18.11].



Gambar 18.10 Kompresor tubin axial



**Exploded view of centrifugal compressor components**



Gambar 18.11 Kompresor radial dengan diffuser

## D. Turbin

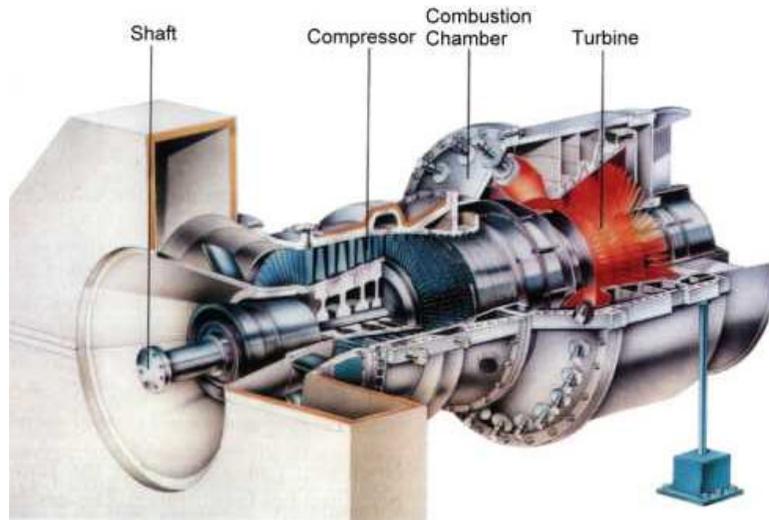
Proses ekspansi gas pembakaran pada turbin gas terjadi pada turbin, karena proses tersebut, terjadi perubahan energi kinetik gas pembakaran menjadi energi mekanik poros turbin, energi ini akan menggerakkan kompresor dan peralatan lainnya. Pada gambar 18.1 adalah contoh konstruksi dari turbin. Aliran gas turbin dirancang aliran axial. Pada turbin pesawat terbang gas sisa masih dapat digunakan untuk daya dorong. Bagian dari turbin yang penting adalah stator dan rotor.

Pada gambar 18.12 terlihat konstruksi dari satator. Stator adalah sudu tetap pada rumah turbin dan berfungsi sebagai nosel pengarah gas pembakaran berkecepatan tinggi ke sudu bergerak. Sedangkan rotor terdiri dari sudu bergerak yang terpasang pada poros turbin [gambar 18.5]. Rotor turbin bekerja pada temperatur gas pembakaran yang tinggi maka perlu pendinginan, sehingga tidak terjadi kerusakan material turbin.



Gambar 18.12 Bentuk dari sudu jalan turbin

## E. Aplikasi Turbin Gas



Gambar 18.13 Bentuk dari sudu jalan turbin

Instalasi turbin gas dapat dibedakan antara turbin yang tetap tidak dipindah-pindahkan dan turbin yang dipakai untuk menggerakkan pesawat terbang atau automobil. Instalasi turbin gas tetap tidak dapat diindah-pindahkan adalah instalasi yang dipakai untuk memutar generator listrik dan untuk menggerakkan kompresor dan juga yang dikapal-kapal, karena turbin gas ini harus dapat bekerja dalam jangka waktu yang panjang. Jadi turbin harus dibuat untuk mengatasi beban yang tinggi. Sebagai contoh untuk daya berguna sebesar 100 MW berarti daya turbin adalah sekitar 300 MW dan beroperasi pada temperatur 850 sampai 950.

Pada gambar 18.13 terlihat turbin gas yang dipakai untuk pembangkit listrik dengan daya dari 30 MW sampai 60 MW dan beroperasi selama 300 jam/tahun. Data data pokok turbin ini adalah sebagai berikut ; daya  $P = 60/80$  MW; putaran  $n = 3000$  rpm; kapasitas udara  $Q_{udara} = 350$  kg/detik; temperatur  $T_{max} = 870^{\circ}$ ; perbandingan kompresi  $r = 9,5$ ; temperatur gas bekas  $T = 415$  dan rendemen total 28%.

Kompresor terdiri dari 15 tingkat dengan kecepatan keliling 320 m/s dan panjang sudu tingkat pertama  $L = 320$  mm. Pada instalasi turbin gas yang besar, untuk memudahkan start pada kompresor dipasang katup yang gunanya mencegah pemompaan, sehingga udara dengan tekanan yang berbeda beda akan dike luarkan melalui katup tersebut. Udara dari kompresor dialirkan ke ruang bakar dengan melalui tabung yang

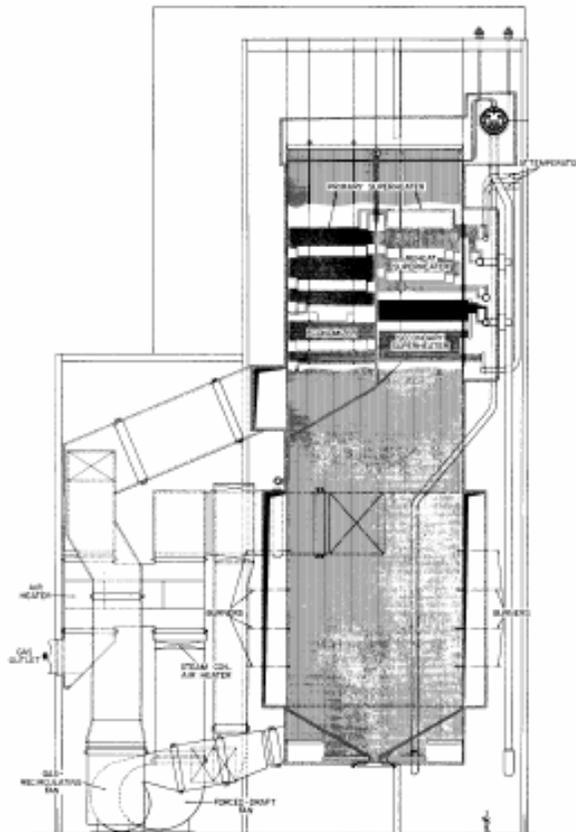
berbentuk seperti diffuser yang terdapat dalam saluran kosentris. disamping turbin terdapat ruang bakar yang dilengkapi dengan pembakar yang dalam operasinya dapat menggunakan minyak bakar atau gas bumi, dimana waktu bekerja pergantian bahan bakar dapat dilakukan dengan tanpa ada perubahan daya atau beban, jadi pada waktu bekerja meskipun bahan-bakarnya diganti daya turbin tetap konstan.

Turbin gas ini mempunyai udara pendingin yang masuk dari dua arah. Udara yang kompresor mengalir masuk ke dalam poros bagian tengah melalui lubang dan saluran-saluran udara tersebut mengalir ke permukaan rotor dan ke kaki sudu. Pada waktu start celah katup pada kompresor bekerja untuk membuang tekanan berlebih sehingga startnya ringan. Dalam waktu lima menit putaran turbin sudah mencapai kecepatan kerjanya yaitu 3000 rpm. Setelah sembilan menit generator mulai dihubungkan dengan jala-jala listrik dan mulai menerima beban.

Pada gambar di atas adalah contoh penggunaan turbin gas pada pembangkit tenaga listrik. Untuk meningkatkan efisiensi, disamping menggunakan turbin gas, pembangkit tenaga di atas juga menggunakan turbin uap, sehingga sering dinamakan pembangkit tenaga gabungan. Kerja dari pembangkit ini adalah dengan memanfaatkan kembali gas buang dari turbin gas yang masih bersuhu tinggi untuk pembangkitan uap di boiler uap.

## BAB 19 MESIN TENAGA UAP

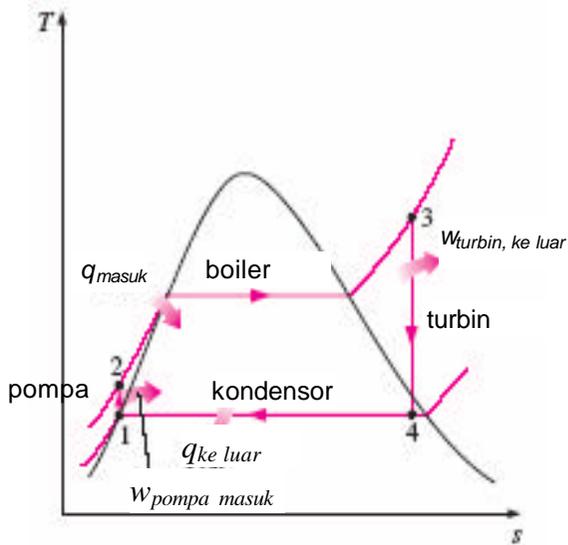
Mesin tenaga uap merupakan jenis mesin pembakaran luar [gambar 19.1] dimana fluida kerja dengan sumber energi terpisah. Sumber energi kalor dari proses pembakaran digunakan untuk membangkitkan uap panas. Uap panas dibangkitkan di dalam boiler atau sering disebut ketel uap. Untuk memperoleh uap dengan temperatur yang tinggi digunakan reheater. Pada reheater uap dipanaskan lagi menjadi uap panas lanjut sehingga temperturnya naik. Selanjutnya uap panas dimasukan ke Turbin Uap untuk diekspansi yang akan menghasilkan energi mekanik.



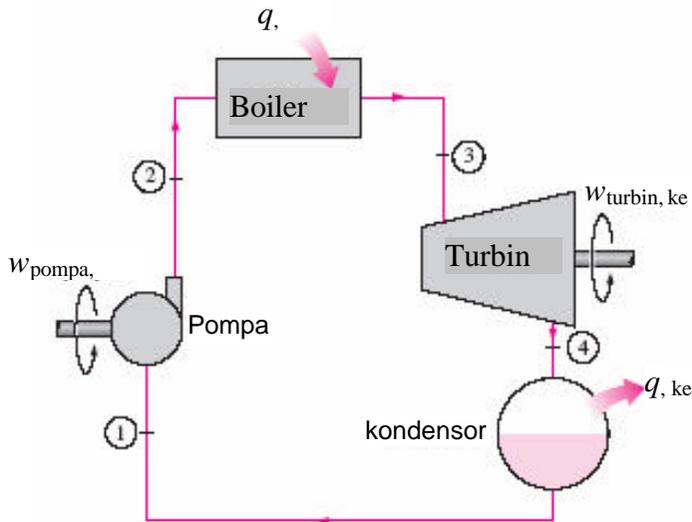
Gambar 19.1 Instalasi sistem pembangkit uap

Di dalam turbin uap energi uap panas dikonversi menjadi energi mekanik di dalam sudu-sudu turbin uap. Energi mekanik yang berupa putaran poros turbin uap akan menggerakkan generator pada instalasi pembangkit listrik tenaga uap.

## A. Siklus Termodinamika Mesin Uap



Gambar 19.2 Bagan siklus Rankin



Gambar 19.3 Bagan siklus Rankin

Proses termodinamika dari siklus Rankine di atas adalah sebagai berikut [gambar 19.2 dan 19.3] ;

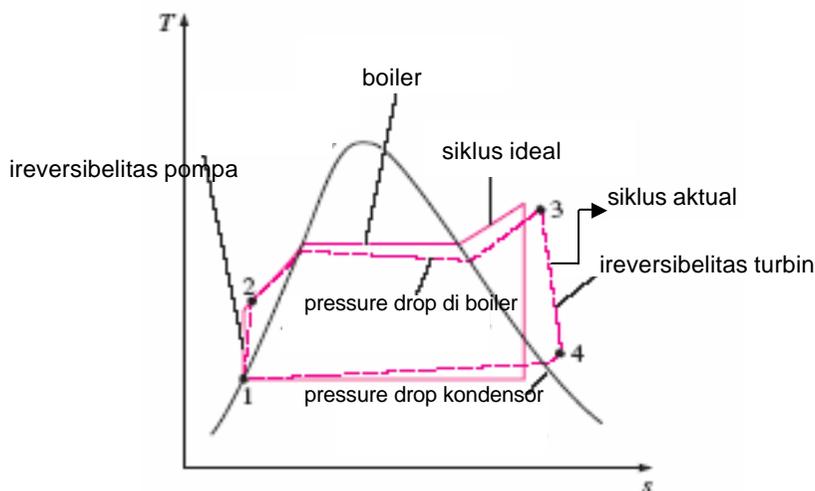
- 1-2** Proses kompresi adiabatik berlangsung pada pompa
- 2-3** Proses pemasukan panas pada tekanan konstan terjadi boiler
- 3-4** Proses ekspansi adiabatik berlangsung pada turbin uap
- 4-1** Proses pengeluaran panas pada tekanan konstan pada kondensator.

Fluida kerja berupa air jenuh dari kondensor dikompresi di pompa sampai masuk boiler. Dari proses kompresi pada pompa terjadi kenaikan temperatur  $T_1$  ke  $T_2$  kemudian di dalam boiler air dipanaskan dari  $T_2$  ke  $T_3$ . Sumber energi panas ( $q_{\text{masuk}}$ ) berasal dari proses pembakaran atau dari energi yang lainya seperti nuklir, panas matahari, dan lainnya. Uap panas masuk masuk turbin dan berekspansi sehingga temperatur dan tekanan turun ( $T_3 \sim T_4$ ). Selama proses ekspansi pada turbin terjadi perubahan dari energi fluida menjadi energi mekanik pada sudu-sudu menghasilkan putaran poros turbin. Uap yang ke luar dari turbin kemudian dikondensasi (pendinginan) pada kondensor sehingga sebagian besar uap air menjadi mengembun, kemudian siklus berulang lagi.

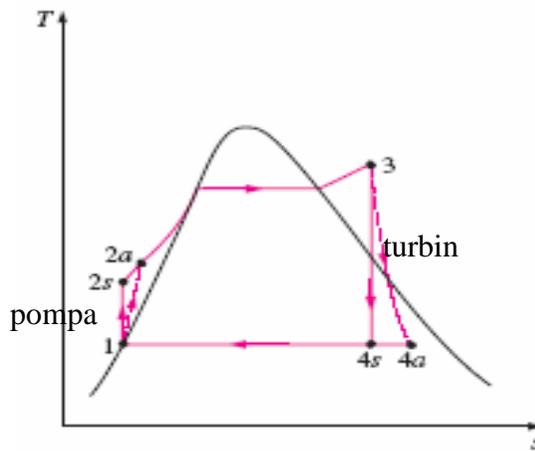
## B. Siklus Aktual dari Siklus Rankine

Penyimpangan siklus aktual dari siklus ideal dikarenakan karena beberapa faktor seperti gesekan fluida, kerugian panas, dan kebocoran uap [gambar 19.4 dan 19.5]. Gesekan fluida mengakibatkan tekanan jatuh pada banyak peralatan seperti boiler, kondensor dan di pipa-pipa yang menghubungkan banyak peralatan. Tekanan jatuh yang besar pada boiler mengakibatkan pompa membutuhkan tenaga yang lebih untuk memompa air ke boiler. Tekanan jatuh juga mengakibatkan tekanan uap dari boiler ke turbin menjadi lebih rendah sehingga kerja turbin tidak maksimal.

Kerugian energi panas banyak terjadi pada peralatan. Pada turbin karena proses ekspansi uap panas pada sudu-sudu dan rumah turbin banyak kehilangan panas. Kebocoran uap juga mengakibatkan kerugian yang tidak dapat diremehkan, biasanya terjadi di dalam turbin. Karena sebab-sebab tersebut mengakibatkan efisiensi menjadi turun.



Gambar 19.4 Diagram siklus aktual Rankine



Gambar 19.5 Proses ireversibeliti pada pompa dan turbin

Proses termodinamika dari siklus Rankine di atas adalah sebagai berikut [gambar 19.2 dan 19.3] ;

- 1-2 Proses kompresi adiabatik berlangsung pada pompa
- 2-3 Proses pemasukan panas pada tekanan konstan terjadi boiler
- 3-4 Proses ekspansi adiabatik berlangsung pada turbin uap
- 4-1 Proses pengeluaran panas pada tekanan konstan pada kondensator.

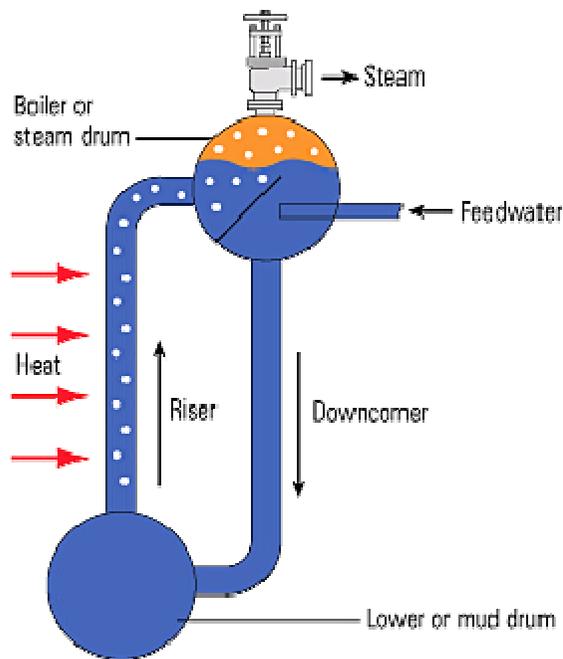
## C. Peralatan Sistem Tenaga Uap

### C.1. Boiler

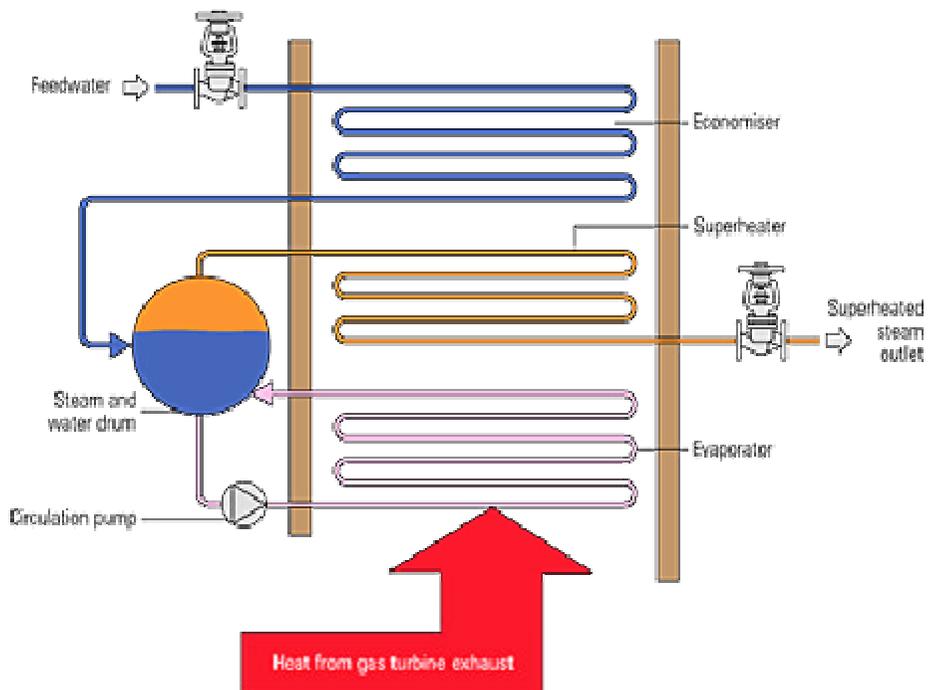
Peralatan yang paling penting pada mesin tenaga uap berbentuk bejana tekan berisi fluida air yang dipanasi langsung oleh energi kalor dari proses pembakaran, atau dengan elemen listrik atau energi nuklir. Air pada boiler akan terus menyerap kalor sehingga temperaturnya naik sampai temperatur didih, sehingga terjadi penguapan. Pada boiler yang menggunakan drum sebagai penampung uap, air akan mengalami sirkulasi selama proses pendidihan.

Ada dua cara sirkulasi air yaitu sirkulasi alamiah dan sirkulasi paksa. Sirkulasi air alamiah terjadi karena perbedaan massa jenis antara air panas dengan air yang lebih dingin, air panas akan naik ke permukaan drum dan air lebih dingin turun. Sirkulasi air paksa terjadi karena air disirkulasikan dengan bantuan dari pompa.

Untuk menghasilkan kapasitas uap yang besar, dibutuhkan jumlah kalor yang besar sehingga sirkulasi air harus bagus sehingga tidak terjadi overheating pada pipa-pipa airnya. [gambar 19.7] Untuk boiler yang tidak menggunakan drum uap akan langsung dikirim ke turbin uap, boiler jenis ini disebut boiler satu laluan.



Gambar 19.6 a. sirkulasi alamiah



Gambar 19.6 b. sirkulasi paksa

Ada dua tipe dari boiler yang sudah biasa dipakai yaitu;

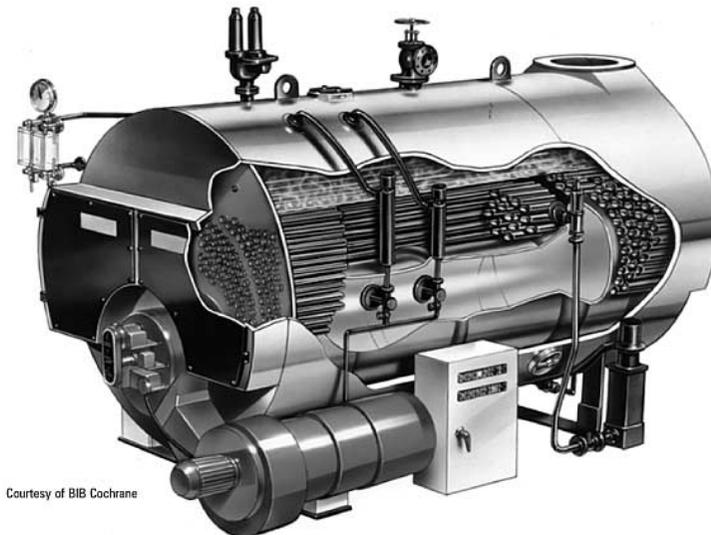
**a. *Firetube Boiler* atau Boiler pipa api.**

Boiler jenis ini pada bagian tubenya dialiri dengan gas pembakaran dan bagian lainya yaitu sell dialiri air yang akan diuapkan [gambar 16.20]. Tube-tubunya langsung didinginkan oleh air yang melingkupinya. Jumlah pass dari boiler bergantung dari jumlah laluan horizontal dari gas pembakaran diantara furnace dan pipa-pipa api. Laluan gas pembakaran pada furnace dihitung sebagai pass pertama. Boiler jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah.

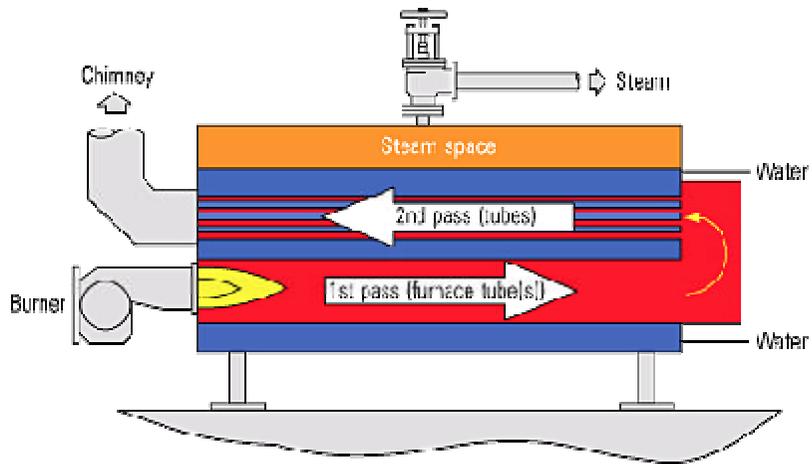
**b. *Watertube boiler* atau boiler pipa air.**

Boiler jenis ini banyak dipakai untuk kebutuhan uap skala besar [gambar 19.7]. Prinsip kerja dari boiler pipa air berkebalikan dengan pipa api, gas pembakaran dari furnace dilewatkan ke pipa-pipa yang berisi air yang akan diuapkan. Ada dua keuntungan menggunakan boiler pipa air daripada pipa api yaitu kapasitas yang besar dapat dicapai dengan memperbanyak jumlah tube atau pipa tanpa bergantung ukuran dari sell dan drum.

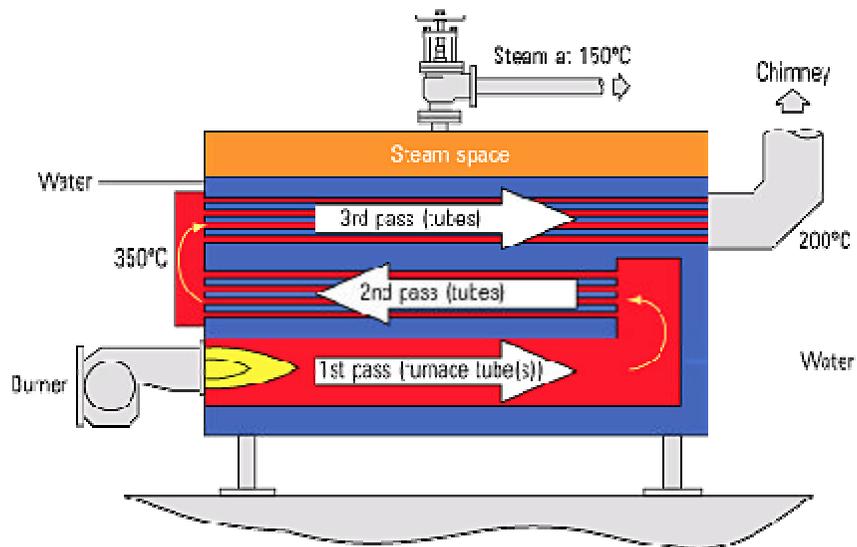
Keuntungan kedua adalah sell dan drum uap tidak terkena radiasi langsung dari kalor pembakaran sehingga dimungkinkan dibuat boiler dengan kapasitas dan tekanan uap yang besar. Berbagai jenis bahan-bakar dapat dipakai pada boiler tipe ini, variasi ukuran juga tidak menimbulkan masalah.



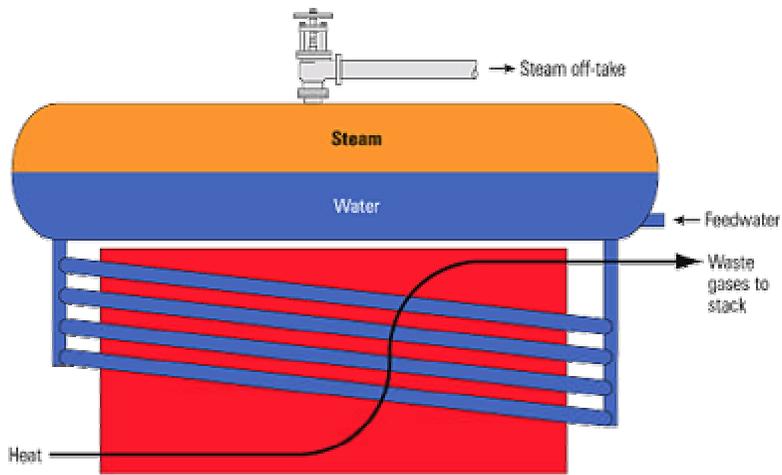
Gambar 19.7 Boiler pipa api (*fire tubue boiler*)



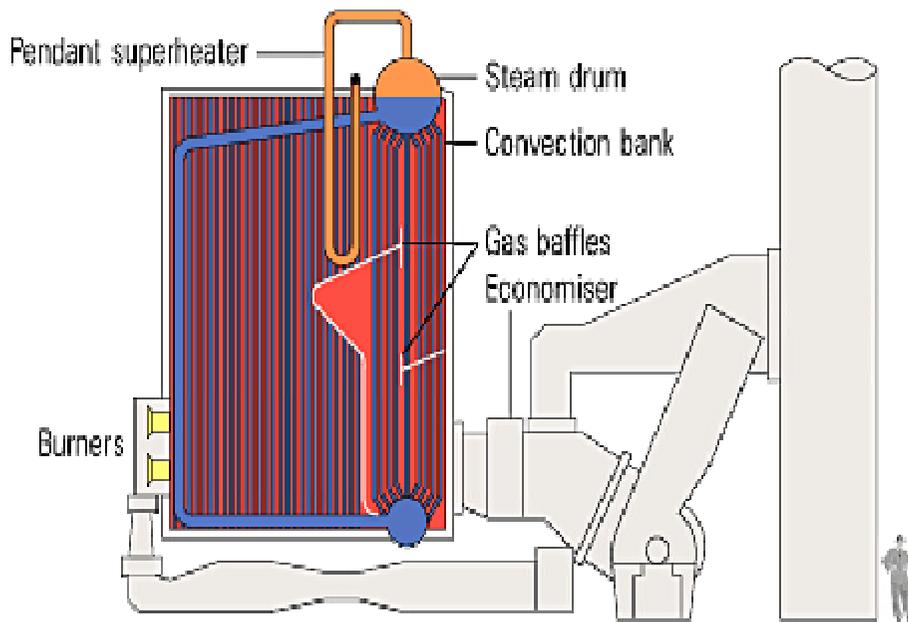
Gambar 19.8 Boiler pipa api (*fire tube boiler*) 2 pass



Gambar 19.9 Boiler pipa api (*fire tube boiler*) 2 pass



Gambar 19.10 Boiler pipa air model horizontal



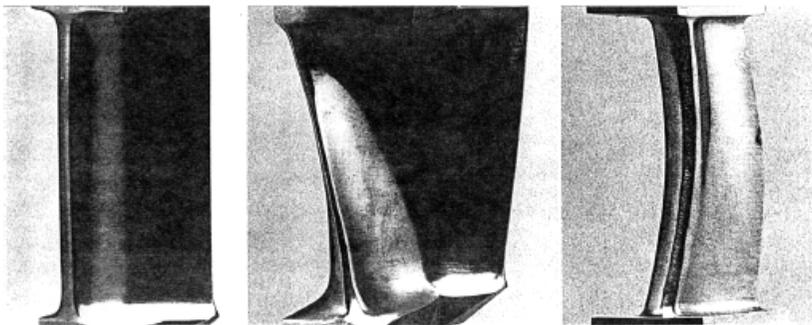
Gambar 19.11 Boiler pipa air model vertikal

## C.2. Turbin uap

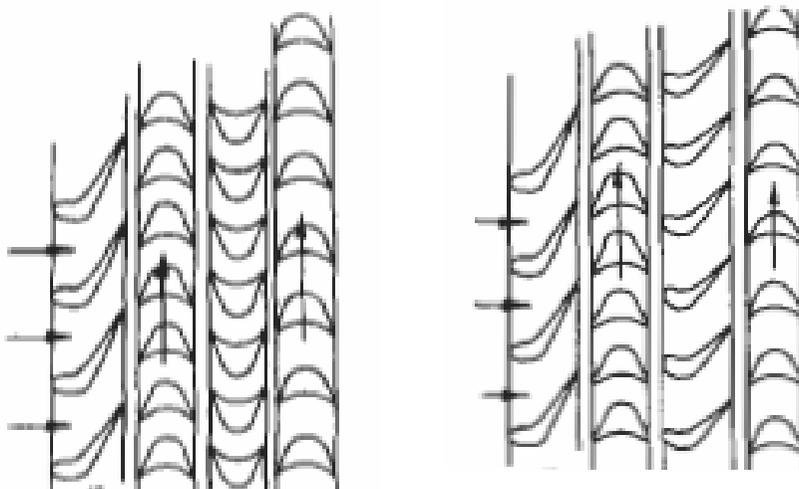
Perlatan yang paling utama dalam sistem tenaga uap adalah TURBIN UAP. Turbin uap berfungsi sebagai tempat untuk mengkonversikan energi yang terkandung dari uap panas dari boiler menjadi energi mekanik poros turbin.

Secara umum turbin uap dibagi menjadi dua yaitu turbin uap jenis impuls dan jenis reaksi. Prinsip kerja kedua jenis turbin uap sudah dibahas pada bab turbin.

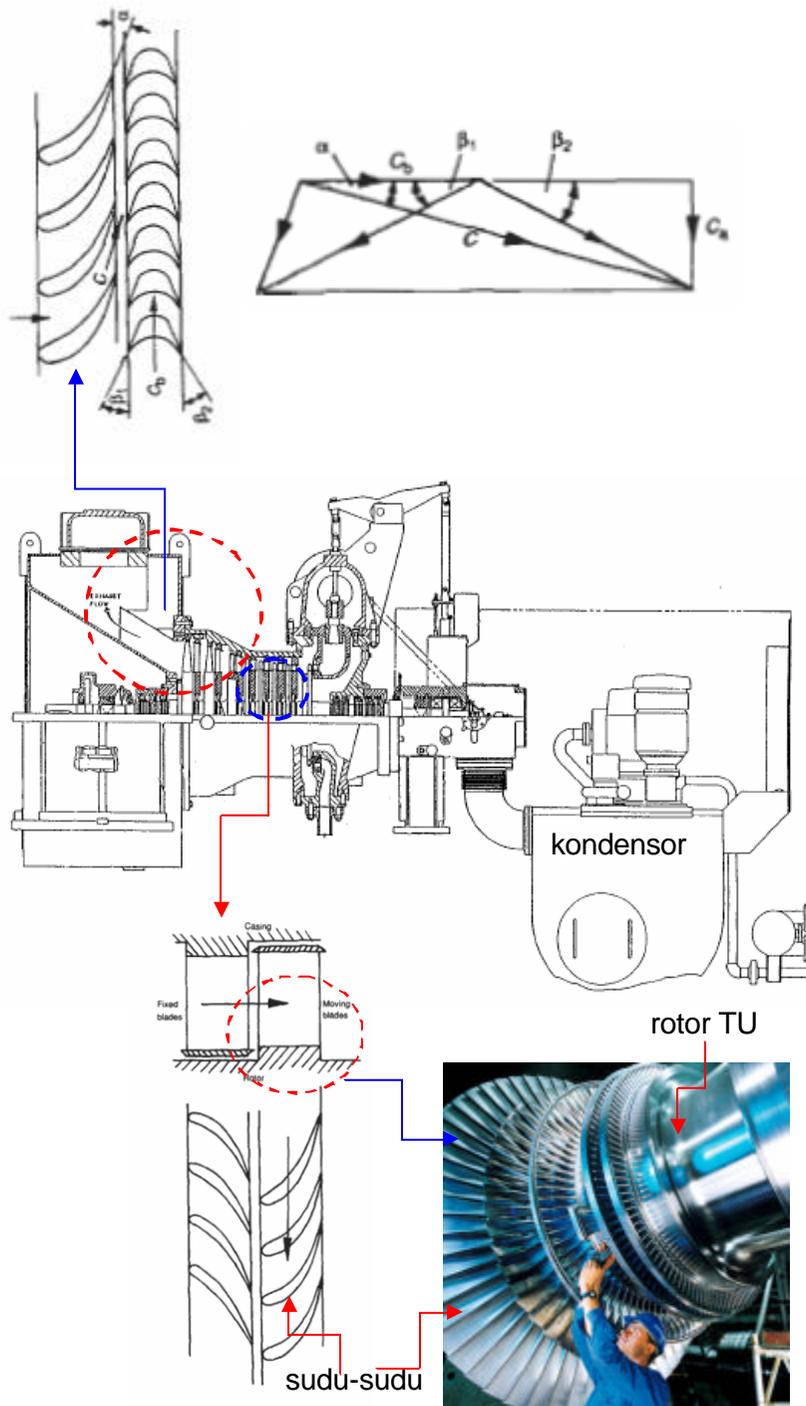
Komponen turbin uap yang paling penting adalah sudu-sudu, karena di sudu-sudu inilah sebagian besar energi uap panas ditransfer menjadi energi mekanik. [gambar 21.12]



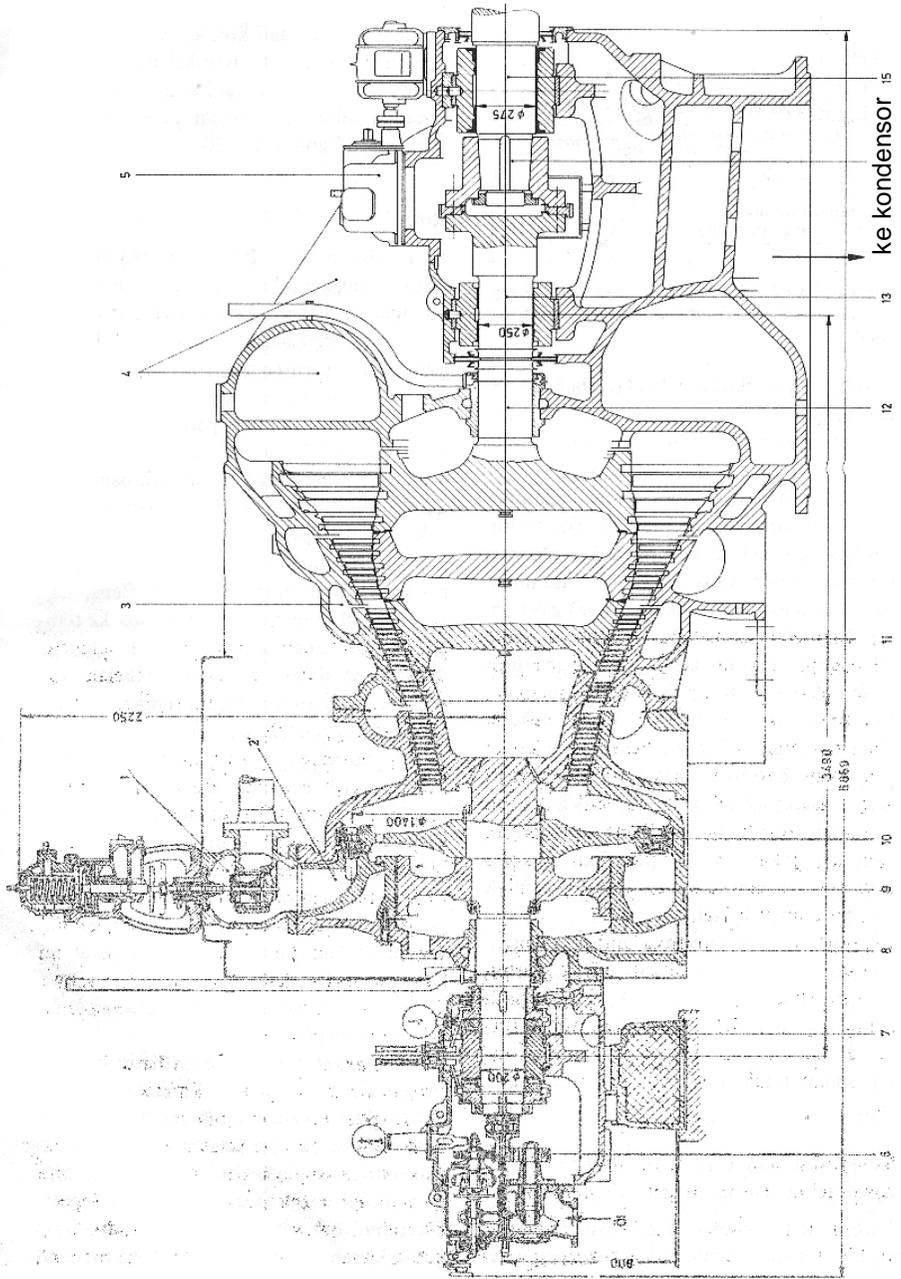
Gambar 19.12 Bentuk sudu-sudu turbin uap



Gambar 19.13 Model susunan sudu sudu pada TU



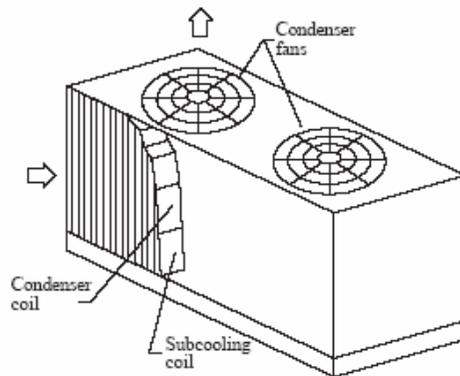
Gambar 19.14 Turbin uap dan profil sudu sudu dengan segitiga kecepatan



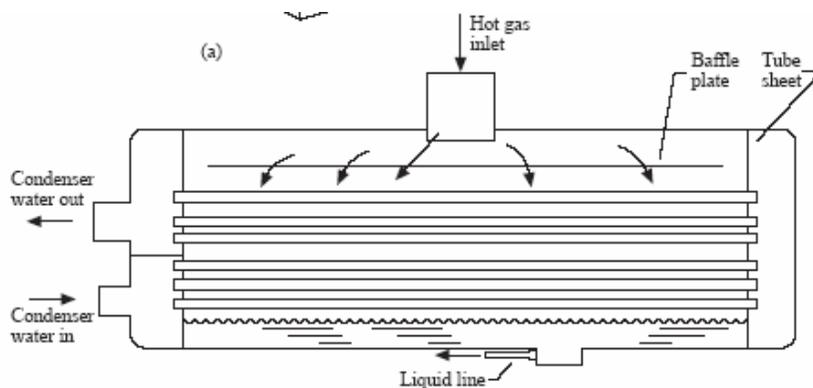
Gambar 19.15 Turbin uap

### C.3. Kondensator

Proses konversi energi dari satu energi menjadi energi lainnya untuk mesin-mesin panas selama transfer energi selalu ada transfer panas pada fluida kerja. Jadi tidak semua energi panas dapat dikonversikan menjadi energi berguna atau dengan kata lain "harus ada yang dibuang ke lingkungan" Pada sistem tenaga uap proses transfer panas ke lingkungan terjadi pada kondensator. Sudah jelas fungsi kondensator adalah alat penukar kalor untuk melepaskan panas sisa uap dari turbin. Uap sisi dari turbin uap masih dalam keadaan uap jenuh dengan energi yang sudah berkurang. Di dalam kondensator semua energi dilepaskan ke fluida pendingin



Gambar 19.16 Kondensator dengan pendingin udara

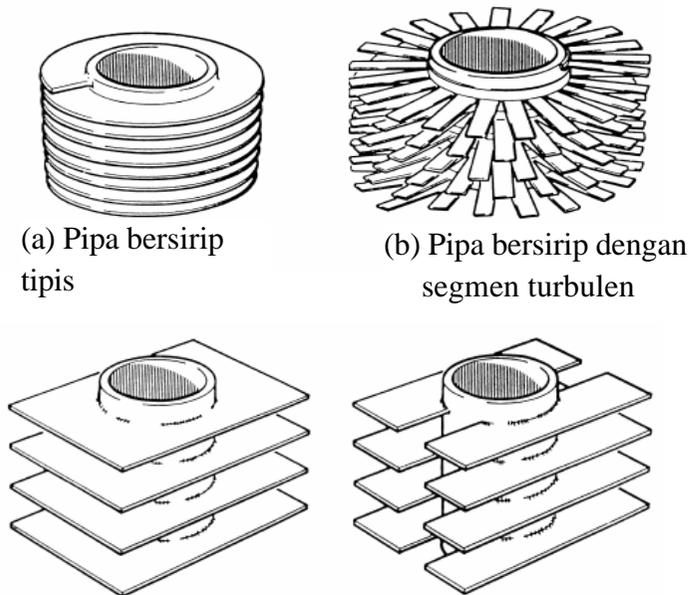


Gambar 19.17 Kondensator dengan pendingin air

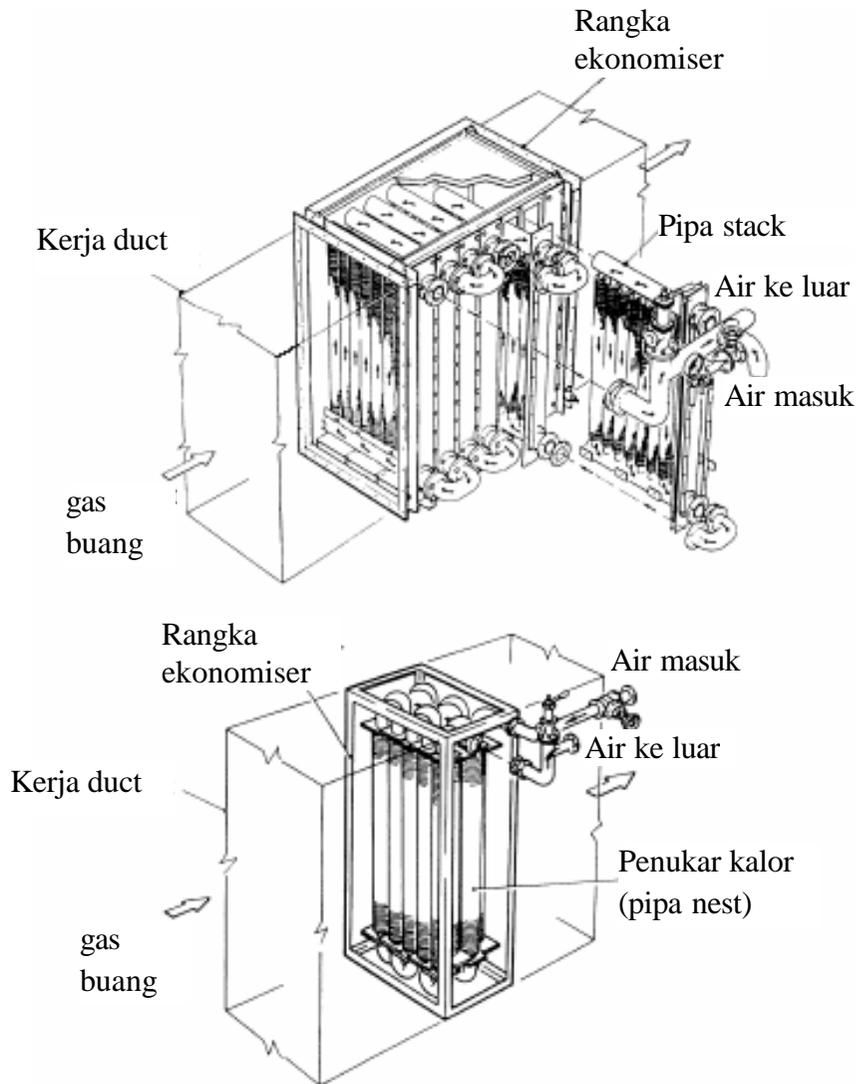
#### D. Ekonomiser

Peralatan tambahan yang sangat penting pada mesin tenaga uap adalah ekonomiser. Ekonomiser adalah sejenis heat exchanger yang terdiri dari fluida air yang akan masuk boiler. Pemasangan ekonomiser pada laluan gas buang dan cerobong asap [gambar 19.16]. Ekonomiser dirancang mempunyai banyak sirip dari material logam untuk memperluas permukaan singgung perpindahan kalor dari gas buang yang bertemperatur tinggi ke fluida air bertemperatur lebih rendah dibanding I

Karena hal tersebut fluida air pada ekonomiser akan mudah menyerap panas dari gas buang dari proses pembakaran. Temperatur air yang ke luar dari ekonomiser lebih tinggi dari temperatur lingkungan sehingga setelah masuk boiler tidak dibutuhkan energi kalor yang besar. Energi kalor yang dibutuhkan hanya untuk menaikkan temperatur dari ekonomiser menjadi temperatur didih boiler. Jadi dengan pemasangan ekonomiser akan menaikkan efisiensi sistem. Karena ekonomiser disinggungkan dengan gas buang yang banyak mengandung zat-zat polusi yang dapat menimbulkan korosi, maka pemilihan material dari ekonomiser bergantung dari jenis bahan bakar yang digunakan pada stoker atau burner [gambar 19.17)



Gambar 19.20 Model sirip sirip pada ekonomiser

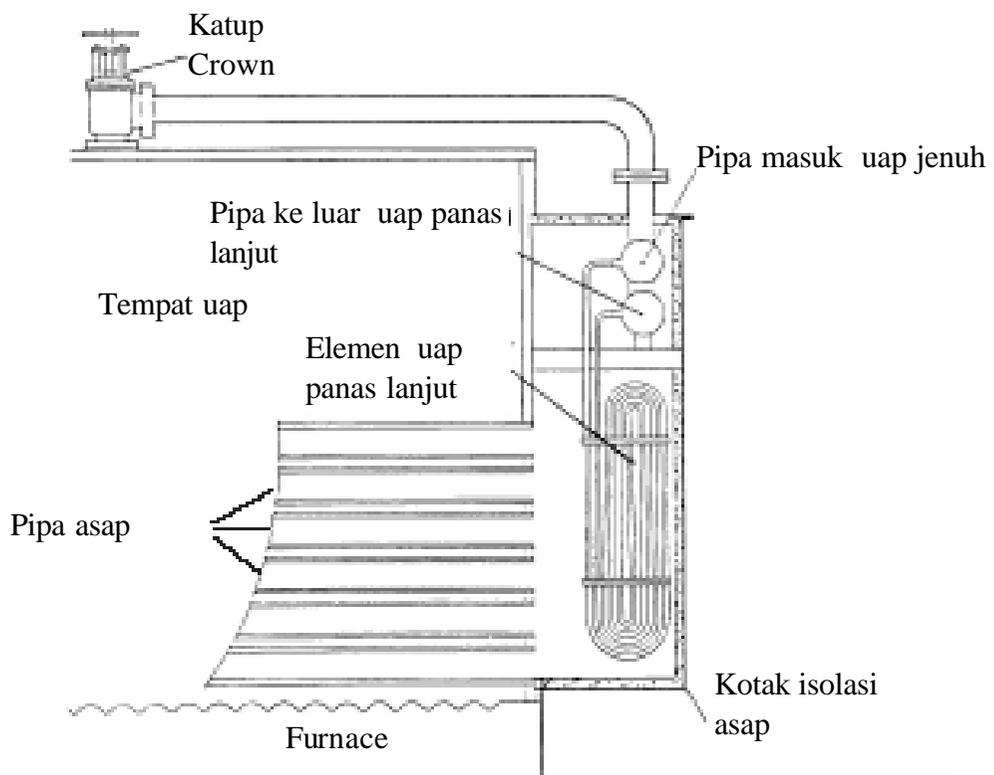


Gambar 19.20 Konstruksi Ekonomiser

### E. Superheater

Kondisi uap dari boiler yang masuk instalasi perpipaan sebelum masuk turbin akan banyak mengalami perubahan terutama kehilangan kalor yang tidak sedikit dan kondensasi sehingga pada waktu masuk turbin energinya tidak maksimal. Untuk mengatasi hal tersebut uap dari boiler dipanaskan kembali sampai kondisi uap panas lanjut. Saluran pipa yang berisi uap jenuh setelah dari boiler dilewatkan ke gas pembakaran sehingga terjadi perpindahan kalor kembali ke uap (gambar). Karena ada kalor yang masuk, temperatur uap jenuh akan naik sampai kondisi uap panas lanjut. Sebagai contoh uap jenuh yang ke luar dari boiler

bertemperatur sekitar 200 C akan naik sampai 540 C dalam kondisi superheated. Dengan kondisi uap panas lanjut yang masuk turbin akan menaikkan efisiensi turbin. Setiap kenaikan 6 C temperatur uap akan mengurangi kebutuhan uap sebesar 1% [gambar 19.18]



Gambar 19.21 Superheater

## F. Burner

Sumber energi kalor atau panas diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran pada mesin tenaga uap terjadi pada *furnace*. Pada *furnace* terdapat burner. *Furnace* ditempatkan menyatu dengan boiler dan terpisah dengan fluida kerja air yang mengalir pada pipa-pipa boiler. Berdasarkan dari jenis bahan bakar yang digunakan, burner diklasifikasikan menjadi tiga yaitu

1. Burner untuk bahan- bakar cair
2. Burner untuk bakar bakar gas
3. Burner untuk bahan bakar padat

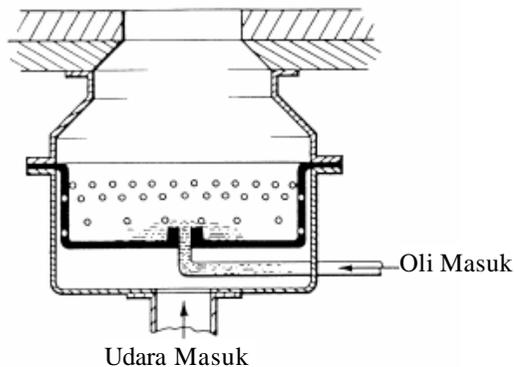
Berbagai macam teknologi telah dikembangkan untuk menaikkan efisiensi dari proses pembakaran. Efisiensi proses pembakaran yang tinggi akan menaikkan efisiensi total dari furnace dan jumlah panas yang ditransfer ke boiler menjadi semakin besar. Furnace harus mudah dikendalikan untuk merespon jumlah uap dengan temperatur dan tekanan tertentu.

### F.1. Burner untuk bahan bakar cair

Burner dengan bahan bakar cair mempunyai permasalahan khusus yaitu proses mixing antara bahan-bakar cair dan udara. Untuk memperbaiki pencampuran bahan-bakar udara, proses pengkabutan harus menjamin terjadi atomisasi yang bagus dari bahan-bakar sehingga udara dapat berdifusi dengan mudah masuk ke bahan bakar. Dari proses tersebut akan tercapai campuran yang lebih homogen. Proses pembakaran akan berlangsung menjadi lebih sempurna. Ada beberapa macam tipe dari burner berbahan bakar cair yaitu sebagai berikut :

#### a. Vaporising burner.

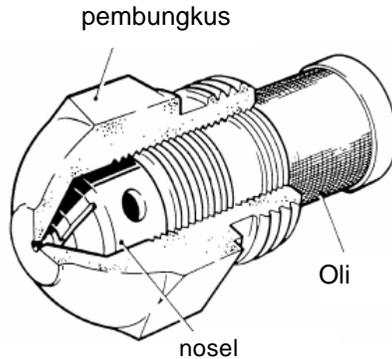
Burner jenis ini menggunakan bahan bakar cair seperti kerosen dan premium. Bahan-bakar diuapkan terlebih dahulu sebelum bercampur dengan udara. Udara didifusikan ke uap bahan-bakar secara alamiah atau dipaksa dengan fan. Burner tipe ini digunakan pada industri-industri skala kecil [gambar 19.22]



Gambar 19.22. Vaporising burner

#### b. Pressure jet burner.

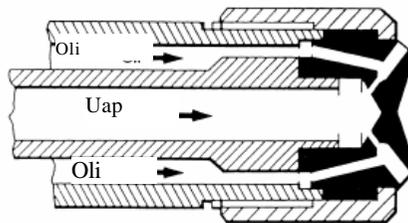
Bahan-bakar cair bertekanan tinggi dimasukkan melalui lubang-lubang dengan posisi tangensial terhadap sumbu nosel, sehingga menghasilkan aliran radial. Di dalam nosel terjadi aliran swirl sehingga diharapkan terjadi atomisasi dengan sempurna, setelah ke luar nosel bahan bakar cair menjadi drople-droplet yang lebih mudah bercampur dengan udara [gambar 16.23]



Gambar 19.23. Pressure jet burner.

### C. Twin fluid atomizer burner.

Proses pengkabutan dari burner model ini dibantu dengan fluida bertekanan, dimana pada waktu proses pengkabutan fluida mempunyai energi kinetik tinggi ke luar dari nosel. Fluida yang sering dipakai adalah udara atau uap bertekanan. Penggunaan uap dianggap lebih menguntungkan. Bahan bakar disemprotkan dengan tekanan tinggi, uap dengan tekanan sedang akan membantu proses pemecahan bahan-bakar menjadi droplet, sehingga pengkabutan lebih bagus [gambar 19.24]



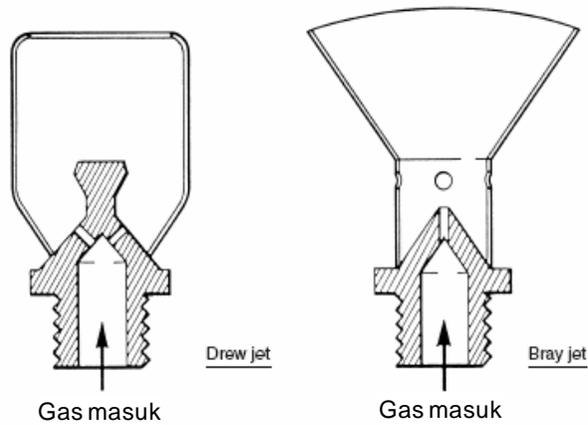
Gambar 19.24 Twin fluid atomizer burner.

### F.2. Burner dengan bahan-bakar gas

Proses pembakaran bahan bakar gas tidak memerlukan proses pengkabutan atau atomisasi, bahan bakar langsung berdifusi dengan udara. Ada dua tipe yaitu

#### a. Non aerated burner.

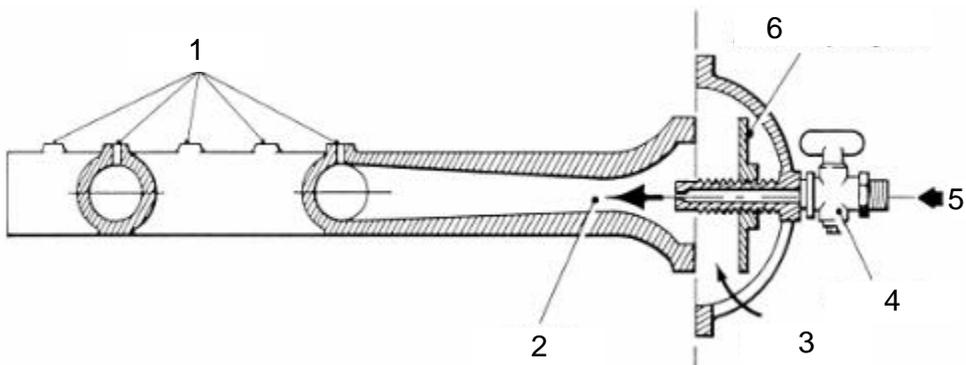
Tipe ini bahan-bakar gas dan udara tidak dicampur dulu sebelum terjadi proses pembakaran. Bahan-bakar gas bertekanan dilewatkan melalui nosel, udara akan berdifusi secara alamiah dengan bahan bakar. Proses pembakaran dengan burner tipe ini dinamakan pembakaran difusi. Dua contoh burner tipe ini yang biasa dipakai dapat dilihat pada gambar 19.25



Gambar 19.25 Non aerated burner

**b. Aerated burner.**

Bahan bakar gas dan udara dicampuri dulu sebelum terjadi proses pembakaran. Pada burner tipe ini selalu ada pengaman untuk mencegah nyala balik kesumber campuran bahan-bakar udara. Jenis burner ini yang paling umum adalah model bunsen [gambar 19.26]



No	Nama komponen
1	lubang burner
2	venturi
3	udara masuk
4	katup kontrol
5	gas (bahan bakar) masuk
6	plat pengatur pengkabutan

Gambar 19.26 Aerated burner.

### F. 3. Burner untuk bakar padat.

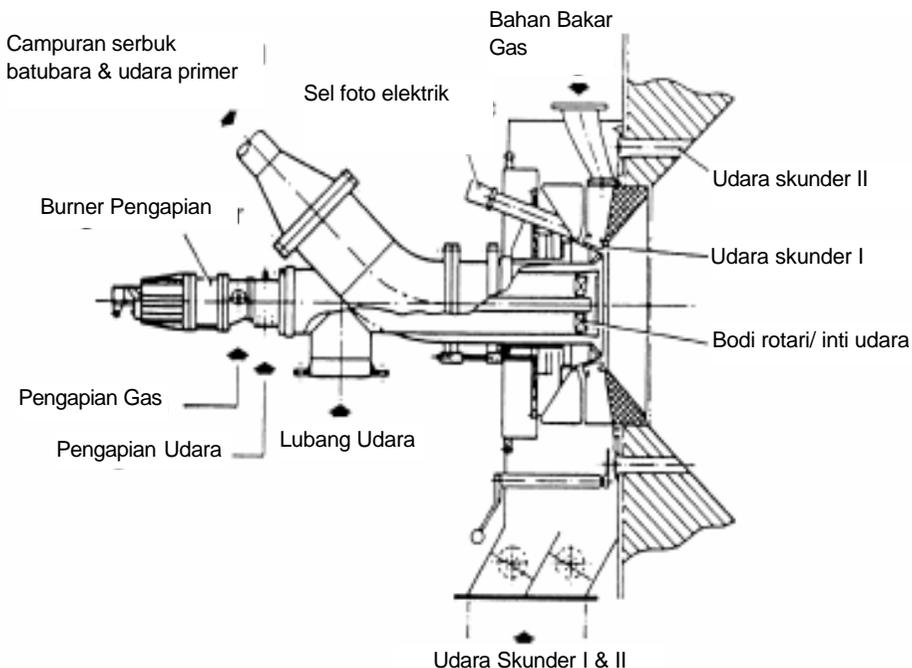
Bahan bakar padat merupakan bahan bakar yang sangat belimpah di alam. Bahan bakar ini harus melalui proses yang lebih rumit daripada jenis bahan-bakar lainnya untuk terbakar. Bahan bakar padat mengandung air, zat terbang, arang karbon dan abu. Air dan gas terbang yang mudah terbakar harus diuapkan dulu melalui proses pemanasan,, sebelum arang karbon terbakar.

Bahan bakar padat banyak dipakai sebagai sumber energi pada mesin tenaga uap. Bahan-bakar tersebut dibakar di furnace dengan stoker atau dengan burner. Ada beberapa tipe burner atau stoker yang dipasang di furnace seperti berikut ini :

#### 1. *Pulvizer fuel burner.*

Bahan-bakar padat akan dihancurkan lebih dahulu dengan alat pulvizer sampai ukuran tertentu sebelum dicampur dengan udara. Selanjutnya campuran serbuk batu bara dan udara diberi tekanan kemudian disemprotkan menggunakan difuser.

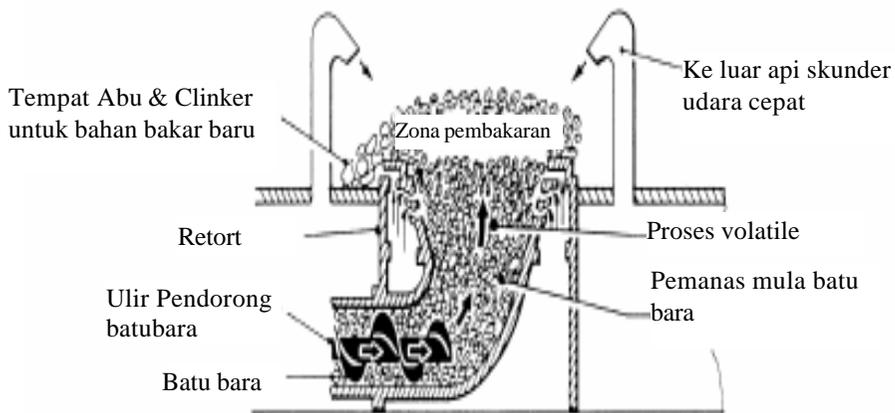
Proses pembakaran dibantu dengan penyalaan dengan bahan-bakar gas atau cair untuk menguapkan air dan zat terbang. Udara tambahan diperlukan untuk membantu proses pembakaran sehingga lebih efisien. Burner tipe ini dapat dilihat pada gambar 19.27



Gambar 19.27 *Pulvizer fuel burner.*

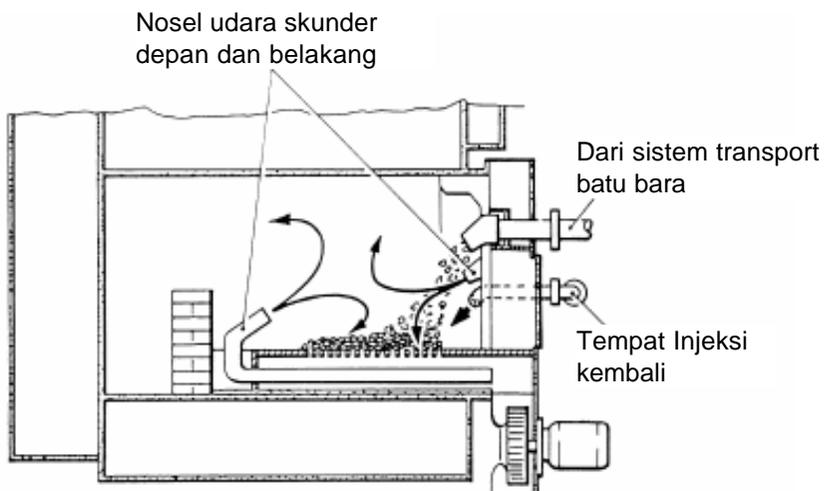
## 2. Underfeed stoker

Stoker jenis ini banyak dipakai untuk industri skala kecil, konstruksinya sederhana. Bahan-bakar di dalam berupa batu bara dimasukkan ke perapian dengan dengan srew pengumpan. Proses pembakaran terjadi di dalam retort, batu bara akan dipanaskan untuk menguapkan air dan zat terbang kemudian arang terbakar. Sisa pembakaran berupa abu akan digeser ke luar karena desakan batu bara baru yang belum terbakar. Udara tambahan digunakan untuk membantu proses pembakaran sehingga lebih efisien [gambar 19.28]



Gambar 19.28. Underfeed stoker

## 3. Fixed grate burner



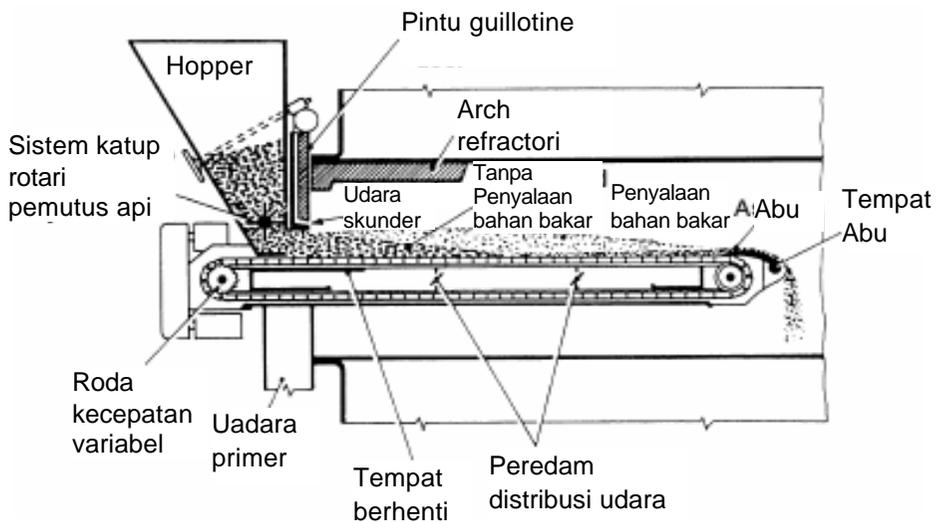
Gambar 19.29 Fixed grate burner

Tempat pembakaran berbentuk plat yang memungkinkan udara utama dapat mengalir dari bawah. Serbuk batu bara dari pulverizer dipindahkan menuju burner dengan udara berkecepatan sedang dengan pipa pengumpan. Proses pembakaran dibantu dengan udara tambahan dari saluran saluran udara sekunder.

Ada dua tipe yang umum dipakai yaitu front feed dan top feed fixed grate burner. Sisa pembakaran yang berupa abu dibersihkan secara manual atau dirancang secara otomatis [gambar 19.29]

#### 4.Chain grate stoker

Serbuk batu bara diumpankan dari hopper dengan katup rotari ke grate berjalan, kapasitasnya dibatasi dengan menggunakan plat geloutin. Rotari vane juga digunakan untuk mencegah nyala balik dari grate berjalan ke hopper. Grate berjalan dapat divariasikan kecepatannya. Udara pembakaran dilewatkan dari sela-sela grate dan udara tambahan dilewatkan melalui permukaan atas lapisan serbuk batu bara pada grate [gambar 19.30]

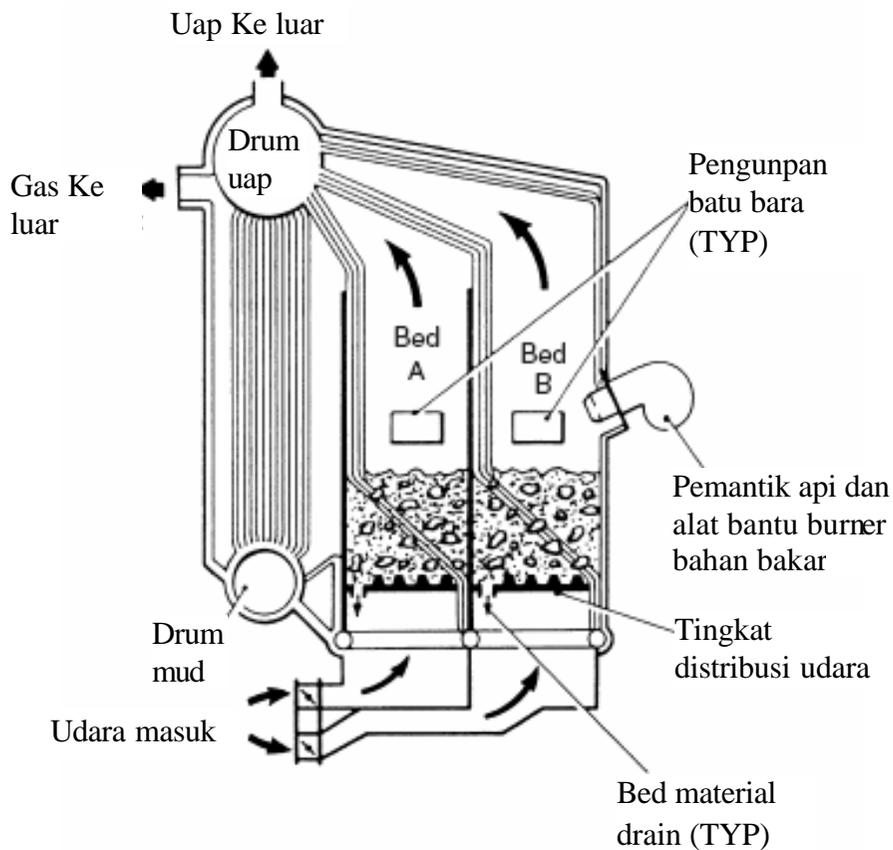


Gambar 19.30.Chain grate stoker

#### 5.Fluidized bed stoker

Bahan bakar berupa serbuk batu bara dikondisikan seperti fluida. Serbuk batu bara terangkat ankat dari grate karena desakan dari udara bertekanan dari bagian bawah grate. Udara bertekanan disuplai dari kompresor. Proses pembakaran terjadi sangat cepat, dibantu dengan penyalan dengan bahan-bakar gas atau cair. Temperatur pembakaran tidak boleh melebihi dari temperatur leleh dari abu, sehingga tidak terjadi penyumbatan di grate oleh lelehan dari abu. Abu akan turun ke penampung abu di bagian bawah. Serbuk batu bara diumpankan dari

feeder. Untuk mencegah emisi gas ke luar ditambahkan limestone atau zat lainnya untuk menetralkan zat polusi seperti sulfat dan nitrat [gambar 19.31]



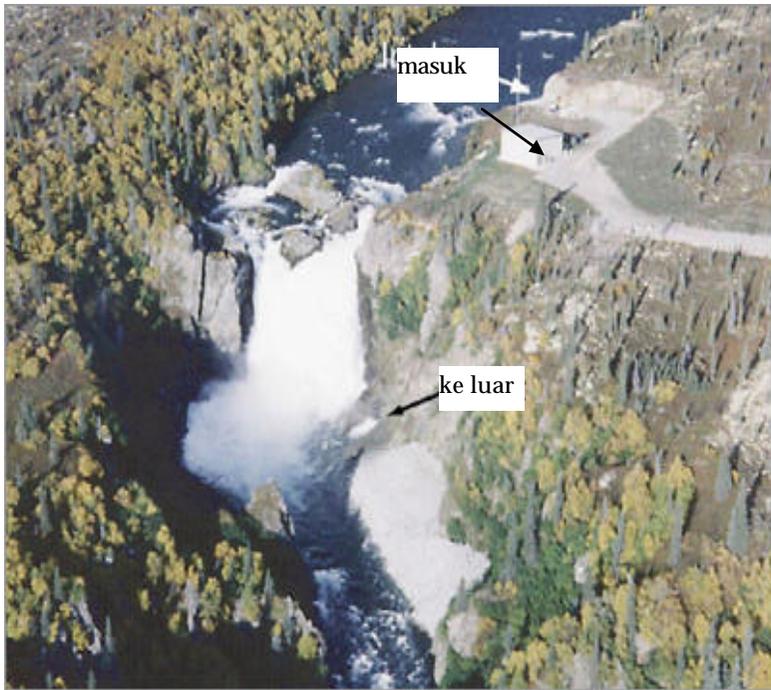
Gambar 19.31. Fluidized bed stoker

## BAB 20 PRINSIP DASAR ALIRAN

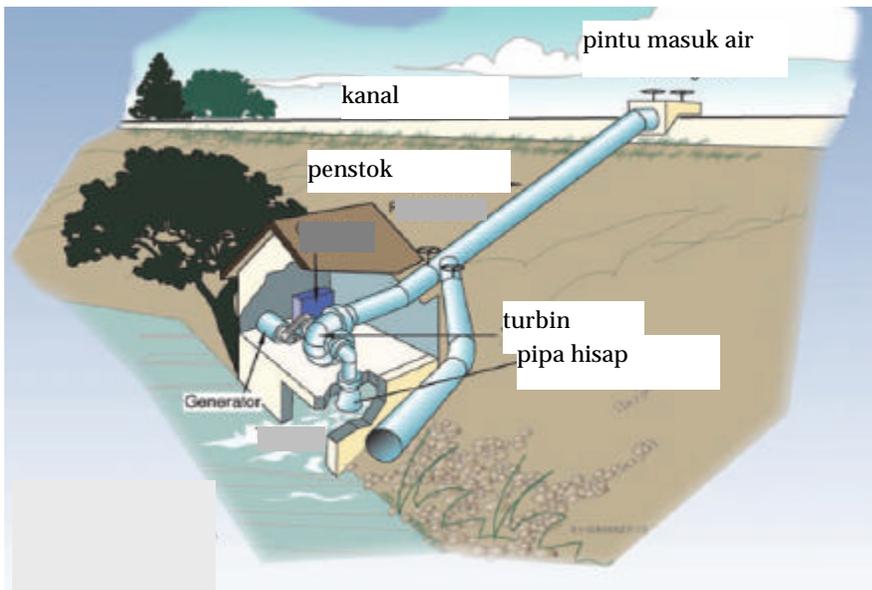
Indonesia mempunyai potensi sumber daya alam yang besar yang dapat dimanfaatkan, khususnya sumber daya air yang sangat berlimpah. Air yang tersimpan di danau, waduk atau yang mengalir di sungai, mempunyai energi potensial yang besar dan dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin air [gambar 20.1, 20.2, 20.3]. Dengan membangun bendungan-bendungan pada tempat-tempat yang tinggi, misalnya di pegunungan-pegunungan, air dapat diarahkan dan dikumpulkan pada suatu tempat, tempat tersebut dinamakan waduk atau danau buatan. Dengan memanfaatkan beda tinggi, air dapat dialirkan melalui saluran saluran ke turbin air, yang dipasang di bawah waduk.



Gambar 20.1 Waduk sebagai sumber energi potensial air



Gambar 20.2 Instalasi Turbin air pada aliran sungai



Gambar 20.3 Instalasi pembangkit listrik tenaga air (*Micro Hydro*)

Sebagai contoh pada gambar 20.3 terlihat di bawah waduk dibangun rumah pusat tenaga, di dalam rumah tersebut terdapat turbin pelton dengan sudu-sudunya, yang menerima semprotan air dari nosel-nosel, sehingga roda turbin berputar. Air dari turbin kemudian dialirkan ke sungai. Air waduk mempunyai beda tinggi  $H$ , sehingga air mempunyai energi potensial, yang akan mengalir sampai ke turbin air. Pada sudu-sudu turbin, energi aliran diubah menjadi energi mekanik yaitu putaran roda turbin. Apabila roda turbin dihubungkan dengan poros generator listrik, maka energi mekanik putaran roda turbin diubah menjadi energi listrik pada generator.

Dari uraian di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa turbin air akan mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik, yaitu putaran roda turbin. Pada kondisi aktual, tidak semua energi potensial air dapat diubah menjadi energi mekanik pada turbin, pasti dalam proses perubahan terdapat kerugian-kerugian. Dari hal tersebut dapat didefinisikan efisiensi dari turbin yaitu perbandingan daya pada turbin dengan daya air pada waduk. Adapun perumusannya adalah ;

$$h = \frac{\text{daya keluaran mekanik}}{\text{daya air pembangkit waduk}}$$

Air dari waduk akan mengalir dengan kapasitas tertentu dalam saluran yang menuju turbin. Pada turbin air terdapat pengaturan kapasitas untuk memvariasi kapasitas aliran. Pengaturan kapasitas aliran masuk turbin dimaksudkan untuk merespon beban dan perubahan *head*. Perubahan *head* pada waduk terjadi karena curah hujan tidak sama sepanjang tahun. Di Indonesia yang beriklim tropis terdapat dua musim yaitu musim kemarau dan penghujan. Pada musim kemarau *head* pada kondisi paling rendah dan sebaliknya pada musim penghujan *head* paling tinggi

Disamping turbin pelton untuk pembangkitan seperti di atas, dapat digunakan jenis turbin air lainnya. Dengan menggunakan dasar mekanika fluida kita dapat menentukan energi potensial aliran, daya turbin, dan karakteristik turbin air lainnya.

### **Contoh soal 1**

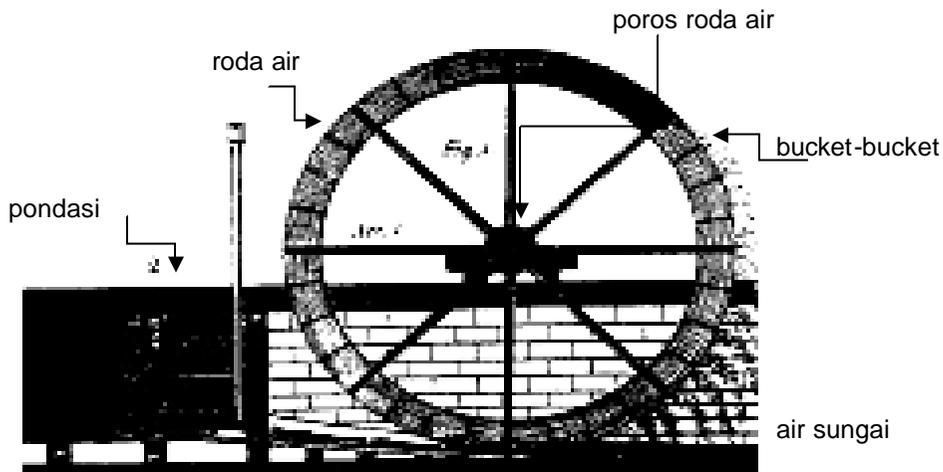
Dengan kapasitas tertentu dan head tertentu sebuah pembangkit listrik tenaga air mempunyai daya air sebesar  $P = 180000 \text{ KW}$ , sedangkan daya yang dihasilkan turbin adalah  $P = 160000 \text{ KW}$ . Hitung efisiensi turbin tersebut !.

**Jawab :**

Efisiensi turbin adalah perbandingan daya turbin dengan daya air. Dari rumus efisiensi turbin yaitu  $\frac{160000 \text{ KW}}{180000 \text{ KW}} = 0,888$ .

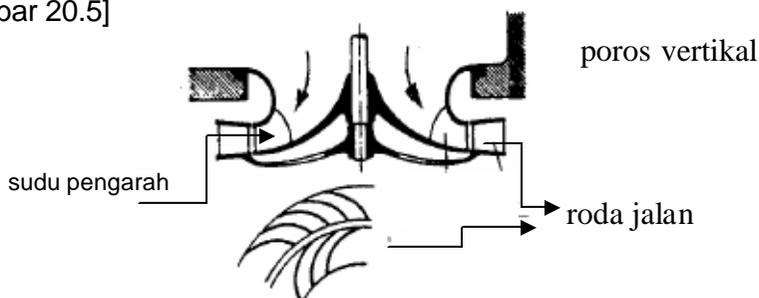
## A. Sejarah Turbin Air

Orang Cina dan Mesir kuno sudah menggunakan turbin air sebagai tenaga penggerak. Pada gambar 20.4 adalah contoh turbin air paling kuno, biasa dinamai roda air. Roda air dengan poros horizontal dipasang pada aliran sungai, sebagian dari roda air dimasukan ke aliran sungai, sehingga *buket-bucket* terisi air dan terdorong. Karena dorongan itulah roda air berputar. Karena teknologinya masih kuno, roda air hanya menghasilkan daya rendah dengan efisiensi rendah.



Gambar 20.4 Roda air kuno

Perkembangan teknologi turbin kelihatan berkembang cepat mulai abad 18 dan 19. Daya dan efisiensi turbin yang dihasilkan semakin tinggi dan sejak saat itu, turbin mulai diproduksi komersial di industri-industri. Pada tahun 1750, J.A. Segner membuat roda jalan dimana roda jalan ini menerima gaya impuls dari jet air sehingga dapat memutar turbin. Pada tahun 1824, Burdin orang Prancis, mengenalkan desain turbinnya untuk desertasi, selanjutnya pada tahun 1827, Fourneyron membuat turbin dengan diameter roda jalan 500 mm, dapat menghasilkan daya 20 - 30 kW [gambar 20.5]

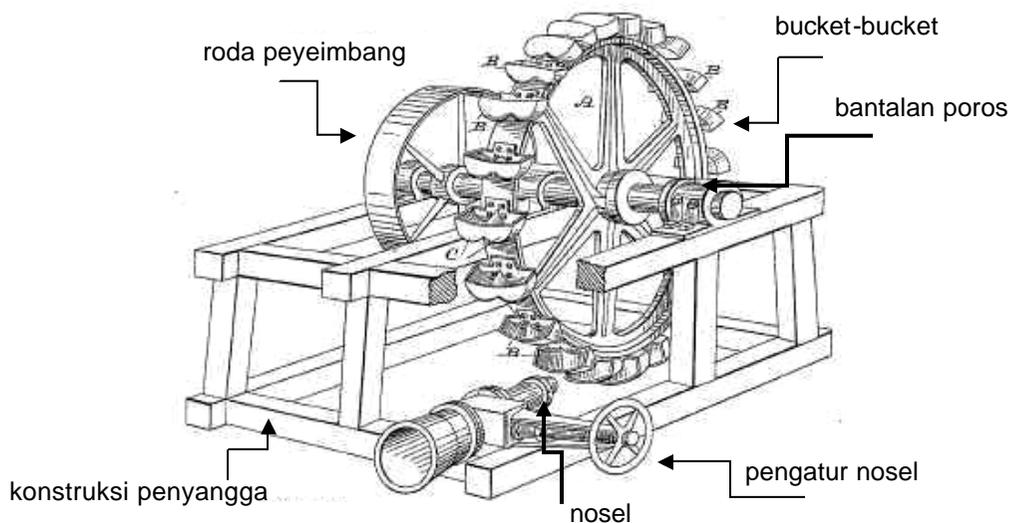


Gambar 20.5 Turbin Fourneyron

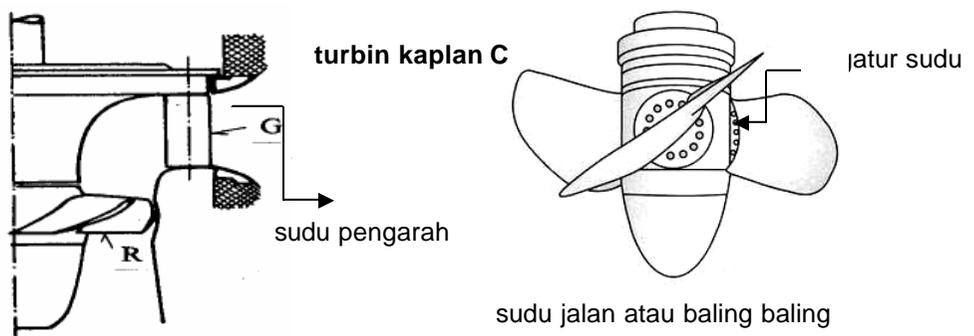
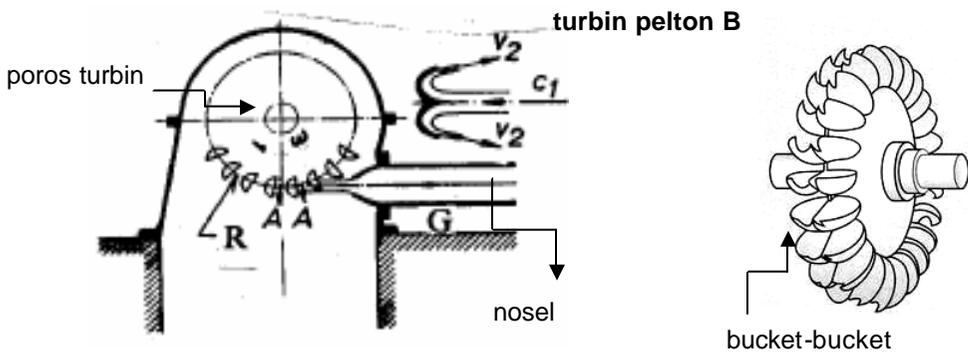
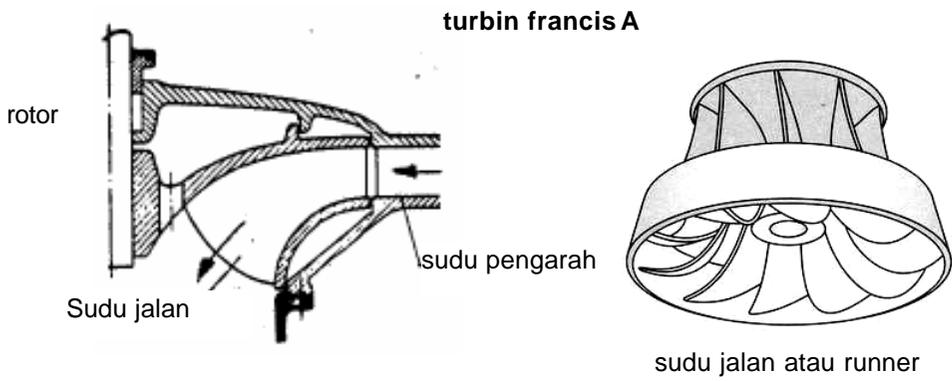
Pada tahun 1850, seorang insinyur Inggris yaitu Francis mengenalkan teknologi turbinnya, turbin ini kemudian dinamakan menggunakan namanya yaitu Francis. Turbin francis terdiri dari sudu pengarah dan roda jalan, Aliran air masuk turbin melalui sudu pengarah, selanjutnya masuk roda jalan. Pada tahun 1870, Prof Fink memperbaiki turbin francis, yaitu dengan memodifikasi sudu pengarahnya. Sudu pengarah dapat diatur untuk merespon kapasitas aliran air yang masuk turbin [gambar 20.7 A]

Pada tahun 1890, insinyur Amerika yaitu Pelton, mengenalkan turbinnya, yang kemudian dinamakan menggunakan namanya pelton. Prinsip turbin ini berbeda dengan turbin francis, turbin pelton menggunakan prinsip impuls. Roda jalan pada turbin ini terdiri dari *bucket-bucket* yang akan menerima semprotan air dari nosel-nosel. Karena semprotan air dari nosel, *bucket -bucket* pada roda jalan menerima gaya impuls sehingga dapat menghasilkan torsi pada poros turbin [gambar 20.6, 22.7 B]

Prof Kaplan pada tahun 1913 membuat turbin untuk beroperasi pada head yang rendah. Turbin ini terdiri dari roda jalan dengan sudu yang mirip dengan baling baling. Selanjutnya prof Kaplan mengembangkan turbin ini dengan sudu yang dapat diatur. Nama turbin menggunakan namanya yaitu Turbin Kaplan [gambar 20.7 A]



Gambar 20.6 Turbin Fourneyron

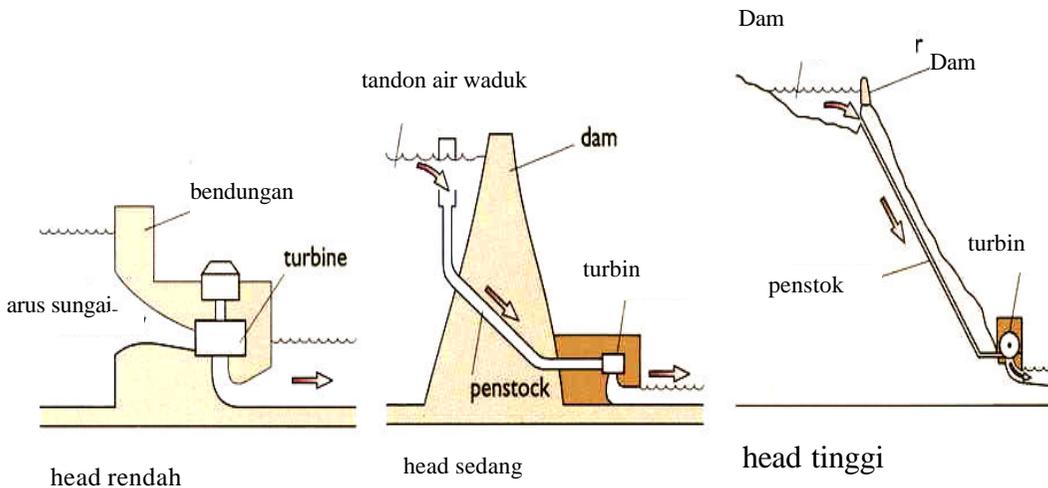


Gambar 20.7 Tipe turbin air yang paling populer

## B. Instalasi Pembangkit Tenaga Air

Sebelum melakukan pembangunan pusat pembangkit listrik tenaga air, diperlukan uji kelayakan terhadap sumber air yang akan dimanfaatkan energi potensialnya. Terutama ketersediaan head dan kapasitas terpenuhi dari bendungan atau waduk untuk beban yang dirancang. Ada beberapa kategori head tersedia yang diklasifikasikan sebagai berikut [gambar 20.8];

1. head tinggi ( lebih dari 240 m)
2. head sedang ( 30 m to 240 m)
3. head rendah ( kurang dari 30 m )



Gambar 20.8 Tingkat head sumber air

Setelah mengetahui ketersediaan head yang ada, selanjutnya menentukan jenis turbin dan beban yang terpasang. Beban yang terpasang atau daya ke luaran yang direncanakan tidak boleh melampaui dari ketersediaan energi potensial air, karena efisiensi maksimum operasi tidak akan tercapai dan dari segi ekonomis merugikan. Berikut ini klasifikasi dari jenis pembangkit dilihat dari daya ke luaran turbin ;

1. **Large-hydro**; daya ke luaran sampai 100 MW
2. **Medium-hydro**; daya ke luaran mulai 15 - 100 MW
3. **Small-hydro**; daya ke luaran mulai 1 - 15 MW
4. **Mini-hydro** daya ke luaran mulai 100 kW- 1 MW
5. **Micro-hydro** ; daya ke luaran sampai dari 5kW - 100 kW
6. **Pico-hydro** ; daya ke luaran sampai 5kW

Adapun bagian bagian yang penting dari instalasi dari pembangkit listrik tenaga air adalah sebagai berikut [Gambar 20.9] ;

#### **A. Pintu air**

Bagian ini terletak pada pinggir bendung dan akan mengontrol kondisi air yang akan dialirkan. Air yang ke luar harus dijamin bersih dari sampah-sampah seperti batang dan ranting pohon, batu dan kerikil ayau sampai lainnya yang dapat membahayakan instalasi. Pada pintu air juga harus dapat menghentikan laju aliran air, apabila saluran harus dikosongkan.

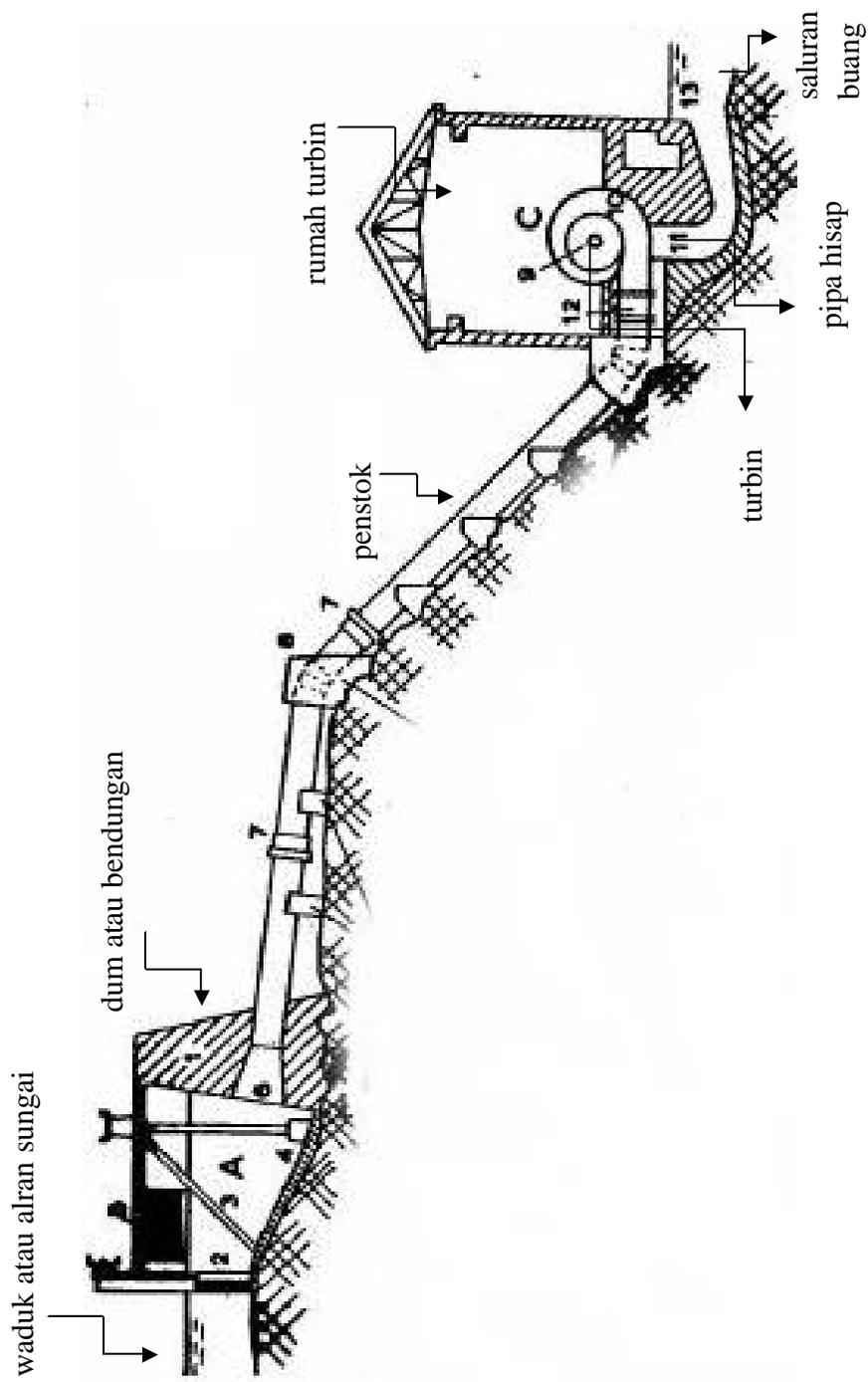
#### **B. Saluran air atau conduit sistem**

Bagian ini berfungsi menyalurkann air dari bendungan menuju turbin. Bentuk saluran dapat berbentuk saluran terbuka, *pressure shaft*, *tunnel*, atau *penstock*. Saluran ini dibuat dengan cara penggalian atau pengeboran, dindingnya dengan dinding batu. Material penstock dari baja

#### **C. Turbin**

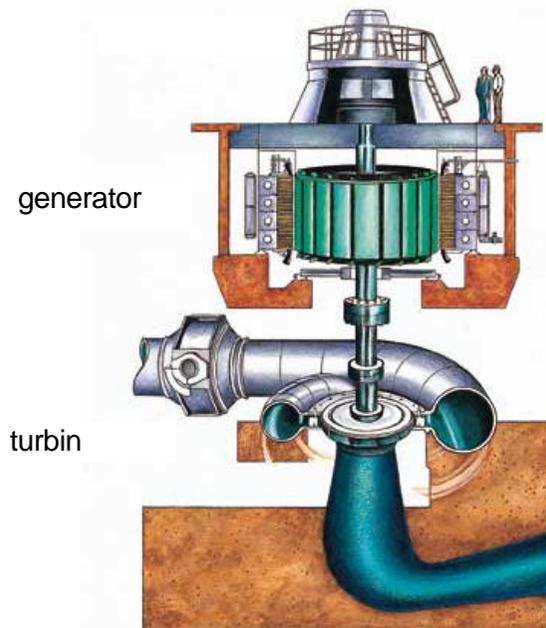
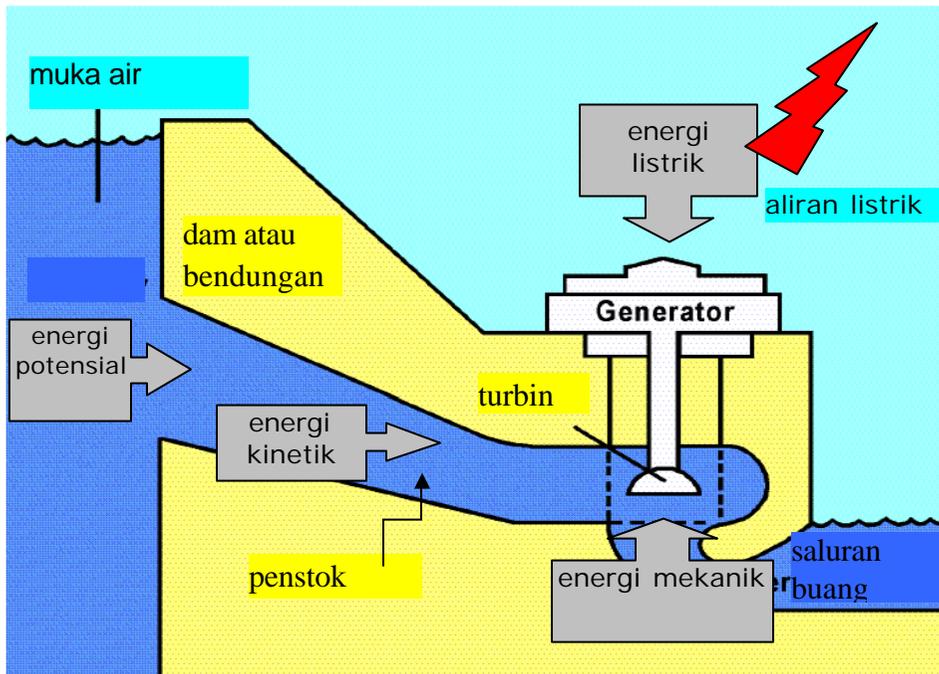
Turbin berfungsi mengubah energi potensial fluida menjadi energi mekanik yang kemudian diubah lagi menjadi energi listrik pada generator. Komponen-komponen turbin yang penting adalah sebagai berikut ;

- **Sudu pengarah**, biasanya dapat diatur untuk mengontrol kapasitas aliran yang masuk turbin
- **Roda jalan** atau runner turbin, pada bagian ini terjadi peralihan ari energi potensial fluida menjadi energi mekanik
- **Poros turbin**, pada poros turbin terdapat runner dan ditumpu dengan
- **bantalan radial** dan bantalan axial
- **Rumah turbin**, biasanya berbentuk keong atau spiral, berfungsi untuk mengarahkan aliran masuk sudu pengarah
- **Pipa hisap**, mengalirkan air yang ke luar turbin ke saluran luar



Gambar 20.9 Instalasi turbin air

### C. Energi Potensial Aliran Air



Gambar 20.10 Perubahan energi pada instalasi turbin air

Air yang mengalir melalui saluran mempunyai energi dan energi tersebut dapat diubah bentuknya [gambar 20.10], adapun perubahan bentuk energinya oleh Bernoulli dirumuskan sebagai berikut ;

$$W = m \cdot g \cdot z + m \frac{p}{\mathbf{r}} + m \frac{c^2}{2} \text{ (Nm)}$$

Jadi selama mengalir, energi potensial dapat berubah bentuk menjadi bentuk lainya yaitu energi potensial, energi tekanan, dan energi kecepatan.

### C.1. Head air

Apabila ruas kanan dan kiri dibagi dengan  $mg$ , maka persamaan di atas menjadi persamaan tinggi jatuh atau head ;

$$H = z + \frac{p}{\mathbf{r} \cdot g} + \frac{c^2}{2g} = \text{konstan}$$

dimana  $H$  = tinggi jatuh air atau head total (m)

$z$  = tinggi tempat atau head potensial (m)

$\frac{p}{\mathbf{r} \cdot g}$  = tinggi tekan atau head tekan (m)

$\frac{c^2}{2g}$  = tinggi kecepatan atau head kecepatan (m)

Pada tiap saat dan posisi yang ditinjau dari suatu aliran di dalam pipa akan mempunyai jumlah energi ketinggian tempat, tekanan, dan kecepatan yang sama besarnya. Persamaan Bernoulli umumnya ditulis dalam bentuk persamaan ;

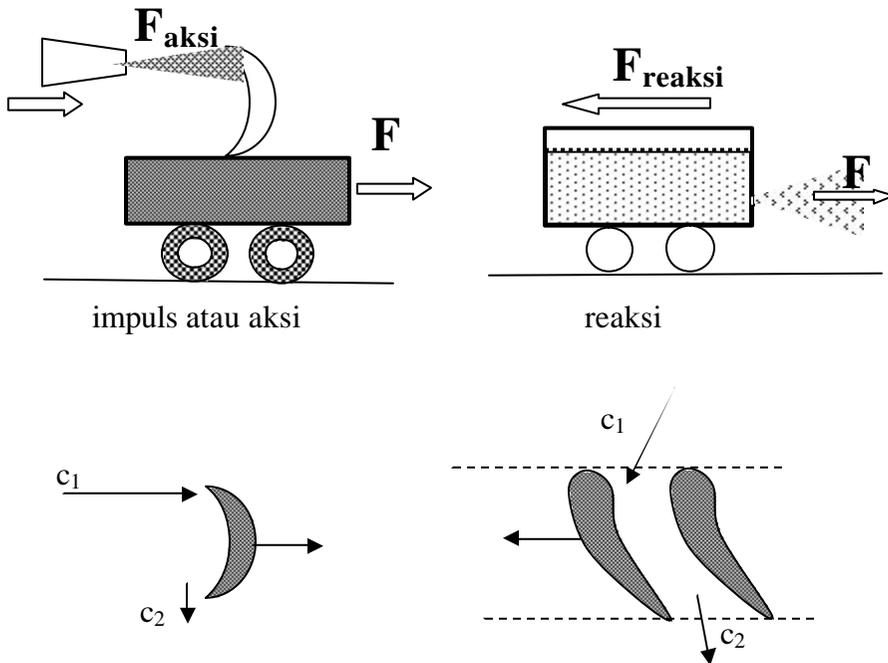
$$z_1 + \frac{p_1}{\mathbf{r} \cdot g} + \frac{c_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\mathbf{r} \cdot g} + \frac{c_2^2}{2g}$$

Arti dari persamaan di atas adalah pada posisi satu pada gambar 20.10 aliran air akan mempunyai kecepatan dan tekanan tertentu, perubahan energi terjadi karena terjadi perubahan penampang. Karena luas penampang menjadi kecil, kecepatan aliran airnya naik, sedangkan tekanannya menjadi turun. Jadi posisi dua energi kecepatannya lebih besar dari pada posisi satu, dan energi tekanan pada posisi 2 lebih kecil dibanding posisi satu.

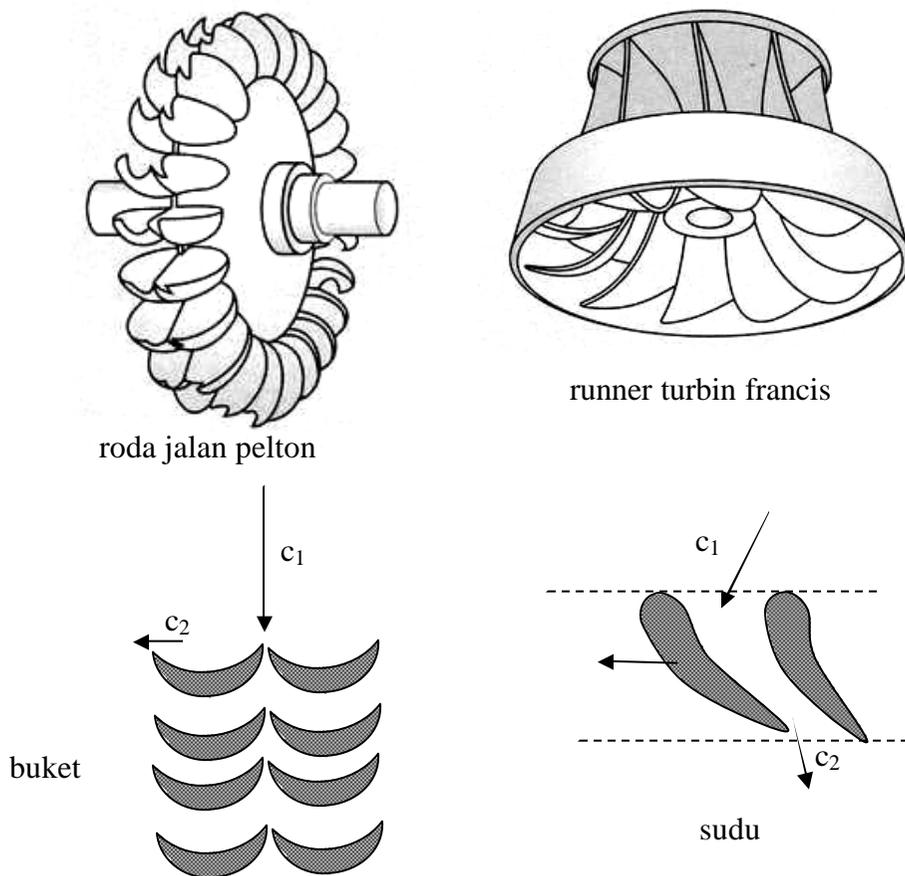
## D. Prinsip Peralian Energi Aliran

Aliran zat cair akan mengalami perubahan energi dari bentuk satu ke bentuk lainnya. Pada persamaan Bernoulli terlihat aliran mempunyai energi tempat, tekan dan energi kecepatan. Proses perubahan energi dari energi aliran menjadi energi mekanik dapat dilihat pada gambar 20.11. Dari gambar tersebut menunjukkan model perubahan ada dua cara yaitu prinsip impuls dan prinsip reaksi.

Prinsip impuls dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada gambar 20.11 adalah sebuah papan beroda sehingga dapat berjalan, pada papan dipasang sudu. Apabila sudu disemprot air, aliran air akan menumbuk sudu dengan gaya impuls  $F$ , dan sudu akan terdorong dengan arah yang sama dengan gaya yang bekerja, maka papan akan berjalan searah dengan gaya  $F$ . Jadi gerakan papan searah dengan gaya yang beraksi pada sudu. Ini adalah prinsip dasar dari turbin impuls.



Gambar 20.11 Prinsip impuls dan reaksi



Gambar 20.12 Prinsip impuls dan reaksi pada roda jalan pelton dan francis

Prinsip reaksi dapat dijelaskan sebagai berikut. Turbin akan berputar karena dilewati air dari bejana, artinya sudu turbin akan bereaksi dengan gaya yang berlawanan arah dengan gaya yang diberikan aliran air.

### E. Daya Turbin

Bila diketahui kapasitas air dan tinggi air jatuh  $H$ , dapat ditentukan daya turbin  $P$  ( kW) yaitu ;

$$P = Q \cdot r \cdot g \cdot H \text{ [daya potensial air]}$$

- dimana  $P$  = daya (potensial air) turbin (kW)  
 $Q$  = kapasitas atau debit air ( $\text{m}^3/\text{dtk}$ )  
 $g$  = percepatan gravitasi ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )  
 $H$  = tinggi jatuh air (m)

massa aliran dapat dihitung dengan persamaan ;

$\dot{m} = Q \cdot r$  dimana  $\dot{m}$  = adalah laju aliran masa ( kg/dtk)  
 perhitungan daya persamaan di atas dapat diubah menjadi

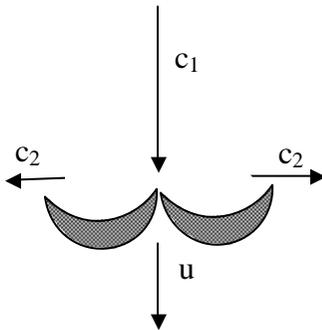
$$P = \dot{m} \cdot g \cdot H \text{ atau}$$

$$P = \dot{m} \cdot Y \quad Y = \text{kerja spesifik (J/kg)} \quad Y = g \cdot H$$

Daya potensial air pada instalasi apabila dikalikan dengan efisiensi turbin air terpasang maka daya turbin dengan tinggi jatuh air sebesar H adalah

$$P = Q \cdot r \cdot g \cdot H \cdot h_T \text{ dengan } h_T = \text{efisiensi turbin}$$

dari perumusan terlihat bahwa daya turbin sangat bergantung dari besar kapasitas aliran air dan tinggi jatuh air.



$c_1$  = kecepatan absolut masuk  
 $u$  = kecepatan roda turbin  
 $c_2$  = kecepatan absolut ke luar

Daya yang dihasilkan dari proses konversi energi pada sudu-sudu turbin adalah :

$$P = Q \cdot r \cdot (u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}) \text{ [daya poros turbin]}$$

dengan  $c_{1u}$  = kecepatan absolut masuk arah  $u$

$c_{2u}$  = kecepatan absolut ke luar arah  $u$

apabila daya potensial air dan daya poros turbin bila disamakan akan didapat persamaan :

$$P = Q \cdot r \cdot (u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}) = Q \cdot r \cdot g \cdot H \cdot h_T$$

$$(u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}) = g \cdot H \cdot h_T$$

$$H = \frac{(u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u})}{g h_T} \text{ [head turbin]}$$

Secara sederhana dapat dinyatakan bahwa semakin tinggi tinggi jatuh air, dengan kapasitas aliran sama, akan mempunyai energi potensial

yang lebih besar dibandingkan dengan tinggi jatuh air yang lebih rendah. Logika tersebut juga berlaku sebaliknya, yaitu untuk tinggi jatuh air yang sama, energi potensial yang dimiliki akan lebih besar apabila kapasitas aliran air juga besar.

Untuk menentukan luas penampang saluran aliran air masuk turbin dapat dihitung dengan persamaan kontinuitas yaitu ;

$$Q = A \cdot v \text{ sehingga } A = \frac{Q}{v}$$

dimana A = luasan penampang saluran ( $m^2$ )  
 $v$  = kecepatan aliran air (m/dtk)

Kecepatan aliran air akan besar pada penampang yang semakin kecil, pada kapasitas aliran air yang sama. Adapun kecepatan pancaran air yang ke luar dari nosel (turbin pelton) adalah :  $c_1 = \sqrt{2gH}$  m/s

diameter pancaran air

$$d = 0,54 \sqrt{\frac{Q}{H^{0,5}}} \text{ m}$$

## F. Kecepatan Putar Turbin dan Kecepatan Spesifik

Kecepatan putar turbin harus diusahakan setinggi mungkin, karena dengan kecepatan putar turbin yang tinggi ukuran turbin menjadi kecil sehingga lebih menguntungkan. Kecepatan spesifik juga sangat penting dalam perancangan, karena dengan mengetahui  $n_q$  kita dapat menentukan tipe roda turbin . Adapun persamaan  $n_q$  adalah sebagai berikut;

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}}$$

dimana  $n_q$  = kecepatan spesifik (rpm)  
 $n$  = kecepatan putar turbin (rpm)

Suatu turbin yang bekerja pada tinggi jatuh dan kapasitas air yang berbeda, dan bekerja pada putaran yang ditentukan, apabila mempunyai kecepatan spesifik yang sama, maka secara geometri bentuk turbin tersebut adalah sama.

Hubungan antara jumlah nosel dengan kecepatan spesifik adalah sebagai berikut.

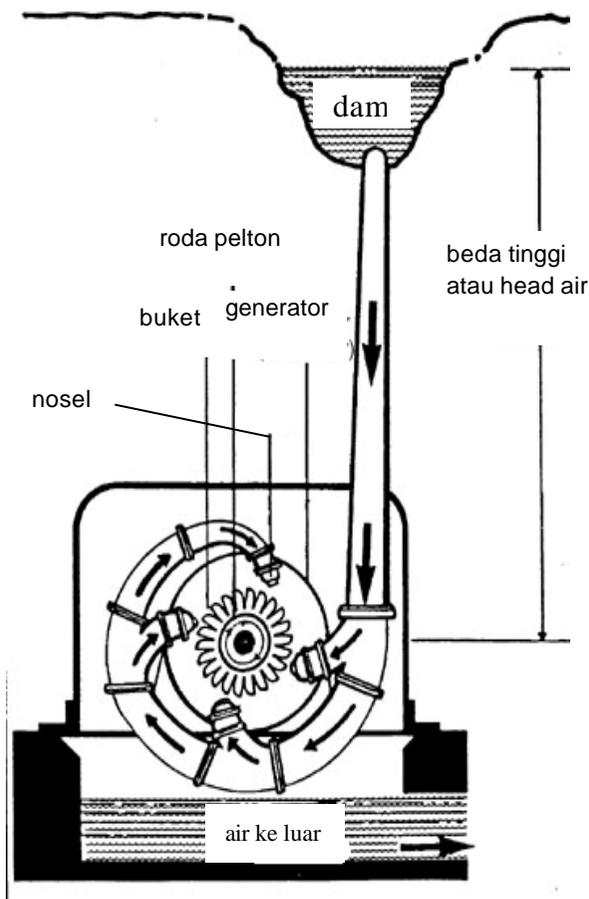
$$n_q = \frac{n_{qT}}{\sqrt{z}} \text{ dimana } n_{qT} = \text{kecepatan spesifik pada z nosel (rpm)}$$

$z$  = jumlah nosel terpasang

## G. Perhitungan Performasi Turbin

Turbin air sebagai salah satu alat konversi energi mempunyai beberapa keunggulan, diantaranya yang paling penting adalah sumber energinya adalah berlimpah dialam. Tetapi dibandingkan dengan mesin konversi lainnya turbin air efisiensinya total masih rendah. Hal ini disebabkan karena kehilangan energi pada proses konversi sangat banyak. Mulai dari saluran-saluran air, diturbin sendiri dan faktor-faktor lainnya. Untuk mendapatkan gambaran tentang performasi turbin air di bawah ini diberika contoh perhitungan unjuk kerja dari turbin pelton

Sebuah turbin pelton dipasang di sebuah instalasi PLTA mempunyai 4 buah nosel. Adapun data-data yang lainnya adalah : Tinggi air jatuh 500 m, kapasitas alirannya  $60 \text{ m}^3/\text{menit}$ , putaran turbin 180 rpm [ $f = 60\text{Hz}$ ], dan daya yang dihasilkan 160.000 KW,.Periksa apakah pemasangan turbin pelton dengan 4 nosel sudah efektif.



Gambar 20.13 instalasi PLTA dengan turbin air jenis pelton 6 nosel

**Diketahui :**

- H = 500 m
- Q = 60 m<sup>3</sup>/dtk
- n = 180 rpm (f = 60Hz)
- P = 160.000 KW
- D = 4400 mm

**Jawab:**

Daya air instalasi PLTA

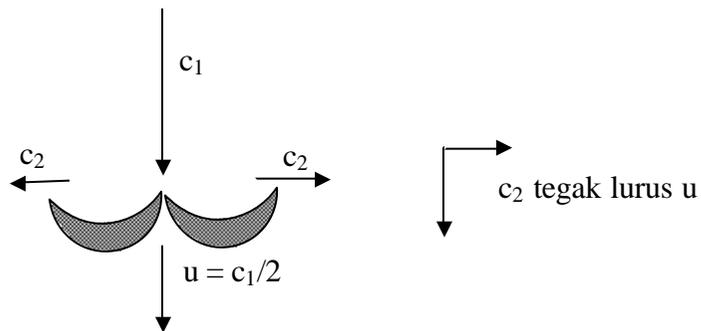
$$P = Q \cdot r \cdot g \cdot H = 60 \times 1000 \times 9,8 \times 500 = 294000000W$$

P = 249.000 KW

Daya turbin pelton P = 200.000KW

Efisiensi instalasi :

$$h_T = \frac{200000}{249000} \times 100 = 80\%$$



Perhitungan daya dapat dihitung dengan perumusan

$$P = Q \cdot r \cdot (u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u})$$

karena c<sub>2</sub> tegak lurus dengan arah u maka c<sub>2u</sub> = 0 ; u = u<sub>1</sub> ; jadi

$$P = Q \cdot r \cdot u_1 c_{1u} \text{ dengan } c_{1u} = c_1$$

Menghitung kecepatan pancaran air dari nosel :

$$c_1 = \sqrt{2gH}$$

$$c_1 = \sqrt{2 \times 9,8 \times 500} = 99 \text{ m/s}$$

pada efisiensi maksimum u = c<sub>1</sub>/2

$$u = 99/2 = 49,5 \text{ m/s}$$

$$P = Q \cdot r \cdot u_1 c_{1u} = 60 \times 1000 \times 49,5 \times 99 = 294000000w$$

$$P = 294000 \text{ KW}$$

Periksa kecepatan spesifiknya untuk satu nosel masih di daerah yang diijinkan pada

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \text{ untuk satu nosel } n_q = n_{qt}$$

$$n_q = n_{qt} = 180 \frac{\sqrt{60}}{\sqrt[4]{500^3}} = 13,19$$

nila  $n_{qt} = 13,19$  di luar daerah yang diijinkan atau turbin akan bekerja tidak normal dan tidak efektif, untuk itu perlu ditinjau pemakain beberapa nosel, untuk instalasi turbin pelton di atas digunakan jumlah nosel 4 buah seperti terlihat pada gambar 20.13 Untuk 4 nosel nilai  $n_q$  adalah :

$$n_q = \frac{n_{qT}}{\sqrt{z}}$$

$$n_q = \frac{13,19}{\sqrt{4}} = 6,6$$

dengan instalasi 4 nosel pada turbin pelton , sangat tidak efektif karena di luar daerah diijinkan karena  $H_{max}$  terlampaui. Untuk operasi yang normal instalasi harus dipasang turbin pelton dengan 2 nosel dengan  $H_{max}$  yang optimal. Untuk 2 nosel kecepatan spesifiknya adalah

$$n_q = \frac{13,19}{\sqrt{2}} = 9,3$$

putaran turbin :

$$n = n_q \frac{\sqrt[4]{H^3}}{\sqrt{Q}} = 9,3 \frac{500^{0,75}}{60^{0,5}} = 127 \text{ m/s}$$

### Soal.

1. Hitung efisiensi turbila apabila sbuah instalasi PLTA mempunyai tinggi jatuh air 700 m dengan kapasitas alirnya 102 m<sup>3</sup>/dtk apabila daya turbin yang dihasilkan 250000 KW?

2. Periksa apakah instalasi PLTA yang mempunyai H = 700 dan menggunakan 4 buah nosel turbin pelton. Turbin berputar 210 rpm. Efisiensi turbin pelton sebesar 84%. Kapa

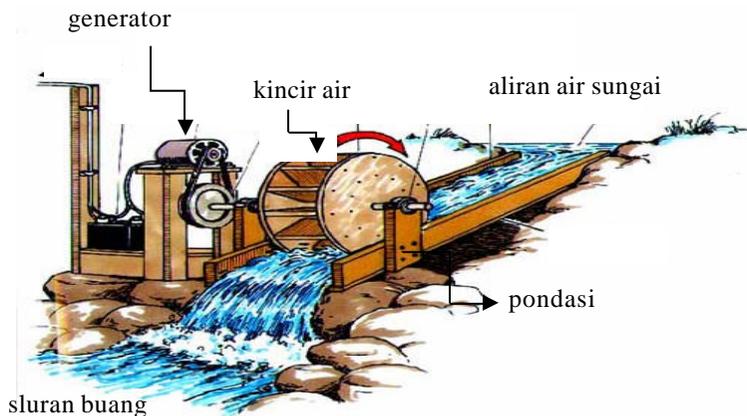
## BAB 21 KLASIFIKASI TURBIN AIR

Dari perumusan Bernouli, menunjukkan bahwa daya air dari suatu aliran mempunyai bentuk energi yang berbeda-beda. Pada proses peralihan keseimbangan energi antara energi masuk ke mesin tenaga disatu pihak dengan energi mekanis yang dapat diteruskan oleh mesin tenaga ditambah energi yang ikut ke luar bersama-sama air buangan dipihak lain. Persamaan keseimbangan tinggi jatuh air adalah sebagai berikut;

$$z_1 + \frac{p_1}{r \cdot g} + \frac{c_1^2}{2g} = h_t \cdot H + z_2 + \frac{p_2}{r \cdot g} + \frac{c_2^2}{2g}$$

$$h_t \cdot H = z_1 - z_2 + \frac{p_1 - p_2}{r \cdot g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$$

dari persamaan tersebut, suku sebelah kanan adalah jumlah energi yang dipakai oleh sudu jalan turbin untuk diubah menjadi energi mekanis.



**Gambar 21.1 Kincir air**

Pada gambar 21.1 adalah gambar kincir air. Kincir air adalah jenis turbin air yang paling kuno, sudah sejak lama digunakan oleh masyarakat. Teknologinya sederhana, material kayu dapat dipakai untuk membuat kincir air, tetapi untuk operasi pada tinggi jatuh air yang besar

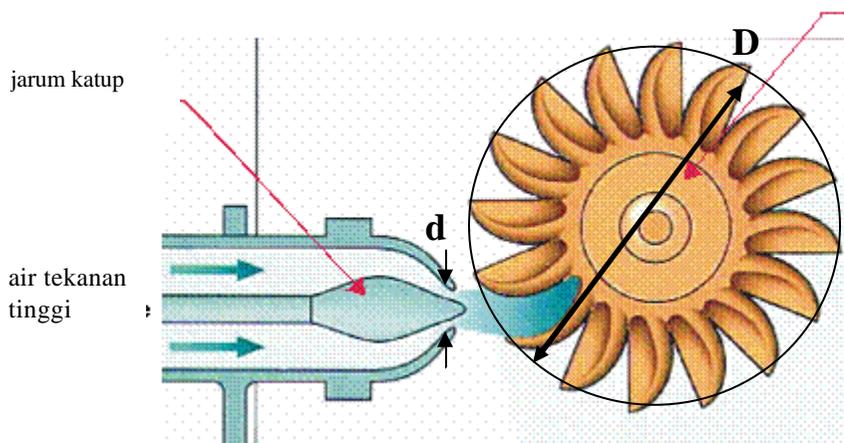
biasanya kincir air dibuat dengan besi. Kincir air bekerja pada tinggi jatuh yang rendah biasanya antar 0,1 m sampai 12 meter, dengan kapasitas aliran yang berkisar antara 0,05 m<sup>3</sup>/dtk sampai 5 m<sup>3</sup>/dtk. Dari data tersebut pemakai kincir air adalah di daerah yang aliran airnya tidak besar dengan tinggi jatuh yang kecil. Putaran poros kincir air berkisar antara 2 rpm sampai 12 rpm.

## A. Turbin Impuls atau Turbin Tekanan Sama

### A.1. Turbin pelton

Prinsip dari turbin impuls sudah dijelaskan pada kincir air. Turbin impuls bekerja dengan prinsip impuls. Turbin jenis ini juga disebut turbin tekanan sama karena aliran air yang ke luar dari nosel, tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer. Sebagai contoh pada gambar 21.2 adalah turbin pelton yang bekerja dengan prinsip impuls, semua energi tinggi dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin dirubah menjadi energi kecepatan. Pancaran air tersebut yang akan menjadi gaya tangensial  $F$  yang bekerja pada sudu roda jalan. Kecepatan pancaran air dari nosel adalah sebagai berikut ;

$$c_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$



Gambar 21.2 Turbin impuls dan proses penyempromatan

Turbin pelton beroperasi pada tinggi jatuh yang besar [gambar 21.4]. Tinggi air jatuh dihitung mulai dari permukaan atas sampai tengah-tengah pancaran air. Bentuk sudu terbelah menjadi dua bagian yang simetris, dengan maksud adalah agar dapat membalikan pancaran air dengan baik dan membebaslan sudu dari gaya-gaya samping [gambar 21.3]. Tidak semua sudu menerima pancaran air, hanya sebagian -

bagaimana saja secara bergantian bergantung posisi sudut tersebut. Jumlah noselnya bergantung kepada besarnya kapasitas air, tiap roda turbin dapat dilengkapi dengan nosel 1 sampai 6. Adapun penampang konstruksi sudu jalan dari pelton beserta noselnya dapat dilihat pada gambar 21.2

Ukuran-ukuran utama turbin pelton adalah diameter lingkaran sudu yang kena pancaran air, disingkat diameter lingkaran pancar dan diameter pancaran air. Pengaturan nosel akan menentukan kecepatan dari turbin. Untuk turbin-turbin yang bekerja pada kecepatan tinggi jumlah nosel diperbanyak. Hubungan antara jumlah nosel dengan kecepatan spesifik adalah sebagai berikut.

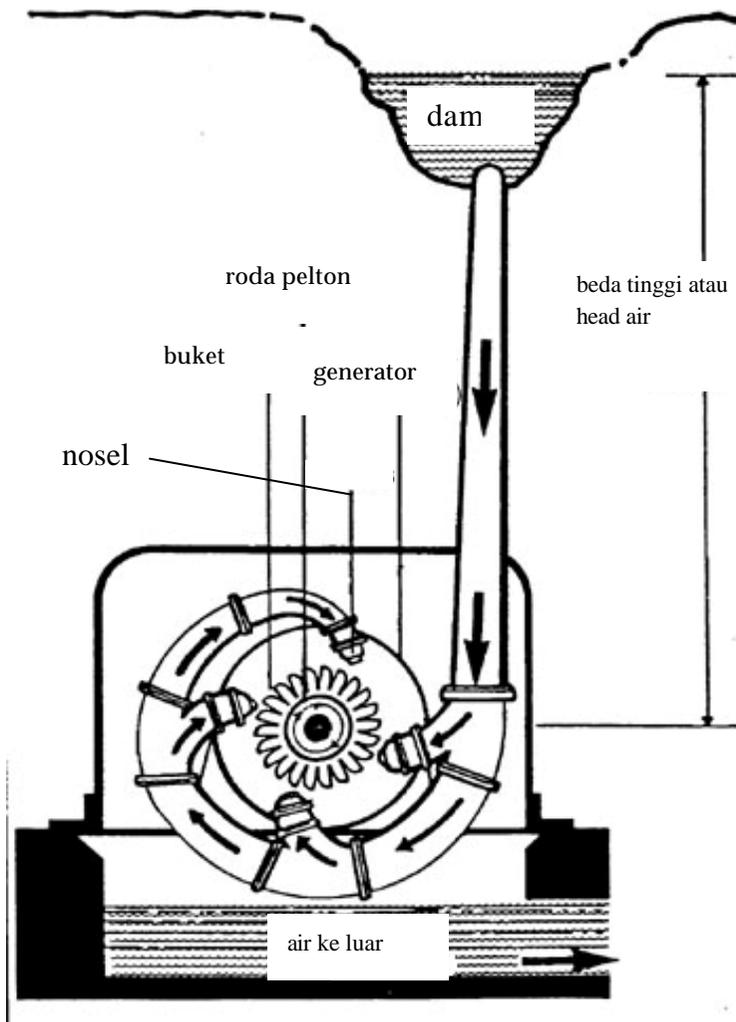
$$n_q = \frac{n_{qT}}{\sqrt{z}}$$

dimana  $n_{qT}$  = kecepatan spesifik pada z nosel (rpm)  
 $z$  = jumlah nosel terpasang

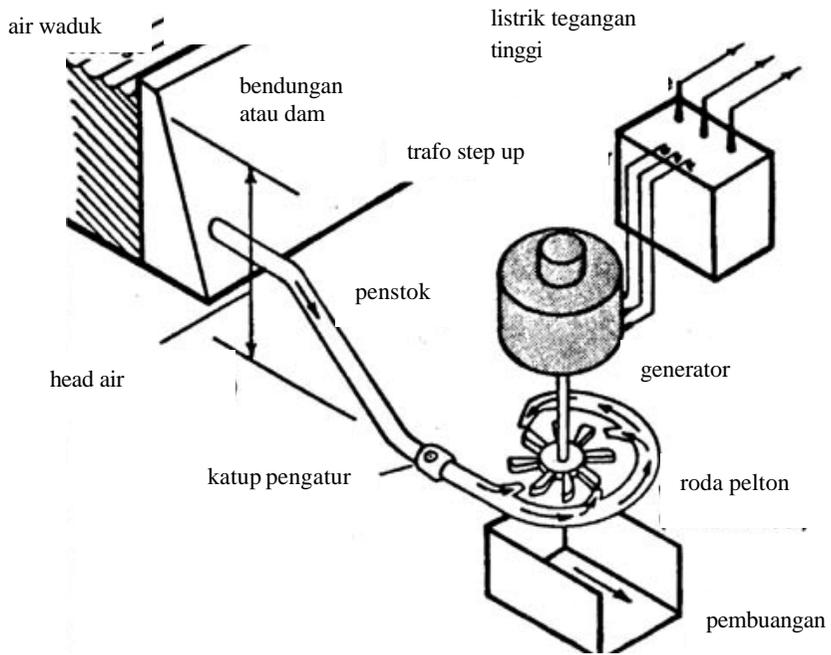
Pengaturan nosel pada turbin poros vertikal dan horizontal dapat dilihat pada gambar 21.4 dan 23.5



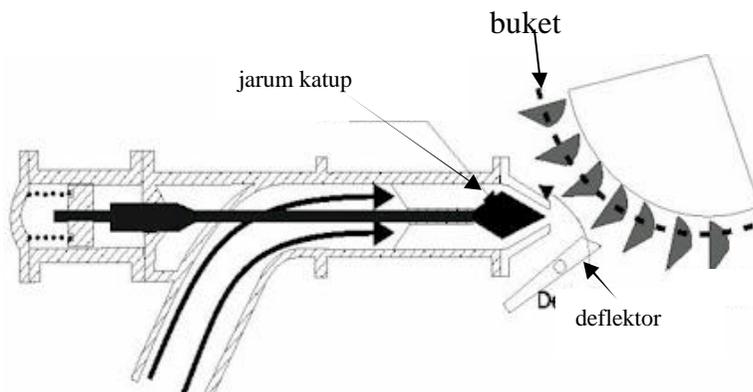
Gambar 21.3 Roda jalan turbin pelton



Gambar 21.4 Instalasi Turbin Pelton poros horizontal



Gambar 21.5 Instalasi turbin pelton poros vertikal



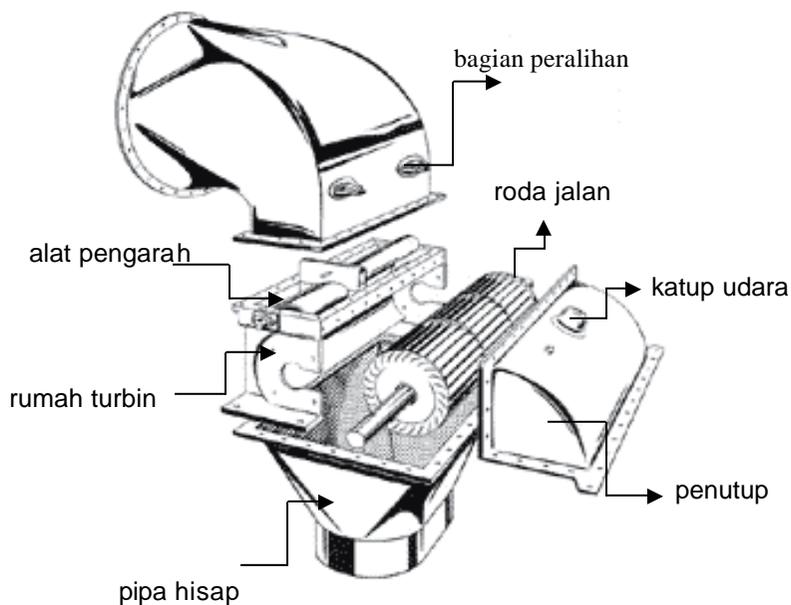
Gambar 21.6 Pengaturan nosel pada turbin pelton

## A.2. Turbin aliran ossberger

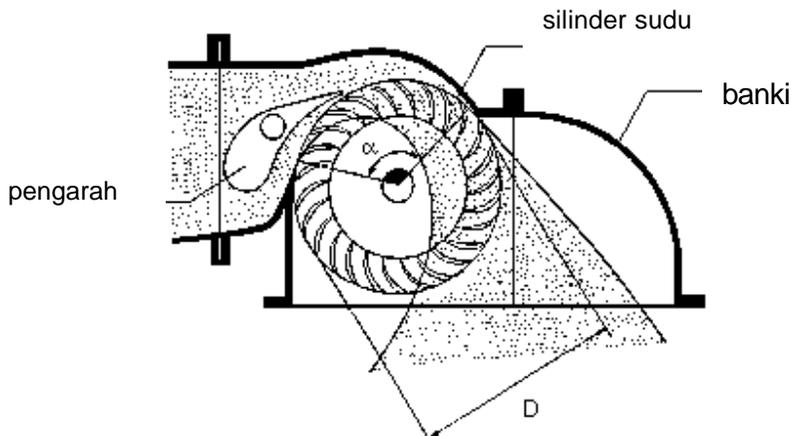
Pada turbin impuls pelton beroperasi pada head relatif tinggi, sehingga pada *head* yang rendah operasinya kurang efektif atau efisiensinya rendah. Karena alasan tersebut, turbin pelton jarang dipakai secara luas untuk pembangkit listrik skala kecil. Sebagai alternatif turbin jenis impuls yang dapat beroperasi pada head rendah adalah turbin impuls aliran *ossberger* atau turbin *crossflow*. Pada gambar 21.7 adalah turbin *crossflow*, konstruksi turbin ini terdiri dari komponen utama yaitu ;

1. Rumah turbin
2. Alat pengarah
3. Roda jalan
4. Penutup
5. Katup udara
6. Pipa hisap
7. Bagian peralihan

Aliran air dilewatkan melalui sudu sudu jalan yang berbentuk silinder, kemudian aliran air dari dalam silinder ke luar melalui sudu-sudu. Jadi perubahan energi aliran air menjadi energi mekanik putar terjadi dua kali yaitu pada waktu air masuk silinder dan air ke luar silinder. Energi yang diperoleh dari tahap kedua adalah 20%nya dari tahap pertama.



Gambar 21.7 Konstruksi dari turbin impuls ossberger



Gambar 21.8 Aliran air masuk turbin ossberger

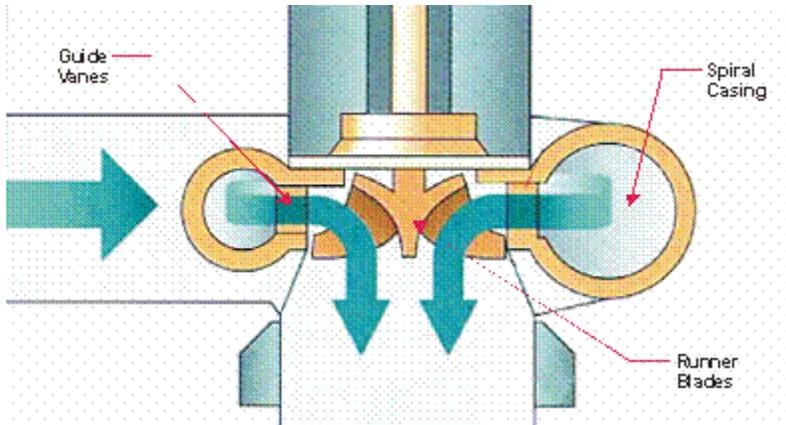
Air yang masuk sudu diarahkan oleh alat pengarah yang sekaligus berfungsi sebagai nosel seperti pada turbin pelton. Prinsip perubahan energi adalah sama dengan turbin impuls pelton yaitu energi kinetik dari pengarah dikenakan pada sudu-sudu pada tekanan yang sama.

## B. Turbin Reaksi atau Turbin Tekan Lebih

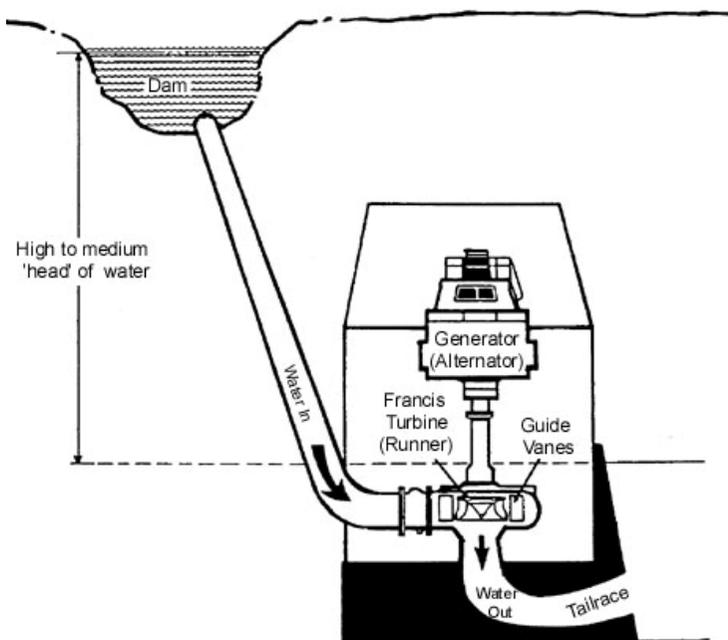
### B.1. Turbin Francis

Turbin francis adalah termasuk turbin jenis ini [gambar 21.9]. Konstruksi turbin terdiri dari dari sudu pengarah dan sudu jalan, dan kedua sudu tersebut, semuanya terendam di dalam aliran air. Air pertama masuk pada terusan berbentuk rumah keong. Perubahan energi seluruhnya terjadi pada sudu pengarah dan sudu gerak. Aliran air masuk ke sudu pengarah dengan kecepatan semakin naik dengan tekanan yang semakin turun sampai roda jalan, pada roda jalan kecepatan akan naik lagi dan tekanan turun sampai di bawah 1 atm. Untuk menghindari kavitasi, tekanan harus dinaikan sampai 1 atm dengan cara pemasangan pipa hisap.

Pengaturan daya yang dihasilkan yaitu dengan mengatur posisi pembukaan sudu pengarah, sehingga kapasitas air yang masuk ke roda turbin dapat diperbesar atau diperkecil. Turbin francis dapat dipasang dengan poros vertikal dan horizontal [gambar 21.10]



Gambar 21.9 Aliran air masuk turbin Francis



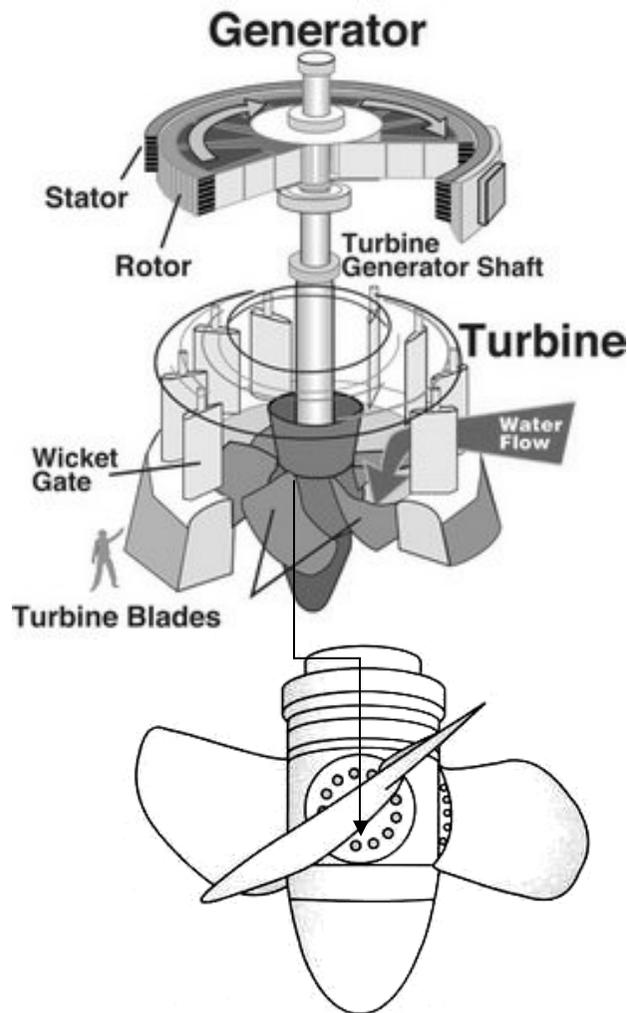
Gambar 21.10 Instalasi turbin francis

## B.2. Turbin Kaplan

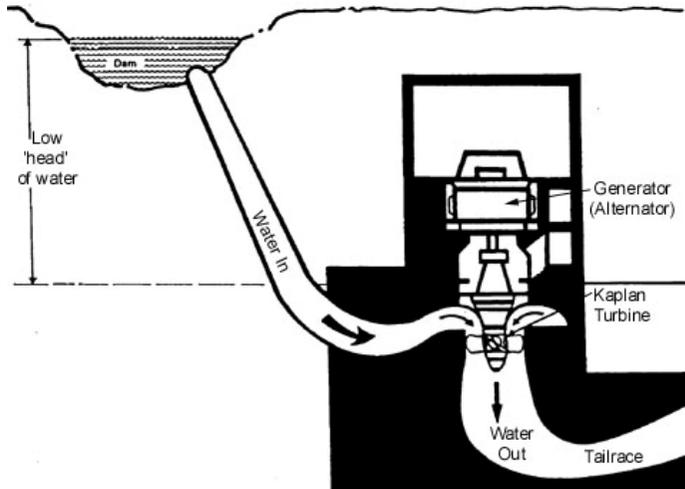
Tidak berbeda dengan turbin francis, turbin kaplan cara kerjanya menggunakan prinsip reaksi. Turbin ini mempunyai roda jalan yang mirip dengan baling-baling pesawat terbang [gambar 21.7]. Bila baling-baling pesawat terbang berfungsi untuk menghasilkan gaya dorong, roda jalan pada kaplan berfungsi untuk mendapatkan gaya  $F$  yaitu gaya putar yang

dapat menghasilkan torsi pada poros turbin. Berbeda dengan roda jalan pada francis, sudu-sudu pada roda jalan kaplan dapat diputar posisinya untuk menyesuaikan kondisi beban turbin [gambar 21.11].

Turbin kaplan banyak dipakai pada instalasi pembangkit listrik tenaga air sungai, karena turbin ini mempunyai kelebihan dapat menyesuaikan head yang berubah-ubah sepanjang tahun. Turbin kaplan dapat beroperasi pada kecepatan tinggi sehingga ukuran roda turbin lebih kecil dan dapat dikopel langsung dengan generator. Pada kondisi beban tidak penuh turbin kaplan mempunyai efisiensi paling tinggi, hal ini dikarenakan sudu-sudu turbin kaplan dapat diatur menyesuaikan dengan beban yang ada

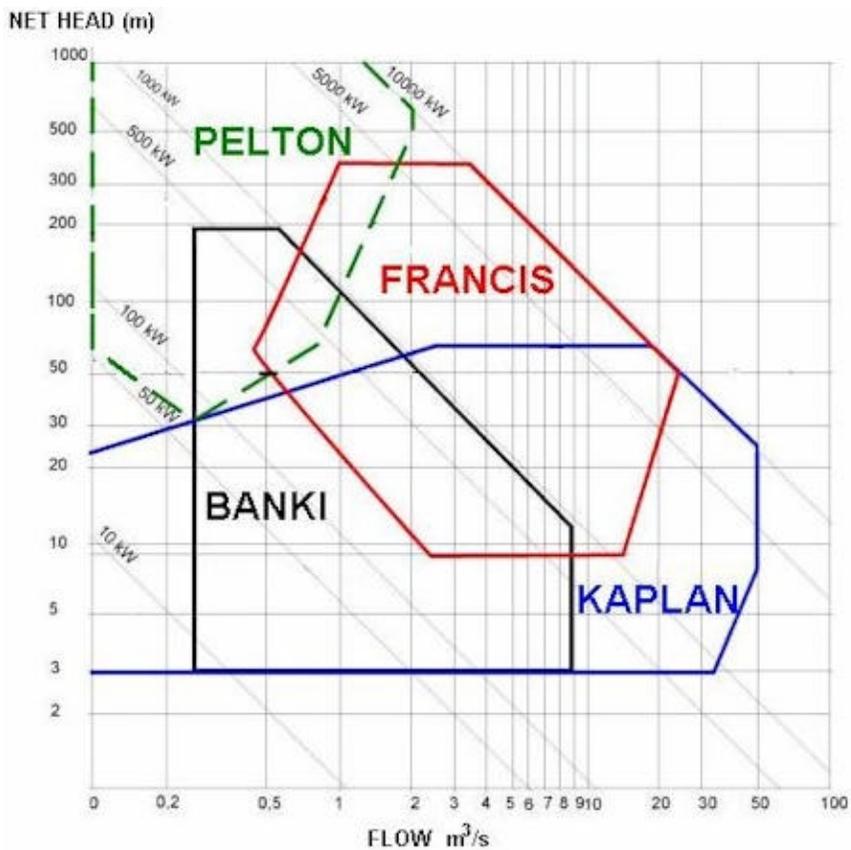


Gambar 21.11 Turbin kaplan dengan sudu jalan yang dapat diatur



Gambar 21.12 Instalasi pembangkit dengan turbin kaplan

### C. Perbandingan Karakteristik Turbin



Gambar 21.13 Perbandingan karakteristik Turbin

Dapat dilihat pada gambar 21.13 terlihat turbin kaplan adalah turbin yang beroperasi pada head yang rendah dengan kapasitas aliran air yang tinggi atau bahkan beroperasi pada kapasitas yang sangat rendah. Hal ini karena sudu-sudu turbin kaplan dapat diatur secara manual atau otomatis untuk merespon perubahan kapasitas

Berkebalikan dengan turbin kaplan turbin pelton adalah turbin yang beroperasi dengan head tinggi dengan kapasitas yang rendah. Untuk turbin francis mempunyai karakteristik yang berbeda dengan lainnya yaitu turbin francis dapat beroperasi pada head yang rendah atau beroperasi pada head yang tinggi

# **BAB 22 DASAR REFRIGERASI DAN PENGKONDISIAN UDARA**

Udara panas menyebabkan rasa tidak nyaman untuk beraktifitas. Kondisi akan semakin parah apabila orang bekerja atau beraktifitas di dalam ruang yang tertutup dengan sirkulasi udara yang terbatas. Udara dengan kelembaban tinggi dapat menimbulkan rasa tidak nyaman, hal ini karena pada kondisi tersebut orang menjadi mudah berkeringat. Untuk mengatasi kondisi tersebut, udara di dalam ruangan harus dikondisikan sehingga mempunyai karakteristik yang cocok dengan kondisi tubuh orang yang menempati ruangan.

Di dalam suatu ruangan yang udaranya dikondisikan, temperatur dan kelembaban udara dapat dikontrol sampai kondisi dimana penghuni ruangan merasa nyaman. Peralatan yang dapat dipakai untuk pengkondisian udara biasanya adalah air conditioner (AC), humidifier (pelembab), fan atau blower. Disamping untuk mengontrol temperatur udara, AC dapat digunakan sekaligus untuk sirkulasi sehingga kondisi udara tetap bersih. Fan dan bower hanya digunakan untuk sirkulasi udara saja.

Air conditioner atau alat pengkondisi udara termasuk jenis mesin yang bekerja mengikuti siklus termodinamika yaitu siklus kompresi uap atau daur kompresi uap. Fluida kerja yang dipakai untuk daur ini biasa dinamakan refrigeran.

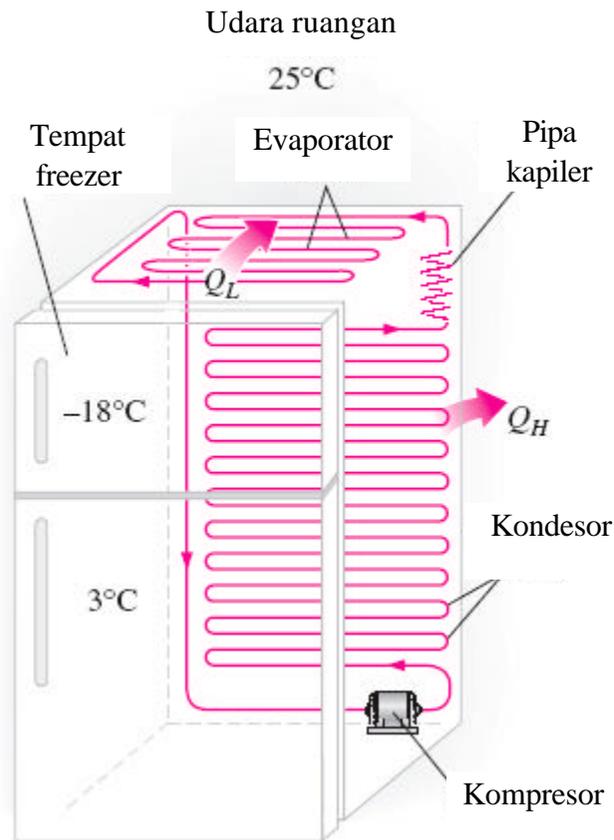
Daur kompresi uap diaplikasikan pada mesin-mesin refrigerasi. Sebagai contoh adalah freezer, mesin ini banyak dipakai untuk mengkondisikan benda pada suhu rendah. Sebagai contoh bahan pangan seperti buah-buahan, sayur-mayur, makanan kaleng, atau lainnya sering ditempatkan di dalam freezer supaya lebih awet dan tetap segar. Freezer banyak dipakai industri makanan atau industri obat untuk pengawetan.

## **A. Klasifikasi Mesin Refrigerasi**

Mesin refrigerasi berdasarkan cara kerjanya dibagi menjadi tiga yaitu ;

1. Mesin refrigerasi daur kompresi uap
2. Mesin refrigersi daur absorpsi
3. Pompa kalor

Mesin refrigerasi daur kompresi uap banyak dipakai untuk mesin mesin pengkondisi udara skala kecil, fluidanya menggunakan refrigeran khusus [gambar 22.1]. Untuk mesin refrigerasi absorpsi biasanya dipakai untuk skala besar pada industri. Fluida kerja yang dipakai ada dua macam yaitu sebagai absorpsi dan fluida sirkulasi. Pompa kalor merupakan jenis mesin refrigasi untuk pemanasan ruangan dengan cara memanfaatkan kalor yang dibuang dari kondensor



Gambar 22.1 Refrigerator

## B. Penggunaan

Mesin refrigerasi secara umum digunakan untuk pengkondisian udara suatu ruangan, rumah atau industri, sehingga setiap orang yang berada pada ruangan tersebut akan merasa nyaman. Berikut ini adalah contoh penggunaan mesin referigerasi;

### B.1 Pengkondisian udara untuk industri

Pada industri terdapat banyak benda yang dapat menimbulkan panas seperti mesin-mesin, peralatan komputer, dan jumlah karyawan

yang banyak. Hal ini dapat menyebabkan kondisi lingkungan yang tidak segar, kotor dan lembab. Kelembaban yang tinggi dapat menyebabkan peralatan cepat korosi atau berkarat. Untuk peralatan komputer yang beroperasi pada temperatur di atas normal dapat menimbulkan kerusakan. Pemasangan pengkondisi udara menjadi penting sehingga temperatur dan kelembaban dapat diatur.

## **B.2. Pengkondisian udara untuk Laboratorium**

Peralatan-peralatan pada laboratorium biasanya harus bersih dan higienis, tidak boleh terkontaminasi dengan penyakit dan kotoran. Kelembaban udara harus dijaga pada kondisi dimana orang yang bekerja merasa nyaman dan juga menjamin tidak terjadi kondisi dimana kelembaban cocok untuk perkembangan jamur atau penyebab penyakit lainnya. Kebutuhan pengkondisi udara juga disesuaikan dengan fungsinya. Misalkan untuk pengujian peralatan yang akan beroperasi suhu rendah hingga  $-20^{\circ}\text{C}$ .

## **B.3 Pengkondisian udara Ruang Komputer**

Komputer adalah perangkat yang dapat menjadi sumber panas karena komponen-komponennya, sedangkan kalau komputer bekerja pada kondisi dimana udara panas akan terjadi hank. Dengan alasan tersebut, pemasangan pengkondisi udara harus tepat. Fungsi utama pada kondisi tersebut adalah mengontrol temperatur.

## **B.4 Instalasi penkondisian udara pada Instalasi power plant**

Fungsi utama dari pengkondisian udara pada kondisi ini adalah untuk memperoleh udara nyaman dan bersih. Lingkungan yang cenderung kotor karena polusi dan panas yang berlebih menjadi masalah utama pada power plant. Sebagai contoh pada instalasi pembangkit listrik tenaga uap dan gas, dari proses pembakaran dihasilkan gas pembakaran bertemperatur tinggi, sebagian akan hilang ke lingkungan yang akan menyebabkan kenaikan temperatur lingkungan. Karena hal tersebut, pengkondisi udara berfungsi untuk menyetabilkan temperatur sehingga tetap nyaman, terutama pada ruangan tempat pengendali pembangkit.

## **B.5. Pengkondisian udara pada rumah tangga**

Rumah tinggal berfungsi untuk tempat berkumpulnya anggota keluarga, tempat menyimpan benda-benda mulai dari bahan makanan sampai pakaian. Fungsi utama dari pengkondisi udara pada rumah tangga adalah menjaga temperatur dan kelembaban udara pada kondisi yang dianggap nyaman untuk beristirahat. Pada rumah tangga juga banyak dipakai mesin pendingin untuk mengawetkan bahan makanan dan untuk keperluan pembuatan balok es untuk minuman.

## **B.6. Pengkondisian udara untuk Automobil**

Pada mobil penumpang, pengkondisi udara dipakai untuk mengontrol suhu dan kelembaban sehingga udara tetap segar dan bersih. Sumber utama beban pendinginan adalah dari radiasi matahari langsung dan juga dari orang-orang yang mengendarai atau menumpang. Permasalahan pengkondisian udara biasanya pada penggerak kompresor AC, penggerak ini adalah dari putaran poros engkol, sehingga dapat mengurangi daya dari mesin, terutama pada beban tinggi.

## **B.7. Penyimpanan dan pendistribusian**

Daging, ikan, sayur mayur dan buah-buahan sangat mudah membusuk sehingga diperlukan perlakuan khusus untuk pengawetan. Salah satu metodenya adalah dengan pendinginan. Metode pendinginan dimaksudkan untuk membunuh kuman-kuman dan memperlambat proses penguraian alamiah sehingga dengan proses ini kondisi bahan makanan tadi dapat bertahan sampai beberapa bulan. Urutan proses pengawetan bahan makanan dengan pendinginan adalah sebagai berikut ;

### **a. Pembekuan**

Proses pembekuan bahan makanan sampai  $-30^{\circ}\text{C}$  dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut ;

- peniupan dengan kecepatan tinggi ke arah timbunan paket makanan
- pembekuan sentuh, meletakkan bahan-makanan diantara pelat-pelat logam
- pembekuan celup, mencelupkan bahan makanan ke air garam yang bersuhu rendah
- pembekuan hamparan dengan aliran fluida, paket makanan di hamparkan di atas conveyor kemudian di tiup udara dingin.

### **b. Ruang penyimpanan**

Ruang atau gudang penyimpanan berguna untuk menyimpan bahan makanan setelah pemanenan, karena tidak semua hasil panen dikonsumsi atau dijual. Untuk bahan makanan yang mudah membusuk penyimpanannya harus dengan pendinginan. Untuk menjaga agar tetap awet dan segar, bahan makanan disimpan sampai suhu  $-20^{\circ}\text{C}$  atau lebih rendah lagi.

### **c. Distribusi**

Setelah proses penyimpanan di dalam gudang, bahan makanan kemudian didistribusikan untuk dijual ke pasar-pasar atau toko-toko. Proses pendistribusian juga harus dilengkapi mesin pendingin, sehingga bahan makanan tidak membusuk.

### C. Sistem Pengkondisian Udara

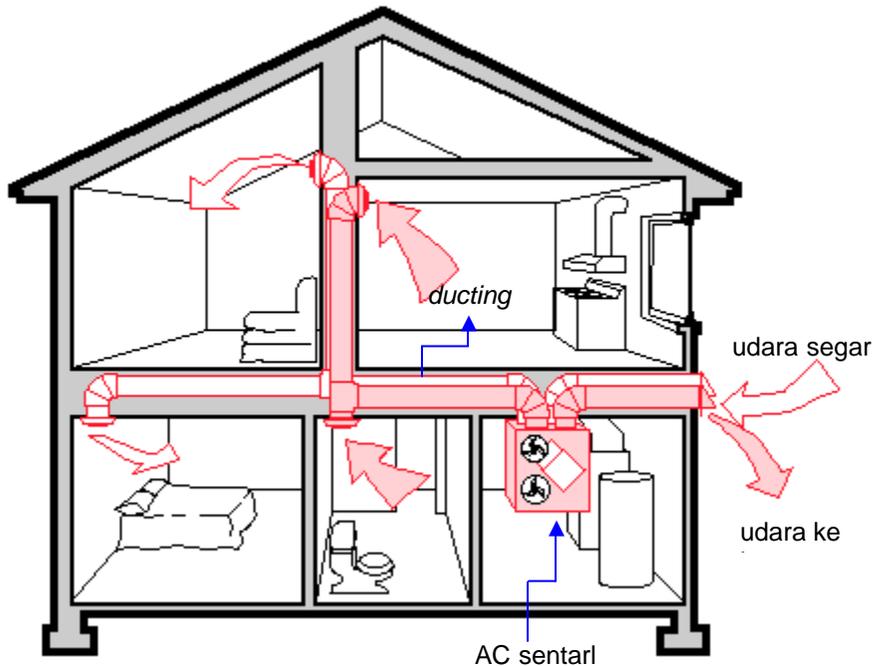
Teknik pengkondisian udara adalah teknik memindahkan panas dari atau ke suatu ruangan sehingga diperoleh temperatur dan kelembaban udara yang diinginkan. Mesin yang dapat melakukan perpindahan itu adalah heat pump. Ada dua macam pompa kalor bergantung dari kebutuhan akan panas atau tidak membutuhkan panas. Mesin pompa panas yang menyerap panas dari suhu ruangan kemudian dibuang ke lingkungan disebut mesin pendingin. Sedangkan mesin pompa kalor yang menyerap panas dari lingkungan untuk dipakai untuk memanasi ruangan disebut pompa kalor

Tujuan dari memindahkan panas dari satu tempat ke tempat lainnya adalah untuk mengkondisikan udara dengan temperatur dan kelembaban yang pas untuk kenyamanan, atau untuk lainnya seperti pengawetan, dan pengeringan.

Sebagai contoh ruangan kelas untuk proses belajar mengajar, pada musim panas atau kemarau, ruangan cenderung panas pada waktu proses pengajaran. Beban pendinginan diperoleh dari suhu lingkungan, radiasi matahari, para siswa dan guru. Beban pendinginan paling besar diperoleh dari pemanasan radiasi matahari. Dengan menganalisis beban-beban pendinginan, dapat dibuat rancangan sistem untuk mengkondisikan udara di dalam ruangan kelas menjadi nyaman untuk proses pengajaran.

Seandainya indikasi kenyamanan kelas hanya terpaku pada temperatur saja, misalkan temperatur ruang kelas pada 25 °C yaitu sama dengan temperatur di luar kelas, proses pengkondisian udara harus dapat mencapai temperatur tersebut. Sebagai contoh penyelesaiannya adalah dengan memasang kipas sedemikian hingga sirkulasi udara lancar, ditambah dengan pemasangan tabir matahari pada jendela kaca untuk mengurangi efek radiasi panas matahari.

Kalau kebutuhan kenyamanan dirasa pada temperatur yang lebih rendah lagi, misalkan pada 18 °C, sehingga harus dipasang air conditioner (AC) yang mampu mengkondisikan udara sampai temperatur tersebut. Jendela-jendela kaca harus dengan tabir matahari ditutup untuk menghindari beban pendinginan yang besar dari radiasi matahari. AC akan bekerja menyerap kalor dari ruangan kelas kemudian dibuang ke lingkungan di luar kelas. Karena ruangan kelas, sebagian kalornya diserap AC, temperaturnya menjadi turun. Biasanya berbarengan dengan proses penyerapan kalor kelembaban udara juga ikut berubah karena temperatur turun, ada sebagian uap air di dalam kelas mengembun, sehingga kadar uap air di dalam ruangan kelas menurun. Dari contoh tersebut terlihat bahwa proses pengkondisian udara bukan berarti hanya proses pendinginan, tetapi proses untuk pencapaian temperatur yang dirasa nyaman bagi pengguna ruangan [gambar 22.4]



Gambar 22.2 Instalasi penyegar udara rumah

#### D. Peralatan Pengkondisian udara

Dari uraian di atas bahwa sistem pengkondisian udara bertujuan untuk mencapai kondisi dimana udara ruangan mempunyai temperatur dan kelembaban yang dirasa nyaman bagi pengguna ruangan tersebut. Adapun alat-alat untuk mengkondisikan udara ruangan sampai temperatur dan kelembaban yang diinginkan adalah sebagai berikut;

- **Koil pendingin.** Koil pendingin adalah pipa pipa yang membawa refrigeran dan dilewatkan pada ruangan yang akan didinginkan. Koil pendingin adalah bagian evaporator dari mesin refrigerasi
- **Koil pemanas.** Koil pemanas adalah pipa pipa yang membawa refrigeran dan dilewatkan pada saluran udara yang akan dikondisikan. Koil pemanas adalah bagian kondensor dari mesin refrigeasi.
- **Fan atau kipas.** Sebagai alat untuk menarik atau mendorong fluida ke luar atau masuk ruangan. Sebagai alat sirkulasi udara.

- **Pelembab udara atau humidifier.** Pelembab udara adalah alat yang dapat merespon kondisi kelembaban udara sehingga dapat menambah kelembaban udara yang dikondisikan. Alat ini dapat menyemprotkan uap air ke udara untuk meningkatkan kelembaban udara tersebut.
- **Katup-katup dan damper -damper** untuk mengontrol aliran udara dan cairan refrigeran
- **Sensor-sensor** untuk merespon kondisi udara. Alat tersebut seperti termostat, sensor kecepatan, humidistat, selektor tekanan, freezestat, dan lainnya

## E. Beban Pemanasan dan Pendinginan

Sebelum melakukan pengkondisian udara di dalam suatu ruangan kita harus mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi karakteristik udara di dalam ruangan, terutama dua indikator penting yaitu temperatur udara dan kelembaban udara.

Untuk daerah daerah beriklim subtropis yang terdapat musim dingin, kondisi udara dapat dalam keadaan ekstrim, temperatur di bawah nol dan kecendrungan udara kering atau kelembaban udaranya kering. Oleh karena itu, pengkondisian udara ruangan pada daerah beriklim subtropis pada musim dingin bertujuan untuk pemanasan dan menaikkan kelembaban udara sampai pada kondisi udara yang nyaman. Sehingga semua faktor-faktor yang mempengaruhi proses pemanasan disebut dengan beban pemanasan. Sebagai contoh adalah kondisi ruangan yaitu model ventilasi, lampu-lampu terpasang, model dari jendela, dan kondisi lainnya [gambar 22.3].

Kondisi sebaliknya dengan kondisi daerah subtropis, pada daerah tropis kebanyakan ruangan-ruangan akan mengalami pemanasan sepanjang tahun dengan kelembaban udara yang tinggi, oleh karena itu pengkondisian udara pada daerah ini diarahkan untuk proses penurunan temperatur dan kelembaban sampai kondisi udara yang dirasa nyaman. Semua faktor yang mempengaruhi proses tersebut di atas disebut dengan beban pendinginan. Sebagai contoh beban pendinginan adalah radiasi panas matahari pada siang hari yang dominan, kondisi yang ada dalam ruangan, misalkan peralatan yang dapat menjadi sumber panas, seperti lampu-lampu, peralatan elektronik, kompor masak, oven kue dan lainnya yang mengeluarkan panas [gambar 22.3]. Di bawah ini beberapa macam proses perpindahan kalor dari atau ke sebuah bangunan rumah.

a. Transmisi, yaitu kehilangan kalor atau perolehan kalor yang disebabkan oleh beda suhu dari kedua sisi elemen bangunan

$$q = UA(t_0 - t_i) \text{ Watt}$$

$$\begin{aligned} \text{denagn } UA &= 1/R_{\text{tot}}, \text{ W/K} \\ R_{\text{tot}} &= \text{hambatan total K/W} \end{aligned}$$

- U = koefisien perpindahan kalor total  $W/m^2.K$
- A = luas permukaan  $m^2$
- $(t_0-t_i)$  = beda suhu luar dan dalam, K

b. Panas matahari yaitu perolehan kalor matahari karena rambatan energi matahari melalui benda tembus atau tidak tembus cahaya.

$$q_{sg} = AI_t(t + Na) \text{ (permukaan tembus cahaya) Watt}$$

- $I_t$  = intensitas radiasi pada permukaan luar ( $W/m^2$ )
- $t$  = faktor transmisi
- N = fraksi radiasi yang diserap dan diteruskan ke dalam ruangan
- $a$  = Faktor penyerapan (absorpsi)

$$q_w = U_w A(t_e - t_i) \text{ (permukaan tak tembus cahaya) Watt}$$

dengan  $t_e$  = suhu udara matahari K

c. Perembesan udara (infiltrasi) yaitu kehilangan atau perolehan kalor karena perembesan udara luar ke dalam ruangan yang dikondisikan.

$$q_{isensibel} = 1,23 \dot{Q}(t_0 - t_i) ;$$

$$q_{ilaten} = 3000 \dot{Q}(W_0 - W_i)$$

dengan  $\dot{Q}$  = laju volumetrik udara luar, L/dtk

W = rasio kelembaban air terhadap udara kg/kg

d. Sumber dalam (internal) yaitu perolehan energi yang disebabkan oleh pelepasan energi di dalam ruangan ( lampu-lampu, orang, peralatan, dan sebagainya)

$$q_{lampu} = (Fu)(Fb)(CLF) \text{ Watt (lampu-lampu)}$$

dengan Fu = faktor penggunaan atau fraksi penggunaan lampu yang terpasang

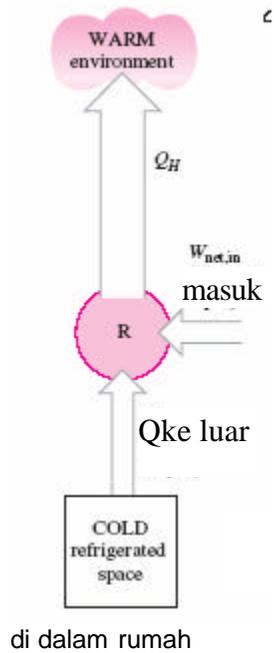
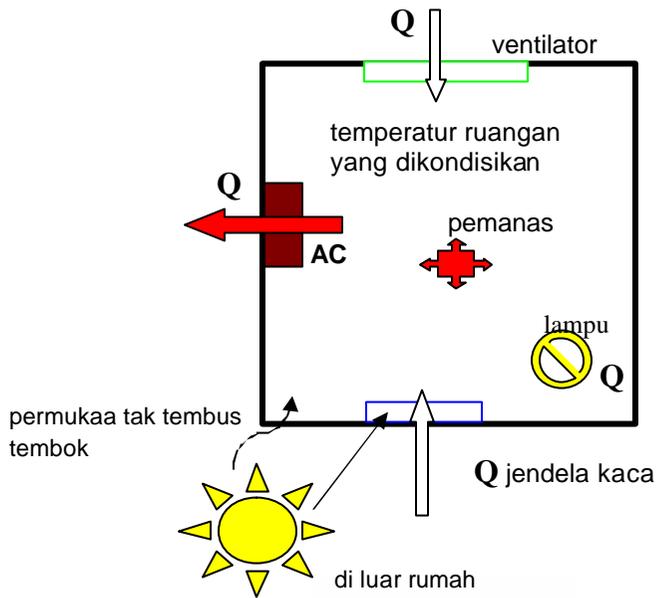
Fb = faktor balast untuk lampu-lampu fluerescent = 1,2 untuk fluerescent biasa

CLF = faktor beban pendinginan

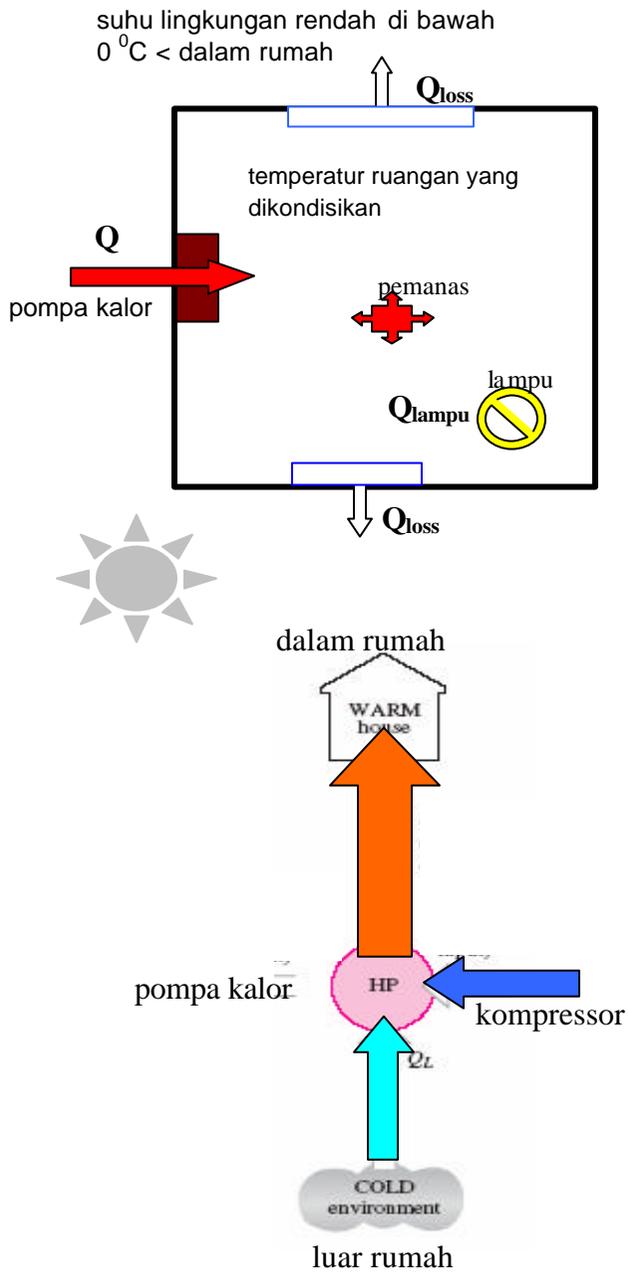
$$q_{orang} = q_{perorang} \times \Sigma orang \times CLF \text{ (perorang)}$$

Untuk perhitungan beban penghangatan faktor faktor utama yang perlu diperhatikan adalah beban penghangatan transmisi termal, dan beban penghangatan perembesan udara (infiltrasi). Sedangkan untuk perhitungan beban pendinginan faktor-faktor utama adalah beban sumber internal (lampu-lampu dan orang), dan beban panas matahari.

suhu lingkungan > dalam rumah



Gambar 22.3 Beban pendinginan



Gambar 22.4 Beban pemanasan

## F. Kualitas Udara

Setiap makhluk hidup pasti membutuhkan udara untuk hidup, demikian juga kita sebagai manusia, udara sangat penting, mulai bangun tidur sampai tidur lagi kita selalu berinteraksi dengan udara lingkungan terutama untuk pernafasan. Dengan alasan tersebut sangatlah penting untuk selalu menjaga kualitas dari udara. Salah satu cara dalam teknik pengkondisian udara adalah dengan pemasangan ventilasi pada ruangan ruangan. Fungsi ventilasi adalah untuk menyegarkan kondisi lingkungan dengan udara segar. Model ventilasi disesuaikan dengan kebutuhan dari ruangan yang akan dikondisikan. Untuk ruangan dengan tingkat pengotoran tinggi harus dibedakan dengan ventilasi dengan pengotoran rendah. Perlu diperhatikan juga bahwa ventilasi sangat berpengaruh terhadap beban pengkondisian untuk penghangatan atau pendinginan. Jadi perancangan ventilasi harus cocok dengan kebutuhan pengkondisian. Perumusan model laju pemasukan udara adalah :

$$\dot{V} = \dot{V}_r + \dot{V}_m$$

dengan  $\dot{V}$  = laju pemasukan udara untuk ventilasi L/dtk

$\dot{V}_o$  = laju aliran daur ulang, L/dtk

$\dot{V}_m$  = laju udara luar minimum untuk pengguna tertentu

$$\dot{V}_r = \frac{\dot{V}_o + \dot{V}_m}{E}$$

$\dot{V}_o$  = laju udara luar untuk pengguna tertentu ( merokok/tidak merokok) L/dtk

E = efisiensi alat penyingkir pengkotor udara oleh alat pembersih

Tabel 24.1 Kebutuhan udara luar untuk ventilasi

Fungsi ruangan	Perkiraan pengguna per 100 m <sup>2</sup> luas lantai	kebutuhan udara luar perorang, L/dtk	
		Merokok	Tidak merokok
Kantor	7	10	2,5
Ruang pertemuan dan ruang tunggu	60	17,5	3,5
Loby	30	7,5	2,5

**Soal :**

1. Tentukan laju ventilasi, laju udara luar dan laju daur ulang pada sebuah gedung pertemuan dari suatu bangunan kantor jika tidak merokok diijinkan. Sebuah alat pembersih dipakai dengan efisiensi  $E = 70\%$

Diketahui

$$\dot{V}_m = 3,5 \text{ L/dtk}$$

$$\dot{V}_o = 17,5 \text{ L/dtk [ laju kebutuhan udara perorang]}$$

$$E = 60/100$$

$$\dot{V}_r = \frac{\dot{V}_o - \dot{V}_m}{E}$$

$$\dot{V}_r = \frac{17,5 - 3,5}{70/100} = 20 \text{ L/dtk}$$

$$\dot{V} = \dot{V}_r + \dot{V}_m$$

$$\dot{V} = 20 + 3,5 = 23,5 \text{ L/dtk}$$

adi kebutuhan laju pemasukan udara untuk ventilasi adalah 23,5 L/dtk perorang

2. Tentukan laju udara ventilasi yang diperlukan untuk pengkondisian ruangan lobi dimana meroko tidak diijinkan, alat pembersih yang dipakai mempunyai efisiensi  $E = 80\%$ .

$$\dot{V}_o = 7,5 \text{ L/dtk [ laju kebutuhan udara perorang]}$$

$$E = 80\%$$

$$\dot{V}_r = \frac{7,5 - 2,5}{80/100} = 6,25 \text{ L/dtk}$$

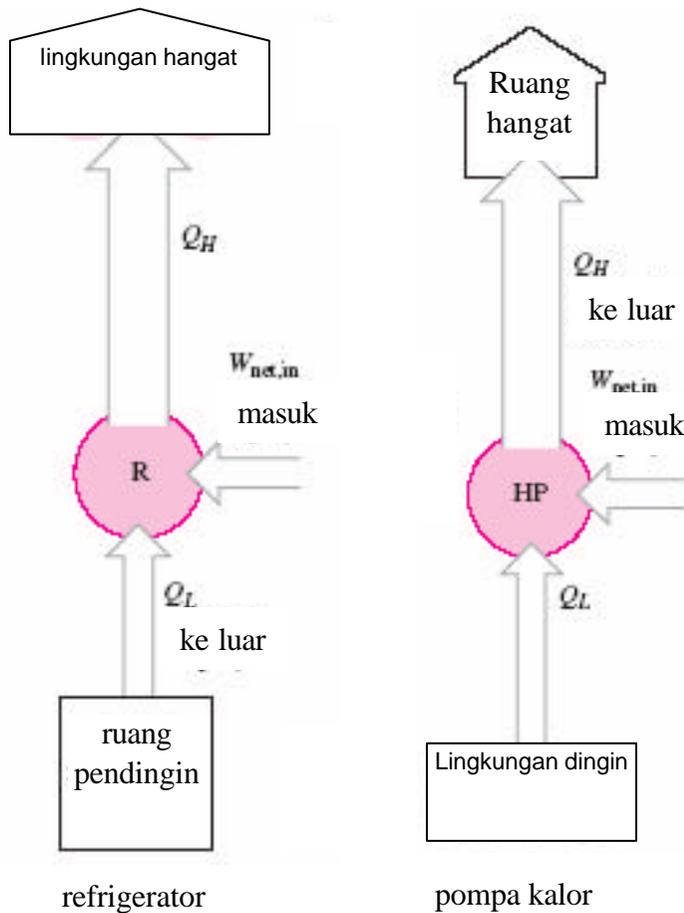
$$\dot{V} = \dot{V}_r + \dot{V}_m$$

$$\dot{V} = 6,25 + 2,5 = 8,75 \text{ L/dt per orang}$$

# BAB 23 SIKLUS KOMPRESI UAP

## A. Prinsip Kerja

Mesin refrigerasi dan pompa kalor adalah mesin yang bekerja menyerap kalor dari lingkungan bersuhu rendah kemudian dipindahkan ke lingkungan bersuhu tinggi. Pada gambar 23.1 adalah cara kerja mesin tersebut



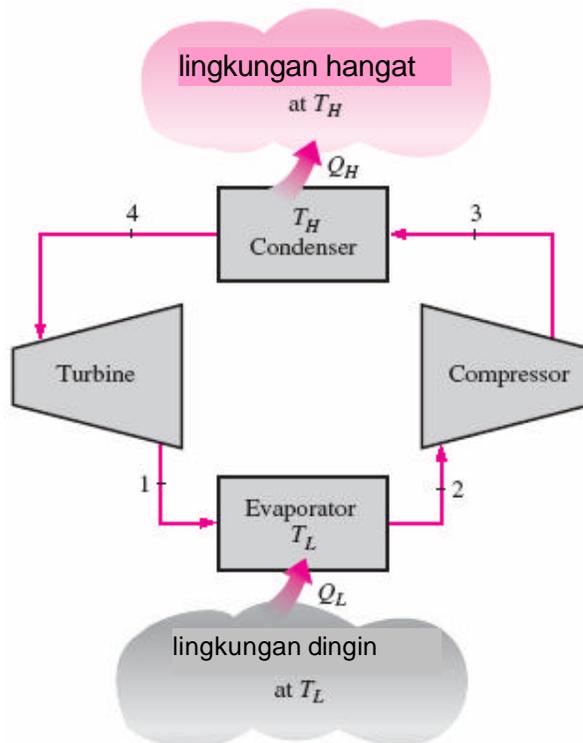
Gambar 23.1 Prinsip dasar dari mesin pendingin dan pemanas

Refrigerator atau mesin pendingin bekerja dengan menyerap kalor pada suhu rendah ( di dalam ruangan) kemudian dibuang ke suhu yang lebih tinggi ( di luar ruangan). Pompa kalor bekerja dengan menyerap kalor pada suhu rendah ( di luar ruangan) kemudian dibuang ke suhu yang lebih tinggi ( di dalam ruangan). Jadi perbedaan dari kedua sistem tersebut adalah pemanfaatan kalornya. Untuk refrigerator, kalor harus dibuang ke lingkungan, tetapi untuk pompa kalor, kalor harus diambil dari lingkungan untuk pemanasan.

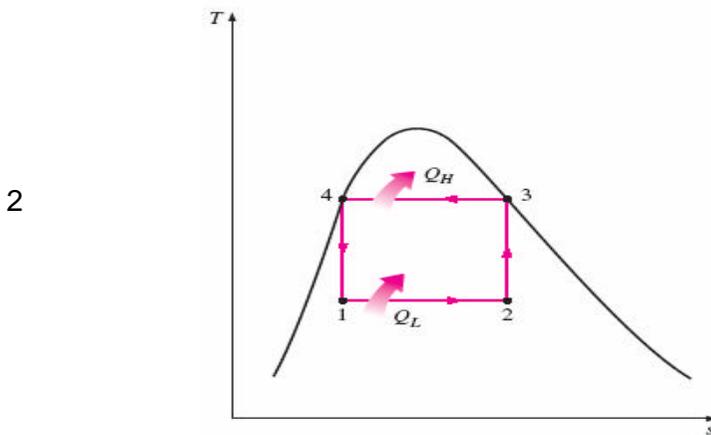
$$COP_{HP} = \frac{\text{efek pemanasan}}{\text{kerja masuk}} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} \quad COP_{RF} = \frac{\text{efek pendinginan}}{\text{kerja masuk}} = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$

$$COP_{HP} = COP_{RF} + 1$$

Mesin refrigerasi ini bekerja menggunakan siklus atau daur kompresi uap, dimana fluida kerjanya disebut dengan refrigeran. Dasar dari daur ini dikembangkan dari daur refrigerasi carnot. Secara skematik daur refrigerasi carnot ini dapat dilihat pada gambar 23.2 dan 25.3



Gambar 23.2 Daur refrigersi carnot



Gambar 23.3 Diagram t-s daur refrigerasi carnot

Proses kerjanya adalah sebagai berikut;

- 1-2 Proses penyerapan kalor  $Q_L$  isothermal oleh refrigeran dari suhu rendah  $T_L$
- 2-3 Proses kompresi adiabatik dan temperatur menjadi  $T_H$ .
- 3-4 Proses pengeluaran kalor  $Q_H$  isothermal oleh refrigeran pada suhu tinggi  $T_H$  refrigeran berubah fasa dari uap jenuh menjadi cairan jenuh
- 4-1 Proses ekspansi adiabatik sehingga temperatur turun mejadi  $T_L$

Dari proses kerja tersebut dapat dirumuskan koefisien prestasi yang dirumuskan sebagai berikut

$$COP_{HP,carnot} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \qquad COP_{RF,carnot} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

## B. Daur Refrigerasi Kompresi Uap

Daur refrigerasi carnot menghasilkan efisiensi sistem paling tinggi sehingga daur ini sering menjadi acuan. Tetapi proses kerja yang menggunakan daur refrigerasi carnot dalam aplikasinya tidak praktis dan sulit untuk diwujudkan. Seperti telah dibahas sebelumnya untuk proses penyerapan kalor dan pembuangan kalor secara isothermal tidak ada masalah [ proses 1-2 dan 3-4], kondisi ini dapat dibuat tanpa mengalami kesukaran. Penyerapan kalor dengan evaporator dan pembuangan kalor dengan kondensor. Kesulitan muncul apabila kita mengkompresi fluida dengan kondisi dua fasa antara cairan dan uap [proses 2-3]. Kemudian kesulitan terjadi juga apabila kita mengekspansi fluida dalam keadaan cairan [proses 4-1]

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dibuat solusi sebagai berikut;

- Proses kompresi **2-3** harus berlangsung pada kondisi uap semua pada kompresor
- Proses ekspansi **4-1** fluida pada turbin diganti diekspansikan pada katup ekspansi

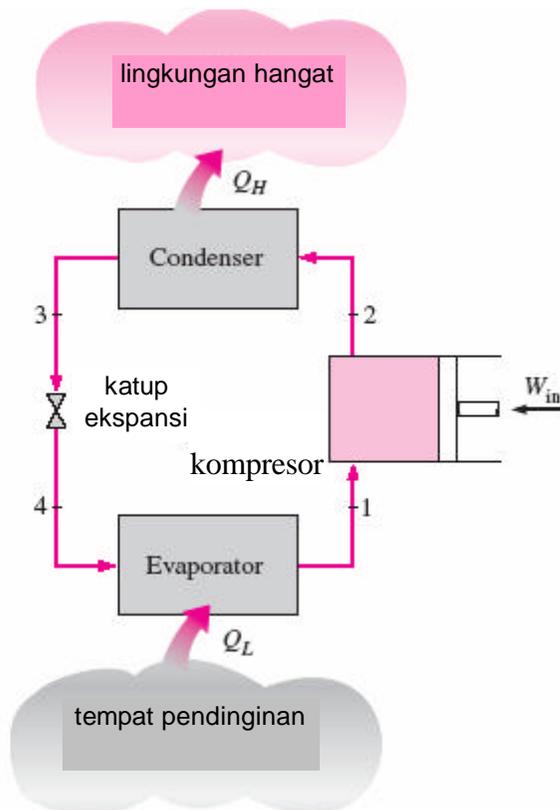
Apabila siklus carnot digambar ulang dengan mengubah kedua hal tersebut di atas didapat siklus atau daur kompresi uap, diagram skema dan T-S dapat dilihat pada gambar [gambar 23.2 dan 25.3]

Proses kerjanya adalah sebagai berikut;

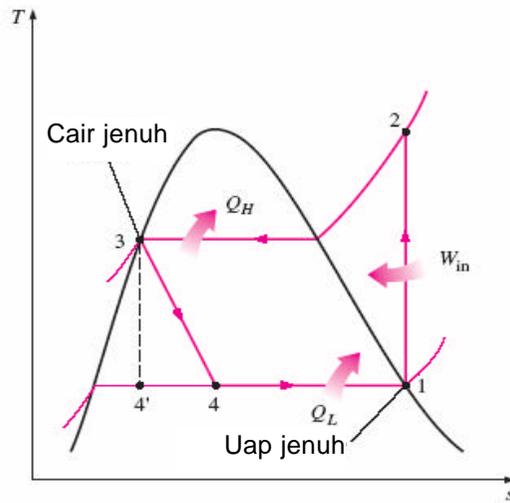
- 1-2** Proses kompresi adiabatik pada kompresor
- 2-3** Proses pengeluaran kalor isobarik pada kondensor
- 3-4** Proses troting pada katup ekspansi
- 4-1** Proses penyerapan kalor isobarik pada evaporator

Dari proses kerja tersebut dapat dirumuskan koefisien prestasi yang dirumuskan sebagai berikut

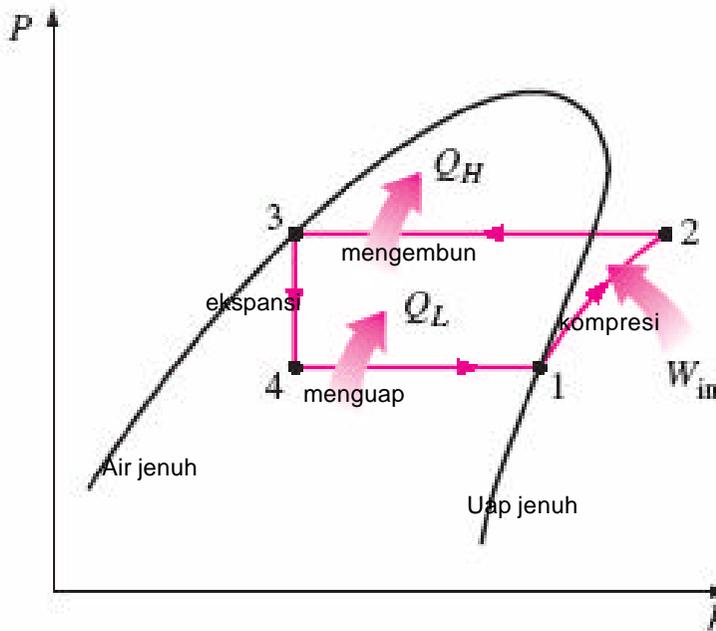
$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} \quad COP_{RF,carnot} = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$



Gambar 23. 4 Daur refrigerasi kompresi uap



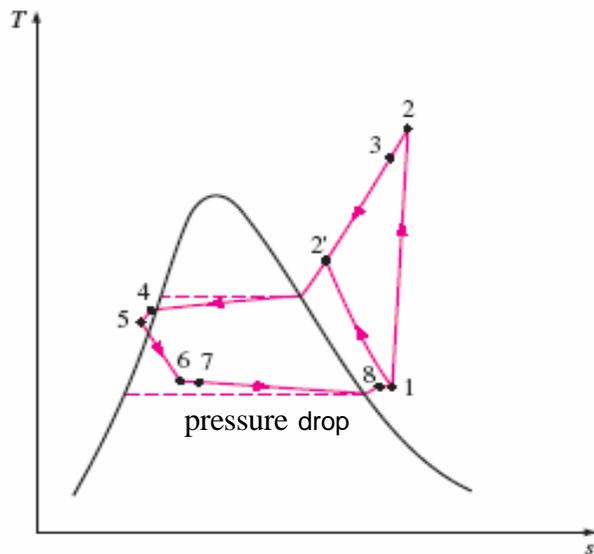
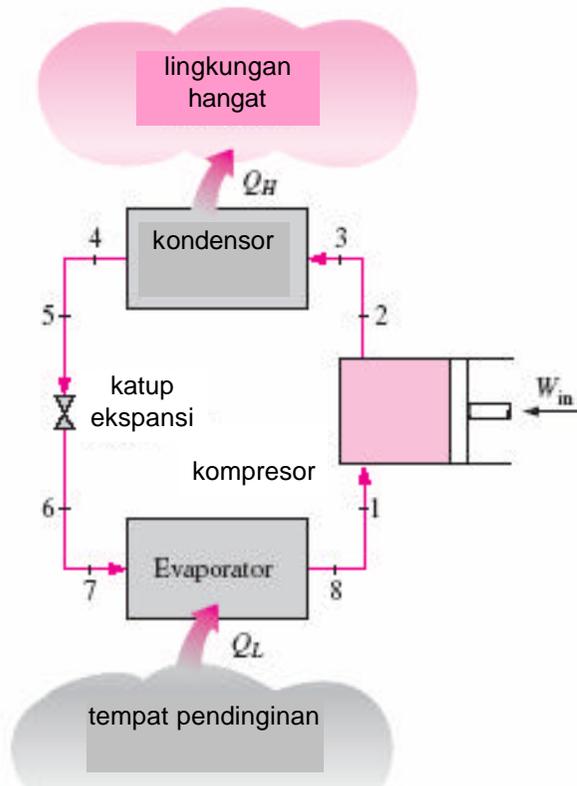
Gambar 23.5 Diagram t-s siklus kompresi uap



Gambar 23.6 Diagram p-h daur kompresi uap

Siklus kompresi uap yang telah dibahas di atas adalah siklus kompresi uap ideal, semua proses dianggap mampu balik dan tidak ada kerugian. Akan tetapi proses seperti itu tidak dapat dilaksanakan, sebagai contoh untuk proses kompresi uap pada kompresor tidak mungkin tanpa kerugian, karena ada gesekan dan timbul panas selama proses kompresi jadi prosesnya tidak adiabatik lagi (1-2'). Proses aliran uap masuk

evaporator (2-5) dan kondensor (6-8) tidak mungkin tanpa mengalami *pressure drop*. Adapun siklus aktual dapat dilihat pada gambar sebagai berikut [gambar 23.7]



Gambar 23.7 Daur kompresi uap aktual

Fluida kerja yang dipakai pada sistem refrigerasi kompresi uap adalah fluida kerja dengan karakteristik khusus yaitu mampu mengembun dengan baik, mampu menguap dengan baik dan mempunyai daya serap kalor yang baik. Sifat-sifat ini sangat dibutuhkan karena pas dengan jalannya proses sistem daur kompresi uap. Refrigeran yang mudah mengembun akan melepas panas yang baik kelingkuangan di kondensor Pada gambar terlihat refrigeran akan melepas panas dalam proses pengembunan sebesar  $Q_H$ , pada akhir proses pengembunan refrigeran sepenuhnya menjadi cair (titik 3). Sifat penguapan yang baik berpengaruh terhadap kemampuan yang sering dinamakan “efek pendinginan” atau “dampak refrigerasi”, sifat inilah yang paling penting untuk pemilihan refrigeran. Pada proses penguapan pada evaporator adalah proses penyerapan kalor pada “ daerah pendinginan”, pada akhir proses semua refrigeran harus dalam kondisi uap semua (jenuh), jika masih terdapat cairan akan sangat merugikan pada proses kompresi.

### **C. Peralatan Utama Sistem Refrigerasi Kompresi Uap**

Peralatan utama yang mendukung sistem daur refrigerasi dapat dijelaskan dengan gambar diagram siklus refrigerasi pada *Air conditioning* (AC). Adapun komponen komponen utama dari daur kompresi uap pada AC yaitu

#### **[1]Kompresor**

Kompresor adalah sebagai penggerak refrigeran untuk bersirkulasi.

#### **[2]Kondensor**

Kondensor berfungsi untuk membuang kalor dari refrigeran kelingkuangan

#### **[3]Katup ekspansi**

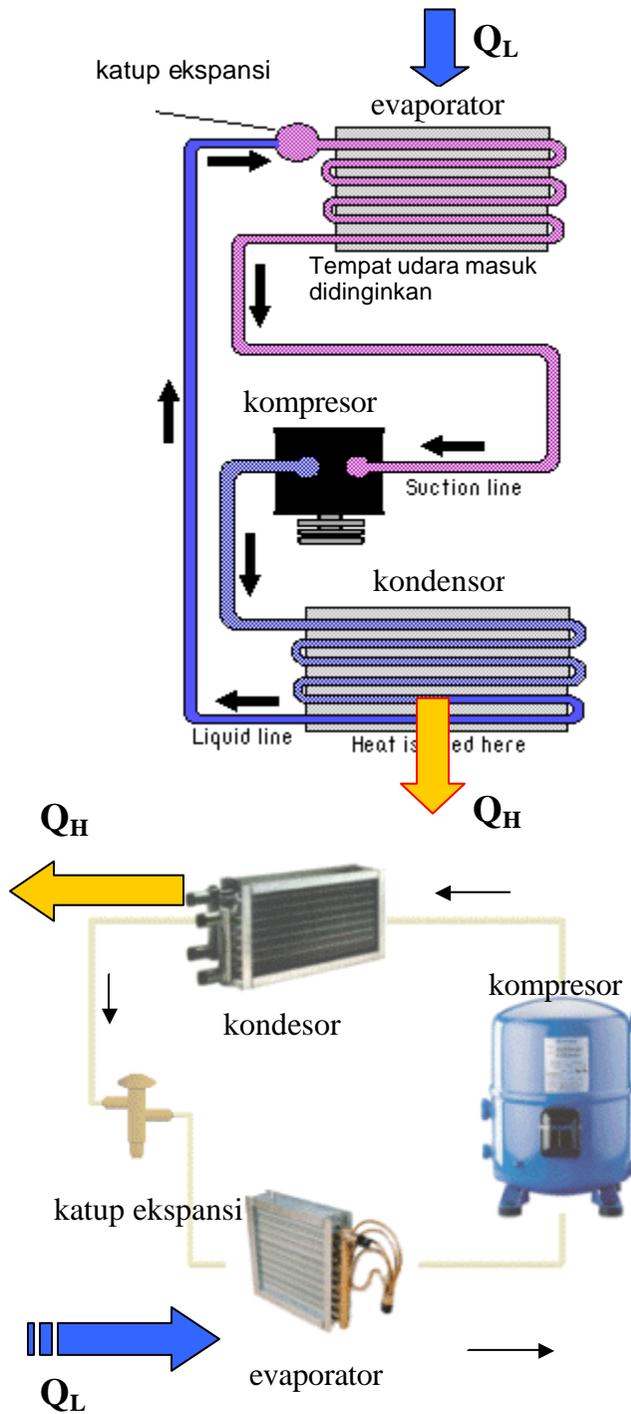
Katup ekspansi adalah alat yang berfungsi untuk mengekspansikan refrigeran sehingga tekanannya turun.

#### **[4]Evaporator**

Evaporator adalah tempat dimana kalor dari lingkungan diserap untuk digunakan penguapan refrigeran.

Refrigeran cair bertekanan tinggi masuk katup ekspansi, kemudian tekanannya diturunkan sebelum masuk evaporator. Pada evaporator refrigeran cair bertekanan rendah menguap dengan menyerap panas dari lingkungan. Uap refrigeran bertekanan rendah kemudian masuk kompresor, pada kompresor uap refrigeran dimampatkan sehingga energinya bertambah. Uap dengan tekanan tinggi masuk kondensor untuk diembunkan dengan melepaskan panas ke lingkungan dan dari sini prosesnya akan berulang.

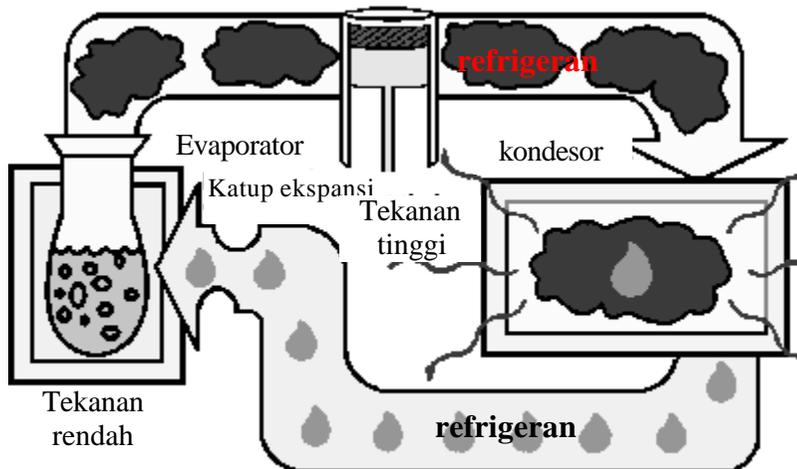
Secara alamiah semua proses alir terjadi karena ada beda tekan, yaitu dari tekanan lebih tinggi ke tekanan lebih rendah. Jadi tidak mungkin selama refrigeran mengalir tanpa ada penurunan tekanan (pressure drop), hal ini terjadi karena selama mengalir refrigeran banyak kehilangan energi untuk mengatasi hambatan aliran.



Gambar 23.8 Bagan mesin Air Conditioner

## D. Refrigeran

Fungsi refrigeran pada daur mesin refrigerasi adalah sebagai media pembawa kalor, yaitu refrigeran pada kondisi tekanan rendah akan menyerap kalor pada evaporator, kemudian kalor yang diserap akan dilepaskan pada kondensor. Sifat paling penting dari pemilihan refrigeran adalah dampak refrigerasinya yaitu jumlah kalor yang dapat diserap pada evaporator per kg nya. Sifat yang lainnya adalah laju aliran uap hisap perkilowattnya, sifat ini akan menentukan pemilihan alat kompresinya.



Gambar 23.9 Aliran refrigeran di dalam saluran pipa

Sebagai contoh beberapa refrigeran sebagai berikut ;

- **Udara**, penggunaan umum udar sebagai refrigeran adalah di peawat terbang, COP nya rendah
- **Amonia**. Instalasi-instalasi bersuhu rendah dan banyak dipakai pada daur refrigerasi absorpsi
- **Refrigeran 12** atau R 12 banyak dipakai pada mesin pendingin rumah tangga dan Ac mobil
- **Refrigeran 22**. Karakteristiknya lebih menguntungkan dibandingkan R12 sehingga R 22 banyak dipakai sebagi pengganti R12 untuk mesin refrigerasi

Disamping jenis refrigeran yang telah disebutkan di atas, ada satu lagu jenis yaitu refrigeran sekunder. Refrigeran sekunder berfungsi untuk menyerap kalor dari komponen-komponen yang didinginkan kemudian dibawa ke evaporator pada sistem refrigerasi. Refrigeran sekunder mengalami perubahan suhu selama proses tetapi tidak mengalami perubahan fasa. Sebagai contoh refrigeran sekunder adalah air, brine (larutan garam) dan larutan anti beku (antifreezes).

## E. Perhitungan Koefisien Unjuk Kerja

### E.1 COP

Penentuan ukuran keefektifan kerja (efisiensi) sistem mesin konversi energi secara umum biasanya adalah membandingkan antara ke luar ( kerja berguna ) dengan masukan ( energi masuk) yaitu :

$$h_{mke} = \frac{\text{keluaran (kerja berguna)}}{\text{energi masukan}}$$

Untuk aplikasi refrigerasi ukuran keefektifan kerja dari sistem adalah berdasarkan dari tujuan kerja sistem. Pada sistem refrigerasi ke luaran yang diharapkan adalah jumlah panas yang harus dipindahkan ke luar lingkungan yang lebih panas sehingga dari perumusan hukum termodinamika II perbandingannya sering dinamakan dengan coefisien of performance COP, dirumuskan sebagi berikut :

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \text{ (mesin panas)}$$

$$COP_{RF} = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \text{ (mesin refrigerasi)}$$

### E.2 Dampak refrigerasi atau “efek pendinginan”

Dampak refrigerasi adalah kemampuan dari sistem untuk melakukan penyerapan panas dari lingkungan, proses ini terjadi pada evaporator, dampak refrigerasi dapat dihitung dengan persamaan

$$\text{Dampak refrigerasi} = h_1 - h_4 \text{ ( KJ/Kg)}$$

### E.3. Daya kompresor

Daya kompresor adalah daya yang diberikan ke fluida kerja “refrigeran” dengan proses pemampatan. Daya tersebut dipakai refrigeran untuk proses siklus aliran. Daya kompresor dapat dihitung dengan persamaan

$$\text{Daya kompresor} = \dot{m}(h_2 - h_1) \text{ KWatt}$$

dengan  $\dot{m}$  =laju aliran massa refrigeran

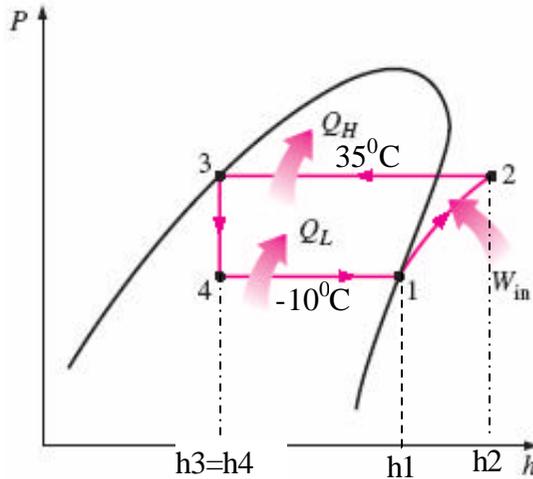
### E.4 Daya refrigerasi

Daya refrigerasi didefinisikan sebagai laju kerja pendinginan dari sistem refrigerasi. Perhitungan daya refrigerasi adalah kebalikan dari perhitungan COP

$$\text{Daya refrigerasi} = 1/COP_{RF} = \frac{W_{net,in}}{Q_L} = \frac{h_2 - h_1}{h_1 - h_4} \text{ KWatt}$$

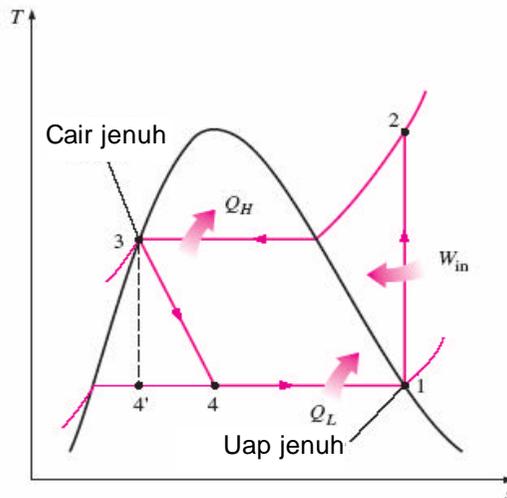
**Soal :**

Suatu daur refrigerasi kompresi uap standar menghasilkan 30 kWatt refrigerasi dengan menggunakan refrigeran R22, bekerja dengan suhu pengembunan 35 dan suhu penguapan -10. Hitunglah efek pendinginan ,laju massa aliran refrigeran, daya yang dibutuhkan kompresor,COP, dan daya refrigerasi



**Jawab :**

Dari properti Refrigeran R22 pada suhu -10 enthalpi  $h_1 = 401,6$  kJ/Kg (uap jenuh R22), pada suhu pengembunan enthalpi  $h_2 = 435,2$  kJ, besar  $h_3$  dan  $h_4$  adalah identik dan sama dengan enthalpi cairan R22  $h_3 = 243,1$  kJ/Kg.



Data :  $h_1 = 401,6$  KJ/Kg  
 $h_2 = 435$  KJ/Kg

$$h_3 = h_4 = 243,1 \text{ KJ/Kg}$$

a. Dampak refrigerasi adalah  $h_1 - h_4 = 401,6 \text{ kJ} - 243,1 \text{ kJ} = 158,5 \text{ KJ/Kg}$

b. Laju aliran refrigeran dapat dihitung dengan membagi daya refrigerasi dengan dampak refrigerasi

$$Q = \frac{P_{ref}}{h_1 - h_4}$$

$$Q = \frac{50 \text{ kWatt}}{158,5 \text{ kJ / Kg}} = 0,315 \text{ Kg / dtk}$$

c. Daya kompresor  $P_{comp} = Q \cdot (h_2 - h_1)$

$$P_{comp} = 0,315 \cdot (435,6 - 401,6) \text{ kWatt} \\ = 10,6 \text{ kWatt}$$

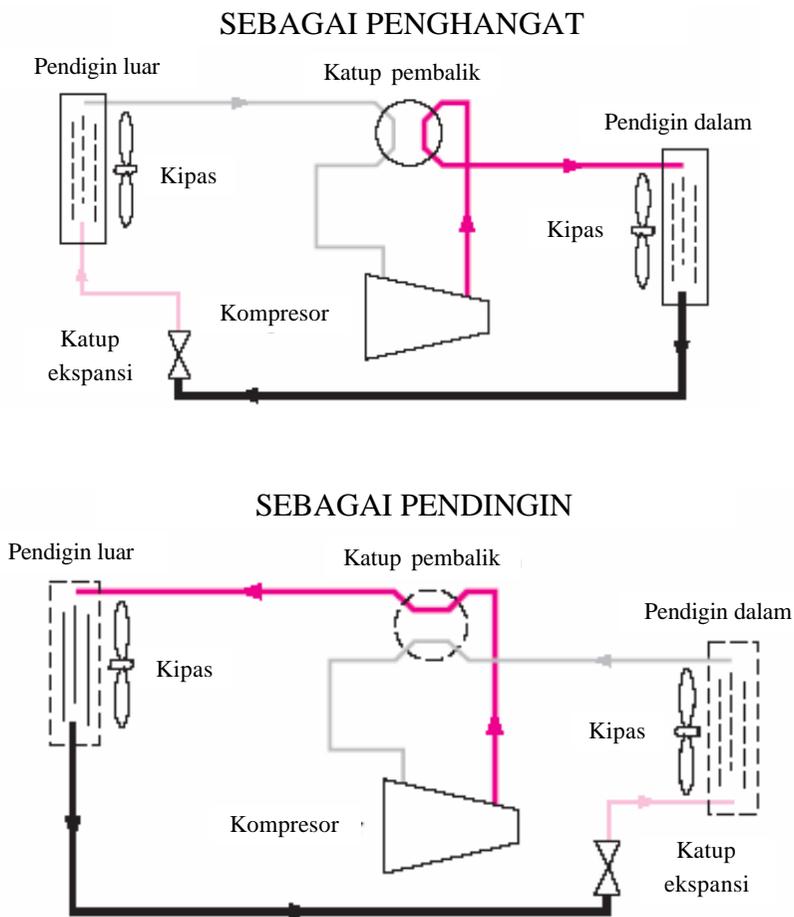
$$COP_{RF} = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{\text{dampak refrigerasi}}{\text{daya kompresor}} = \frac{50 \text{ kWatt}}{10,6 \text{ kWatt}} = 4,72$$

d. Daya refrigerasi adalah kebalikan dari COP

$$\text{Daya refrigerasi} = 10,6 \text{ kWatt} / 50 \text{ kWatt} = 0,212 \text{ Kwatt/Kwatt}$$

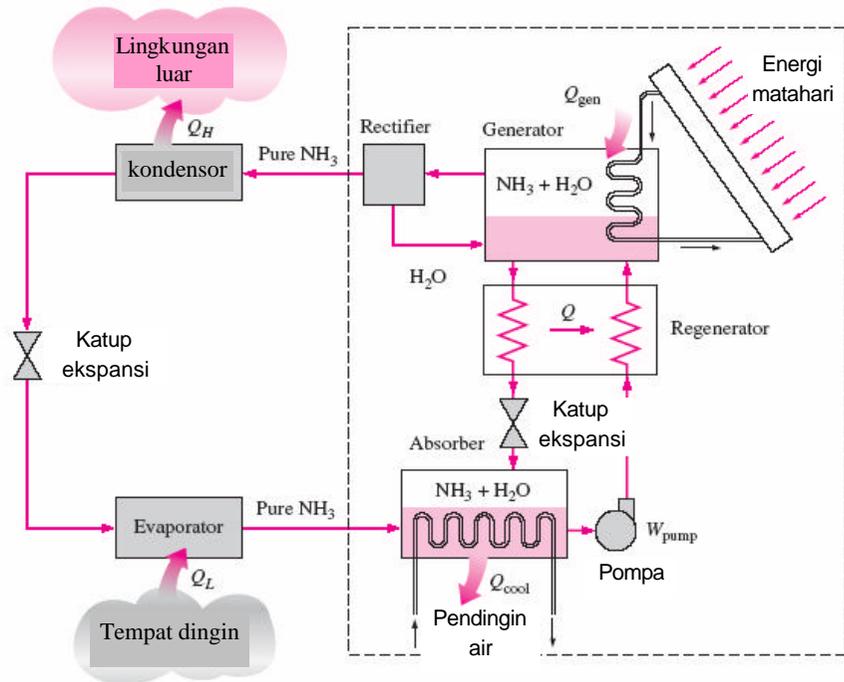
## F. Heat pump atau Pompa Kalor

Pada prinsipnya kerja mesin refrigerasi dan pompa kalor adalah sama, mempunyai komponen yang sama. Perbedaannya terletak pada tujuannya, kalau mesin refrigerasi bekerja untuk pendinginan ruangan, sedangkan pompa kalor bekerja untuk pemanasan ruangan. Gambar 23.10 di bawah ini adalah skema dari heat pump, mesin ini dapat dipakai untuk pendinginan dan pemanasan, hal ini karena sistemnya dipasang katup pembalik aliran.



Gambar 23.10 Mesin pendingin sekaligus pemanas

## G. Refrigerasi Absorpsi



Gambar 23.11 Skema refrigerasi absorpsi

Dari gambar 23.11 tersebut penjelasan adalah sebagai berikut. Refrigeran adalah air amonia. Pada evaporator amonia akan mengalami penguapan dan menyerap panas dari lingkungan  $Q_L$ , selanjutnya uap amonia masuk absorber dan bercampur dengan air membentuk larutan  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . Pada absorber larutan amonia air didinginkan dan melepas panas ke lingkungan  $Q_{\text{cool}}$ , larutan amonia air kemudian dipompa menuju generator, melewati regenerator dimana larutan tersebut dipanasi awal. Selanjutnya larutan amonia air diuapkan dengan energi solar, karena suhu penguapan amonia lebih rendah maka amonia akan menguap lebih cepat. Uap amonia dilewatkan ke *rectifier*, disini uap air yang ikut terbawa dipisahkan, selanjutnya  $\text{H}_2\text{O}$  dikembalikan ke generator. Proses terus berlanjut, amonia kemudian melawati kondensor dan mengalami pendinginan dengan melepas panas  $Q_H$  ke lingkungan. Amonia kemudian melawati katup ekspansi untuk diturunkan tekanannya. Amonia dengan tekanan rendah akan menyerap panas pada evaporator dan menguap. Dari evaporator selanjutnya proses terus berulang.

Perbedaan refrigerasi absorpsi dengan kompresi uap adalah pada proses kompresinya. Untuk daur kompresi uap, proses kompresi refrigeran dalam keadaan fase uap, sedangkan pada daur refrigerasi

absorsi proses kompresi pada pompa dan refrigeran dalam keadaan larutan jenuh. Proses kompresi dengan pompa lebih menguntungkan karena memerlukan lebih sedikit energi yang diperlukan dibandingkan dengan menggunakan kompresor. Untuk komponen-komponen seperti kondensor, evaporator dan katup ekspansi masih sama untuk kedua sistem ini. Refrigerasi absorsi dianggap tidak efisien karena lebih kompleks dan memerlukan sistem pendinginan yang lebih mahal. Daur ini banyak dipakai untuk industri besar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ackermann, T., 2005, *Wind Power in Power Sistem*, England, John Wiley and Sons Ltd.
- Anonamius, 1992. *Doe Fundamental Handbook of Thermodynamic*.
- Cengel, Y.A., 2005. *Thermodynamics An Engineering Approach*. Edisi 5 .McGraw Hill. New York.
- Dietzel, F., 1993. *Turbin, Pompa dan Kompresor* , Jakarta Erlangga.
- Doland, J.J., 1984. *Hydro Power Engineering*. New York. The Ronald Press Company.
- El-Mallahawy, F., 2000, *Fundamentals and Technology of Combustion*, McGraw Hill.
- Heat Transfer and Fluid Flow*, U.S. Departement of Energy, Washington D.C
- Mathur, M.L. dan Sharma, R.P., 1980, *A course in Internal Combustion Engine*, Edisi 3, Delhi India, Hanpat Rai and Sons, Nai Sarak
- Sayig, A.A.M, 1997, "Renewable Energi", *Journal of the World Renewable Energi*, UK
- Shlyakin, P., 1999. *Teori dan Perancangan Steam Turbines*. Jakarta Erlangga.
- Silalahi, Bernnet NB. 1995. *Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja*. Jakarta: PT Pustaka Binaman Pressindo
- Sularso dan Tahara, H., 2000. *Pompa dan Kompresor*. Jakarta Pradnya Paramita.
- Dinas Tenaga Kerja dan Transmigrasi Provinsi Jawa Tengah. 2007. *Bimbingan Teknis Calon Ahli K3*
- Sumakmur PK. 1996. *Keselamatan Kerja & Pencegahan Kecelakaan*. Jakarta: PT. Gunung Agung
- . 1996. *Higene Perusahaan dan Kesehatan Kerja*. Jakarta: PT. Gunung Agung

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Profil tegangan dan regangan .....	1
Gambar 1.2 Profil tegangan dan regangan .....	2
Gambar 1.3 Radius kurva.....	3
Gambar 1.4 Torsi pada batang pejal .....	4
Gambar 1.5 Torsi pada batang berlubang.....	4
Gambar 1.6 Rem Cakram.....	5
Gambar 1.7 Rem Tromol.....	5
Gambar 1.8 Roda gigi metrik.....	5
Gambar 1.9 Roda gigi spurs.....	6
Gambar 1.10 Roda gigi helik .....	6
Gambar 1.11 Roda gigi dobel helik .....	6
Gambar 1. 12 Roda gigi Bevel.....	7
Gambar 1.13 Roda gigi cacing .....	7
Gambar 1.14 Klasifikasi Bantalan.....	8
Gambar 1.15 Klasifikasi Pegas.....	9
Gambar 1.16 Macam-macam Poros.....	0
Gambar 1.17 Poros dengan penggunaannya .....	11
Gambar 1.18 Kontruksi dasar dari pemasangan transmisi.....	12
Gambar 1.19 Instalasi kompresor dengan dan tanpa transmisi .....	12
Gambar 1.20 Model transmisi roda gigi.....	13
Gambar1.21 Tramisi rantai .....	13
Gambar 1.22 Macam-macam sabuk .....	14
Gambar 1.23 Furnace dengan pemanas listrik.....	14
Gambar 1.24 Blok mesin dari besi cor.....	15
Gambar 1.25 Amplitudo getaran besi cor dan baja .....	15
Gambar 2.1 Tanur tinggi .....	19
Gambar 2.3 Penuangan besi cor.....	20
Gambar 2.4 Cetakan pasir dan hasil dari pengecoran .....	20

Gambar 2.5 Hasil proses pembentukan.....	21
Gambar 2.6 Alat yang dipakai dalam kerja bangku.....	21
Gambar 2. 7 Mesin bor duduk.....	22
Gambar 2.8 Mesin gergaji.....	23
Gambar 2.9 Mesin potong.....	23
Gambar 2.10 Mesin bubut dengan pirantinya .....	24
Gambar 2.11 Proses pembubutan .....	25
Gambar 2.12 Macam-macam Pahat .....	25
Gambar 2. 13 mesin CNC fris vertikal.....	26
Gambar 2.14 Pahat untuk mesin fris.....	26
Gambar 2.15 Mesin bubut CNC .....	27
Gambar 2.16 Grafik proses keadaan termodinamik.....	28
Gambar 2.19 Energi atau kerja pada piston.....	31
Gambar 2.20 Energi mekanik poros turbin gas.....	32
Gambar 2.21 Perubahan energi pada motor bakar.....	33
Gambar 2.22 Konversi energi pada turbin ( uap, gas,air) .....	34
Gambar 2.23 Konversi energi pada pompa atau kompresor .....	34
Gambar 2.24 Pompa sebagai mesin Konversi energi .....	35
Gambar 2.25 Tranfer energi panas dari tungku ke air di panci.....	35
Gambar 2.26 Energi mekanik pergeseran translasi (linier).....	36
Gambar 2.27 Energi mekanik pergeseran rotasi ( angular) .....	36
Gambar 2.28 Mesin-mesin konversi energi dengan kerja poros.....	37
Gambar 2.29 Dinamika perubahan energi pada suatu benda kerja.....	38
Gambar 2.30 Proses perubahan energi pada sistem terbuka.....	39
Gambar 2.31 Proses perubahan energi pada sistem tertutup .....	39
Gambar 2.32 Konversi energi pada turbin .....	40
Gambar 2.33 Konversi pada pompa .....	41
Gambar 2.34 Skema sederhana dari hukum termodinamika II.....	42
Gambar 2.35 Diagram $p$ - $V$ proses volume konstan .....	43

Gambar 2.36 Diagram $p$ - $v$ proses tekanan konstan .....	44
Gambar 2.37 Diagram $p$ - $v$ proses temperatur konstan .....	44
Gambar 2.38 Diagram $p$ - $v$ proses adiabatik .....	45
Gambar 2.39 Diagram $p$ - $v$ proses politropik .....	45
Gambar 2.40 Hubungan tekanan pengukuran, tekanan absolute, dan tekanan atmosfer.....	47
Gambar 2.41 Hubungan ketinggian dengan tekanan .....	48
Gambar 2.42 Gerak fluida pada fluida yang diam .....	49
Gambar 2.43 Perubahan energi pada penampang pipa .....	50
Gambar 2.44 Profil aliran fluida .....	51
Gambar 2.45 Penambahan energi pompa ke aliran.....	53
Gambar 2.46 Profil saluran fluida E.6 Kondisi aliran fluida cair.....	53
Gambar 2.47 Pola aliran Laminar dan turbulen.....	54
Gambar 2.48 Perpindahan kalor konduksi pada sebuah plat.....	55
Gambar 2.49 Proses penguapan dan pelepasan panas .....	56
Gambar 2.50 Proses perpindahan kalor radiasi pada jendela rumah .....	56
Gambar 2.51 Proses pengolahan minyak bumi.....	60
Gambar 2.52 Proses destilasi bahan-bakar cair.....	61
Gambar 2.53 Mesin uji nilai oktan CFR .....	63
Gambar 3.1.Berbagai macam alat pelindung diri .....	69
Gambar 3.2 Segitiga Api ( <i>Triangle of Fire</i> ) .....	72
Gambar 4.1 Meja gambar.....	77
Gambar 4.2 Cara menempel kertas pada meja gambar .....	78
Gambar 4.3 Bentuk pensil .....	78
Gambar 4.4 Pena Rapido .....	79
Gambar 4.5 Satu set pengaris.....	80
Gambar 4.6 Jangka .....	80
Gambar 4.7 Pelindung penghapus .....	81

Gambar 4.8 Mal lengkung .....	81
Gambar 4.9 Hasil mal lengkung .....	81
Gambar 4.10 Gambar proyeksi amerika .....	82
Gambar 4.11 Gambar Isometris Komponen .....	82
Gambar 4.12 Kop Gambar dengan bingkainya .....	83
Gambar 4.13 Proyeksi.....	83
Gambar 4.14 Proyeksi aksonometri dan ortogonal .....	84
Gambar 4.15 Isometri.....	84
Gambar 4.16 Dimetri .....	85
Gambar 4.17 Trimetri .....	85
Gambar 4.18 sumbu isometri .....	86
Gambar 4.19 Proyeksi isometri .....	86
Gambar 4.20 Proyeksi miring .....	87
Gambar 4.21 Proyeksi Isometri dan Proyeksi miring .....	87
Gambar 4.22 cara pandang gambar prespektif.....	88
Gambar 4.23 titik hilang prespektif.....	88
Gambar 4.24 Pandangan Ortogonal .....	89
Gambar 4.25 penyajian gambar poros .....	90
Gambar 4.26 Ukuran beserta toleransinya .....	91
Gambar 4.27 penyajian ulir lengkap.....	92
Gambar 4. 28 Penyajian gambar ulir.....	92
Gambar 4.29 Keterangan Gambar Ulir .....	93
Gambar 4.30 lambang pengerjaan.....	93
Gambar 4.31 Gambar AutoCad .....	96
Gambar 5.1 Instalasi Pompa.....	97
Gambar 5.2 Instalasi pompa rumah tangga .....	98
Gambar 5.3 Proses pemompaan .....	98
Gambar 5.4 Perubahan energi zat cair pada pompa .....	99
Gambar 5.5 Klasifikasi pompa berdasar bentuk impeler.....	100
Gambar 5.6 Klasifikasi pompa berdasar rumah pompa .....	100
Gambar 5.7 Klasifikasi pompa berdasarkan jumlah aliran masuk .	101

Gambar 5.8 Pompa satu tingkat .....	101
Gambar 5.9 Pompa banyak tingkat ( <i>multistage</i> ) .....	102
Gambar 5.10 Pompa horizontal.....	102
Gambar 5.11 Pompa vertikal.....	103
Gambar 5.12 Pompa sumuran kering dan basah.....	103
Gambar 5.13 Konstruksi pompa .....	104
Gambar 5.14 Konstruksi pompa khusus.....	105
Gambar 5.15 Pompa sembur ( <i>jet pump</i> ) .....	106
Gambar 5.16 Pompa viscous .....	108
Gambar 5.17 <i>Cut Water</i> .....	109
Gambar 5.18 Volut tunggal dan ganda.....	109
Gambar 5.19 Pompa Chopper.....	110
Gambar 5.20 Pompa <i>recessed impeller</i> .....	110
Gambar 5.21 Pompa lumpur ( <i>slurry</i> ) .....	111
Gambar 5.22 Pompa volut LFH .....	112
Gambar 6.1 Ukuran-ukuran dasar pompa .....	113
Gambar 6.2 Harga $n_s$ dengan bentuk impeler dan jenis pompa ....	114
Gambar 6.3 Grafik karakteristik pompa dengan $n_s$ kecil.....	115
Gambar 6.4 Grafik karakteristik pompa dengan $n_s$ sedang .....	116
Gambar 6.5 Grafik karakteristik pompa dengan $n_s$ besar.....	116
Gambar.6.6 Head statis total .....	118
Gambar 6.7 Head statis total $p_1 = p_2 = 1$ atmosfer (tandon terbuka).....	118
Gambar 6.8 Head statis hisap [A] pompa di bawah tandon, [b] pompa di atas tandon .....	119
Gambar 6.9 Head statis buang [A] ujung terbenam, [b] ujung mengambang .....	119
Gambar 6.10 Head kecepatan.....	120
Gambar 6.11 Koefisien kavitasi.....	126
Gambar 6.12 Pompa dan penggerak mula motor listrik .....	131
Gambar 6.13 Grafik kerja berguna .....	133

Gambar 6.14 Proses kavitasi .....	136
Gambar 6.15 Proses kavitasi .....	136
Gambar 6.16 Abrasi pada impeler .....	136
Gambar 6.17 Kerusakan impeler karena kavitasi .....	137
Gambar 6.18 Pompa tegak dengan penggerak motor listrik.....	138
Gambar 6.19 Pompa dengan penggerak motor listrik.....	138
Gambar 6.20 Pompa <i>portable</i> dengan penggerak motor bakar .....	139
Gambar 6.21 Pompa <i>portable</i> dengan penggerak motor bakar .....	139
Gambar 6.22 Penggunaan transmisi <i>belt</i> .....	140
Gambar 6.23 Instalasi pompa dengan sumber energi angin .....	140
Gambar 6.24 Pompa dengan penggerak mula turbin angin .....	141
Gambar 6.25 Grafik kurva head kapasitas.....	143
Gambar 6.26 Kurva head pompa dengan variasi head statis .....	143
Gambar 6.27 Kurva head pompa dengan kenaikan tahanan.....	144
Gambar 6.28 Grafik head kapasitas dengan variasi operasi pompa	144
Gambar 6.29 Grafik head kapasitas pompa axial .....	145
Gambar 6.30 Berbagai macam katup .....	147
Gambar 6.31 Kurva head kapasitas dengan pengaturan katup.....	147
Gambar 6.32 Kurva head kapasitas dengan pengaturan putaran ..	148
Gambar 6.33 Kurva head kapasitas dengan pengaturan sudut impeler.....	149
Gambar 6.34 Kurva head kapasitas dengan pengaturan jumlah pompa .....	149
Gambar 6.35. Pengaturan kapasitas dengan reservoir atau tandon	150
Gambar 6.36 Pengaturan kapasitas dengan tangki tekan .....	151
Gambar 7.1 Fluktuasi tekanan pada pompa volut.....	157
Gambar 8.1 Pompa perpindahan positif gerak bolak-balik .....	160
Gambar 8.2 Pompa perpindahan positif gerak putar ( <i>rotary</i> ).....	161
Gambar 8.3 Pompa perpindahan positif gerak putar ( <i>rotary</i> ).....	161

Gambar 8.4 Pompa plunger tekanan tinggi .....	163
Gambar 8.5 Pompa plunger tekanan tinggi .....	164
Gambar 8.6 Kapasitas aliran pada pompa torak .....	164
Gambar 8.7 Macam-macam katup .....	165
Gambar 8.8 Cara kerja pompa torak .....	166
Gambar 8.9 Pompa torak .....	167
Gambar 8.10 Cara kerja pompa diafragma penggerak mekanik..	168
Gambar 8.11 Pompa diafragma penggerak hidrolik .....	169
Gambar 8.12 Pompa diafragma penggerak pegas mekanik .....	170
Gambar 8.13 Pompa roda gigi internal eksternal .....	171
Gambar 8.14 Pompa lobe .....	172
Gambar 8.15 Pompa lobe dengan 3 buah lobe .....	173
Gambar 8.16 Pompa ulir dengan 3 buah ulir .....	173
Gambar 8.17 Proses penekanan zat cair pada pompa 2 buah ulir.	175
Gambar 8.18 Pompa ulir dengan 2 buah ulir .....	174
Gambar 8.19 Pompa ulir tunggal ( <i>progresive cavity single skrup pump</i> ) .....	175
Gambar 8.20 Pompa vane ( <i>sliding vane rotary pump</i> ) .....	175
Gambar 8.21 Pompa vane dengan 5 buah vane .....	175
Gambar 8.22 <i>Flexible tube pump</i> .....	176
Gambar 8.23 <i>Radial plunger dan axial plunger rotary pump</i> .....	177
Gambar 8.24 <i>Circumferential piston rotary pump</i> .....	177
Gambar 9.1 Pompa ban .....	180
Gambar 9.2 Kompresor udara penggerak motor bakar .....	181
Gambar 9.3 Proses kerja dari kompresor torak kerja tunggal .....	182
Gambar 9.4 Proses kerja dari kompresor torak kerja ganda .....	183
Gambar 9.5 Klasifikasi kompresor .....	184
Gambar 9.6 Kompresor <i>Vane</i> .....	185
Gambar 9.7 Kompresor jenis Root .....	185
Gambar 9.8 Kompresor skrup atau ulir .....	186

Gambar 9.9 Kompresor torak kerja tunggal .....	186
Gambar 9.10 Kompresor torak kerja ganda .....	187
Gambar 9.11 Kompresor sentrifugal satu tingkat.....	187
Gambar 9.12 Kompresor banyak tingkat.....	187
Gambar 9.13 Grafik tekanan kapasitas kompresor .....	188
Gambar 9.14 Proses kompresi isothermal .....	190
Gambar 9.16 Perbandingan kerja yang dibutuhkan untuk proses ..	191
kompresi isothermal dan .....	193
Gambar 9.17 Penghematan kerja pengkompresian dengan memasang kompresor dua tingkat.....	193
Gambar 9.18 Grafik $p$ - $V$ Proses kompresi pada kompresor torak .	198
Gambar 9.19 Kompresor dengan penggerak motor lisrik .....	201
Gambar 9.19 Kompresor <i>Roots</i> .....	201
Gambar 9.20 Konstruksi dari pompa vane dan kompresor vane ....	202
Gambar 9.21 Kompresor torak dengan pendingin udara .....	203
Gambar 9.23 Kompresor torak dengan pendingin air .....	203
Gambar 9.24 Konstruksi kompresor torak silinder .....	204
Gambar 9.25 Konstruksi kompresor torak silinder .....	204
Gambar 9.26 Konstruksi katup kompresor jenis cincin .....	205
Gambar 9.27 Konstruksi katup kompresor jenis pita.....	206
Gambar 9.28 Konstruksi katup kompresor jenis kanal.....	206
Gambar 9.29 Konstruksi katup kompresor jenis kepak.....	206
Gambar 9.30 Pengaturan kapasitas kompresor .....	208
Gambar 9.31 Pelumasan paksa pada kompresor .....	209
Gambar 9.32 Pelumasan luar kompresor torak .....	210
Gambar 9.33 Proses pemampatan pada kompresor sekrup .....	211
Gambar 9.34 Proses pemampatan pada kompresor sekrup injeksi minyak .....	213
Gambar 9.35 Kompresor sekrup injeksi minyak.....	214
Gambar 9.36 Kompresor sekrup kecil kompak jenis injeksi minyak	215
Gambar 9.37 Kompresor sudu jenis injeksi minyak .....	216
Gambar 9.38 Kompresor <i>Roots</i> dengan 2 lobe.....	217

Gambar 9.38 Kompresor <i>Roots</i> .....	218
Gambar 9.40 Kompresor tekanan sedang atau blower .....	219
Gambar 9.41 Konstruksi kompresor aksial .....	220
Gambar 9.42 Konstruksi kompresor aksial radial .....	221
Gambar 10.1 Mesin pembakaran dalam .....	197
Gambar 10.2 Mesin pembakaran dalam .....	198
Gambar 10.3 Mesin pembakaran luar .....	199
Gambar 10.4 Mesin Lenoir .....	200
Gambar 10.5 <i>Otto langen engin</i> generasi pertama .....	201
Gambar 10.6 <i>Otto langen engin</i> generasi kedua .....	202
Gambar 10.7 Prinsip kerja mesin dengan konsep Beau de Rochas .....	203
Gambar 10.8 Mesin Otto pertama .....	204
Gambar 10.9 Mesin Otto horizontal.....	204
Gambar 10.10 Dasar kerja dari mesin Diesel.....	205
Gambar 10.11 Mesin Diesel modern .....	206
Gambar 10.12 Mesin disel 2 langkah .....	206
Gambar 10.14 Proses kerja 2 langkah .....	208
Gambar 10.15 Mesin pembakaran dalam .....	210
Gambar 10.16 Komponen-komponen mesin 4 tak dan 2 tak .....	211
Gambar 10.17 Komponen mesin multi silinder.....	212
Gambar 10.18 Komponen mesin tampak depan dan samping .....	213
Gambar 10.19 Komponen mesin mekanik katup dan torak.....	214
Gambar 11.1 Siklus udara volume konstan.....	246
Gambar 11.2 Siklus Udara Tekanan Konstan .....	247
Gambar 11.3 Mesin otto dan mesin disel .....	248
Gambar 11.4 Siklus gabungan .....	249
Gambar 11.5 Siklus aktual otto.....	250
Gambar 11.6 Siklus aktual disel .....	251
Gambar 11.7 Bagan efisiensi kerja dari motor bakar .....	252

Gambar 11.8 Grafik efisiensi terhadap rasio kompresi mesin otto..	253
Gambar 12.1 Keseimbangan energi pada motor bakar .....	256
Gambar 12.2 Diagram prose konversi energi pada motor bakar ....	257
Gambar 12.3 Properties geometri silinder moto bakar.....	258
Gambar 12.4 Geometri silinder .....	259
Gambar 12.5 Langkah mesin .....	260
Gambar 12.6 Volume langkah dan volume ruang bakar.....	261
Gambar 12.7 Skema pengukuran torsi .....	263
Gambar 12.8 Skema dinamometer .....	263
Gambar 12.9 Mesin uji elektrik.....	266
Gambar 12.10 Mesin uji mekanis.....	267
Gambar 12.11 Diagram indikator mesin uji mekanik.....	268
Gambar 12.12 Diagram indikator mesin uji elektrik.....	269
Gambar 12.13 Kerja indikator otto .....	270
Gambar 12.14 Kerja indikator total.....	271
Gambar 12.15 Supercharger pada motor bakar .....	272
Gambar 12.16 Prinsip turbocharger pada motor bakar.....	273
Gambar 12.17 Instalasi turbocharger pada motor-bakar .....	274
Gambar 12.18 Perubahan diagram indikator dengan supercharging.....	275
Gambar 12.19 Diagram tekanan rata-rata .....	276
Gambar 12.20 Diagram indikator rata-rata.....	277
Gambar 13.1 Mesin dan komponen-komponennya .....	290
Gambar 13.2 Blok silinder model in line .....	290
Gambar 13.3 Blok silinder model V-8.....	291
Gambar 13.4 Model susunan blok silinder .....	291
Gambar 13.5 Bentuk susunan silinder .....	293
Gambar 13.6 Bak engkol.....	294
Gambar 13.7 Kepala silinder.....	295
Gambar 13.8 Model ruang bakar .....	296

Gambar 13.9 Kontruksi torak.....	297
Gambar 13.10 Model torak atau piston .....	298
Gambar 13.11 Ring piston.....	299
Gambar 13.12 Kontruksi dari batang penghubung.....	300
Gambar 13.13 Poros engkol.....	301
Gambar 13.14 Bantalan.....	302
Gambar 14.1 Pelumasan pada bantalan .....	305
Gambar 14.2 Proses pelumasan percikan .....	308
Gambar 14.3 Proses pelumasan paksa dan campur .....	309
Gambar 14.4 Komponen pelumasan dan sirkulasi pelumas .....	310
Gambar 14.5 Komponen-komponen pelumasan pada mesin disel	310
Gambar 14.6 Pompa minyak pelumas jenis roda gigi .....	311
Gambar 14.7 Pompa roda gigi jenis rotor.....	312
Gambar 14.8 Pengatur tekanan minyak.....	312
Gambar 14.9 Peredaran minyak pelumas dan penyaring minyak..	313
Gambar 14.10 Sirkulasi pelumas pada mesin multsilinder.....	314
Gambar 14.11 Proses pendinginan pada mesin .....	315
Gambar 14.12 Sirkulasi pendingin air pada kondisi mesin dingin dan mesin panas .....	316
Gambar 14.13. Model sirkulasi air pendingin .....	317
Gambar 14.14 Radiator .....	318
Gambar 14.15 Termostat.....	320
Gambar 14.16 Pendingin udara.....	321
Gambar 14.17 Pendingin udara paksa .....	321
Gambar 15.1 Mesin uap Hero	322
Gambar 15.2 Azas impuls pada plat datar dan sudu.....	324
Gambar 15.3 Sudu sudu impuls pada rotor turbin uap.....	325
Gambar 15.4 Mesin uap Branca dengan turbin impuls .....	326
Gambar 15.5 Mesin uap Newton gaya aksi reaksi .....	326

Gambar 15.6 Gaya aksi reaksi pada balon .....	327
Gambar 15.7 Segitiga kecepatan pada sudu turbin impuls.....	327
Gambar 15.8 Proses ekspansi pada nosel .....	328
Gambar 15.9 Fungsi nosel .....	329
Gambar 15.10 Segitiga kecepatan sudu bergerak turbin reaksi .....	330
Gambar 15.11 Bentuk sudu tetap turbin impuls .....	331
Gambar 15.12 Turbin uap impuls satu tahap .....	331
Gambar 15.13 Susunan turbin uap Curtiss .....	333
Gambar 15.14 Segitiga kecepatan turbin uap Curtiss.....	334
Gambar 15.15 Segitiga kecepatan turbin uap Rateau .....	335
Gambar 15.16 Susunan turbin uap Rateau.....	336
Gambar 15.17 Susunan turbin uap Rateau.....	337
Gambar 15.18 Susunan turbin uap Rateau.....	338
Gambar 16.1 Mesin pembakaran dalam ( turbin gas dan motor bakar) .....	340
Gambar 16.2 Perbandingan turbin gas dan mesin disel .....	341
Gambar 16.3 Pesawat terbang pendahulu dengan turbin gas.....	343
Gambar 16.4 Perkembangan turbin gas menjadi mesin modern....	343
Gambar 16.5 Turbin gas pesawat terbang .....	344
Gambar 16.6 Turbin gas untuk industri ( pembangkit listrik).....	345
Gambar 16.7 Ruang bakar dan proses pembakaran turbin gas .....	347
Gambar 17.1 Diagram $p-v$ dan $T-s$ .....	351
Gambar 17.2 Bagan kerja turbin gas sistem terbuka langsung .....	352
Gambar 17.3 Bagan kerja turbin gas sistem terbuka tak langsung.....	355
Gambar 17.4 Bagan kerja turbin gas sistem terbuka tak langsung.....	355
Gambar 17.5 Bagan kerja turbin gas sistem tertutup langsung .....	337

Gambar 17.6 Bagan kerja turbin gas sistem tertutup tak langsung .....	338
Gambar 17.7 Turbin gas industri dengan dua poros dan dua turbin.....	339
Gambar 17.10 Bagan kerja turbin gas sistem terbuka tak langsung .....	
dengan pemasangan pemanas awal atau <i>REGENERATOR</i> .....	346
Gambar 17.11 Diagram <i>t-s</i> turbin gas dengan regenerator.....	346
Gambar 17.12 Diagram <i>t-s</i> turbin gas sistem tertutup dengan regenerator.....	347
Gambar 17.13 Diagram <i>t-s</i> turbin gas sistem terbuka dengan regenerator.....	348
Gambar 17.14 Diagram <i>p-v</i> kompresor bertingkat dengan <i>intercooler</i> .....	350
Gambar 17.15 Bagan dan diagram <i>p-v</i> turbin gas dengan <i>intercooler</i> , <i>regenerator</i> dan <i>reheater</i> .....	351
Gambar 20.1 Turbin gas dan komponen-komponennya .....	352
Gambar 20.2 Turbin gas dan komponen-komponennya .....	353
Gambar 20.3 Turbin gas mini dan komponen-komponennya.....	354
Gambar 20.4 Pusat pembangkit tenaga gabungan .....	355
Gambar 20.5 Rotor Turbi gas .....	356
Gambar 20.6 Ruang bakar turbin gas .....	357
Gambar 20.7 Ruang bakar turbin gas .....	357
Gambar 20.8 Ruang bakar turbin gas pesawat terbang.....	358
Gambar 20.9 Ruang bakar turbin gas pindustri.....	359
Gambar 20.10 Kompresor tubin axial .....	360
Gambar 20.11 Kompresor radial dengan diffuser.....	360
Gambar 20.12 Bentuk dari sudu jalan turbin .....	360
Gambar 20.13 Turbin gas skala industri .....	363

Gambar 21.1 Instalasi sistem pembangkit uap .....	365
Gambar 21.2 Bagan siklus Rankin	
Gambar 21.3 Bagan siklus Rankin.....	366
Gambar 21.4 Diagram siklus aktual Rankine .....	367
Gambar 21.5 Proses ireversibeliti pada pompa dan turbin .....	368
Gambar 21.6 a. sirkulasi alamiah.....	369
Gambar 21.6 b. sirkulasi paksa	369
Gambar 21.7 Boiler pipa api ( <i>fire tube boiler</i> ) .....	370
Gambar 21.8 Boiler pipa api ( <i>fire tube boiler</i> ) 2 pass.....	371
Gambar 21.9 Boiler pipa api ( <i>fire tube boiler</i> ) 2 pass.....	371
Gambar 21.10 Boiler pipa air model horizontal .....	372
Gambar 21.11 Boiler pipa air model vertikal .....	372
Gambar 21.12 Bentuk sudu-sudu turbin uap .....	373
Gambar 21.13 Model susunan sudu sudu pada TU.....	373
Gambar 21.14 Turbin uap dan profil sudu sudu dengan segitiga kecepatan.....	374
Gambar 21.16 Kondensor dengan pendingin udara .....	376
Gambar 21.17 Kondensor dengan pendingin air .....	376
Gambar 21.22. Vaporising burner .....	380
Gambar 21.23. Pressure jet burner.....	381
Gambar 21.24 Twin fluid atomizer burner. ....	381
Gambar 21.26 <i>Aerated burner</i> . ....	382
Gambar 21.25 Non aerated burner	382
Gambar 21.27 <i>Pulvizer fuel burner</i> .....	384
Gambar 21.28. <i>Underfeed stoker</i> .....	384
Gambar 21.29 <i>Fixed grate burner</i> .....	385
Gambar 21.31. <i>Fluidized bed stoker</i> .....	386
Gambar 22.1 Waduk sebagai sumber energi potensial air .....	387
Gambar 22.2 Instalasi Turbin air pada aliran sungai.....	388

Gambar 22.3 Instalasi pembangkit listrik tenaga air ( <i>Micro Hydro</i> )	388
Gambar 22.4 Roda air kuno .....	390
Gambar 22.5 Turbin Fourneyron .....	390
Gambar 22.6 Turbin Fourneyron .....	391
Gambar 22.7 Tipe turbin air yang paling populer .....	392
Gambar 22.8 Tingkat head sumber air .....	393
Gambar 22.10 Perubahan energi pada instalasi turbin air .....	396
Gambar 22.12 Prinsip impuls dan reaksi pada roda jalan pelton dan francis .....	399
Gambar 22.11 Prinsip impuls dan reaksi .....	398
Gambar 22.13 instalasi PLTA dengan turbin air jenis pelton 6 nosel .....	402
Gambar 23.1 Kincir air .....	405
Gambar 23.2 Turbin inpuls dan proses penyemprotan .....	406
Gambar 23.3 Roda jalan turbin pelton .....	407
Gambar 23.4 Instalasi Turbin Pelton poros horizontal .....	407
Gambar 23.5 Instalasi turbin pelton poros vertikal .....	409
Gambar 23.6 Pengaturan nosel pada turbin pelton .....	409
Gambar 23.7 Konstruksi dari turbin impuls ossberger .....	410
Gambar 23.9 Aliran air masuk turbin Francis .....	412
Gambar 23.10 Instalasi turbin francis .....	412
Gambar 23.11 Turbin kaplan dengan sudu jalan yang dapat diatur	413
Gambar 23.12 Instalasi pembangkit dengan turbin kaplan .....	414
Gambar 24.1 Refrigerator .....	418
Gambar 24.2 Instalasi penyegar udara rumah .....	422
Gambar 24.3 Beban pendinginan .....	425
Gambar 24.4 Beban pemanasan .....	426
Gambar 25.1 Prinsip dasar dari mesin pendingin dan pemanas ....	429
Gambar 25.2 Daur refrigersi carnot .....	430

Gambar 25.3 Diagram t-s daur refrigerasi carnot	
Gambar 25.5 Diagram t-s siklus kompresi uap .....	433
Gambar 25.6 Diagram p-h daur kompresi uap.....	433
Gambar 25.7 Daur kompresi uap aktual .....	434
Gambar 25. 4 Daur refrigerasi kompresi uap .....	432
Gambar 25.8 Bagan mesin <i>Air Conditioner</i> .....	436
Gambar 25.9 Aliran refrigeran didalam saluran pipa.....	437
Gambar 25.10 Mesin pendingin sekaligus pemanas .....	441
Gambar 25.11 Skema refrigerasi absorpsi.....	442

ISBN 978-979-060-085-0  
ISBN 978-979-060-088-1

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk digunakan dalam Proses Pembelajaran.

HET (Harga Eceran Tertinggi) Rp. 15.290,00