

Pembangkit Listrik Tenaga Thermal

PLTG, PLTGU, PLTU, dan PLTP

Ir. Habib Rochani MMT

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA THERMAL (PLTU, PLTP, PLTG & PLTGU)

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA THERMAL (PLTU, PLTP, PLTG & PLTGU)

Penyusun :
Ir. Habib Rochani MMT

Penerbit :



2026

**PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA THERMAL
(PLTU, PLTP, PLTG & PLTGU)**

Oleh : **Ir. Habib Rochani MMT**
Penerbit : INSTITUT TEKNOLOGI PLN
Alamat : Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat,
Duri Kosambi, Cengkareng
Jakarta Barat, 11750
Telp/Fax : (021) 544 0342, 544 0344
Email : -

Hak Cipta@2026 pada Penerbit

Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang Pasal 72 ayat 1,2 dan 3 Undang-undang Republik Indonesia No. 19 Tahun 2002. Dilarang memperbanyak, sebagian atau seluruh isi buku dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari
Penerbit : INSTITUT TEKNOLOGI PLN

Cetakan Pertama, Januari 2026

Editor : Salsabila Tsamrotul Qolbi, S.T
Design & Layout : Ridho Chaerullah

ISBN : -

Nomor Anggota IKAPI :
No.574/Anggota Luar Biasa /DKI/2019

PRAKATA

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah Yang Maha Kuasa, berkat bimbingan dan ridlonya akhirnya saya bisa menyelesaikan penulisan buku ini. Buku ini saya tulis dengan maksud untuk memenuhi kebutuhan bahan pengajaran pada Sekolah Tinggi Teknologi PLN sebagaimana ditentukan didalam buku panduan pengajaran bidang studi pengetahuan Pembangkit Thermal I, yang meliputi Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) pada program studi D III.

Mengingat buku ini diperuntukkan hanya untuk program studi 2 (dua) SKS, maka pembahasannya tidaklah begitu mendalam, dan sekedar memberi gambaran kepada mahasiswa untuk mengenal secara garis besar dari pembangkit pembangkit tersebut. Untuk lebih mengenal secara lebih detail disarankan agar para pembaca / mahasiswa membaca pula buku buku terkait dari masing masing jenis pembangkit maupun peralatan terkait seperti buku: turbin uap, penukar kalor, pompa dlsb.

Akhirnya kami mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya buku ini, terutam kepada Civitas Akademika STT PLN yng telah banyak mendorong kami meneyelesaikan buku ini.

Semoga bermanfaat.

Jakarta 26 Februari 2013.

Habib Rochani



DAFTAR ISI

PRAKATA.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xviii
BAB I PENGUSAHAAN ENERGI LISTRIK	20
BAB II AIR & UAP.....	24
2.1 SIFAT SIFAT AIR DAN UAP.....	24
2.2 TABEL UAP.....	25
2.3 DIAGRAM ENTALPI – ENTROPI.....	27
2.4 SOAL –SOAL.....	29
BAB III PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP	31
3.1 UMUM.....	31
3.2 BAGIAN BAGIAN UTAMA.....	32
3.3 SIKLUS RANKINE.....	33
3.4 BOILER	36
3.4.1 Klasifikasi Boiler	36
3.4.2 Effisiensi & Kerugian didalam Boiler	44
3.4.3 Kelengkapan Boiler	47
3.4.4 Air pengisi Boiler.....	52
3.5 T U R B I N.....	53
3.5.1 Klasifikasi Turbin	55
3.5.2 Daya Turbin	57
3.5.3 Konsumsi Kalor Turbin (Turbine Heat Rate).	61
3.5.4 Kelengkapan Turbin.....	62
3.6 KONDENSOR.....	67
3.6.1 Klasifikasi Kondensor.....	67
3.6.2 Kelengkapan Kondensor.....	68
3.6.3 Jalannya proses perpindahan panas.	74
3.7 PEMANAS AIR PENGISI BOILER.....	77

BAB IV PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI.....	86
4.1 UMUM.....	86
4.2 KLASIFIKASI PLTP	88
4.3 SIKLUS RANKINE PLTP.	91
4.4 ENERGI YANG DIBANGKITKAN	92
4.5 BAGIAN BAGIAN UTAMA.....	94
4.5.1 Sumur produksi.....	94
4.5.2 Kepala sumur	95
4.5.3 Pipa penyalur	96
4.5.4 Pemisah Uap (steam separator).....	97
4.5.5 Turbin Uap.....	97
4.5.6 Condenser	99
4.5.7 Cooling tower.....	101
4.5.8 Sumur Injeksi (<i>Injection Wells</i>)	102
BAB V PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS	105
5.1. UMUM.....	105
5.2. PRINSIP KERJA TURBIN GAS	107
5.3. EFFISIENSI TURBIN GAS	108
5.4. SIKLUS BRAYTON YANG DIMODIFIKASI.....	117
5.5. KLASIFIKASI TURBIN GAS.	121
5.6. BAGIAN UTAMA TURBIN GAS.	122
5.6.1. Kompresor	122
5.6.2. COMBUSTION CHAMBER.....	134
5.6.3. TURBIN.....	142
5.7 ALAT ALAT BANTU PLTG	146
5.7.1 SISTEM PEMUTAR POROS	146
5.7.2 SISTEM PELUMAS.....	148
5.7.3 SISTEM HIDROLIK.....	150
5.7.4 SISTEM UDARA PENDINGIN DAN PERAPAT (Gambar 5. 31) ...	151
5.7.5 SISTEM BAHAN BAKAR	152
5.7.6 SISTEM UDARA PENGABUT.....	154
5.7.7 SISTEM AIR PENDINGIN.....	155

5.7.8 SISTEM KONTROL	156
5.7.9 SISTEM PENGAMAN (PROTEKSI).....	158
5.7.10 KELENGKAPAN LAINYA	159
5.8 PENGOPERSIAN PLTG.....	161
5.8.1 PERSIAPAN SEBELUM START	161
5.8.2 START PLTG.....	161
5.8.3 MEMPARALLEL PLTG.....	163
5.9 FAKTOR FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PERFORMANCE PLTG	167
5.9.1 Faktor suhu udara:.....	168
5.9.2 Faktor ketinggian tempat.	168
5.9.3 Faktor kelembaban udara.	170
5.9.4 Faktor injeksi air kedalam ruang bakar.....	172
5.9.5 Faktor hambatan pada saluran gas keluar turbin.....	174
5.9.6 Faktor kekotoran kompressor.	174
5.10 PEMELIHARAAN TURBIN GAS.....	177
5.10.1 Pemeliharaan waktu operasi.	178
5.10.2 Pemeliharaan PLTG waktu standby.....	180
5.10.3 Combustion Inspection	181
5.10.4 Hot Gas Path inspection.....	182
5.10.5 MAJOR INSPECTION.....	183
5.10.6 FAKTOR FAKTOR YANG MEMPENGARUHI MASA PEMELIHARAAN	184
BAB VI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS DAN UAP	187
6.1 UMUM.....	187
6.2 KLASSIFIKASI PLTGU.....	188
6.3 KEUNTUNGAN DAN KERUGIAN	191
6.3 SIKLUS KOMBINASI.....	192
6.4 BAGIAN BAGIAN UTAMA PLTGU	194
PROFIL PENULIS	203



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perubahan keadaan dari air menjadi uap didalam pv dan diagram TS	24
Gambar 2. 2 Contoh table uap jenuh dengan merujuk pada tingginya suhu	26
Gambar 2. 3 Contoh table air dan uap panas lanjut	27
Gambar 2. 4 Diagram $h - s$ (enthalpy – entropy) untuk air dan uap.....	28
Gambar 2. 5 Diagram Mollier.....	28
Gambar 3. 1 Siklus Rankine (PLTU sederhana) 33	
Gambar 3. 2 diagram tekanan – volume (p-v), diagram suhu – entropi (T – S) dan diagram entalpi – entropi ($h - s$)	35
Gambar 3. 3 Siklus Rankine digambarkan dalam diagram p-v	35
Gambar 3. 4 Diagram T- S dan diagram h - S siklus Rankine Reheat	36
Gambar 3. 5 Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan siklus Reheat	38
<i>Gambar 3. 6 Boiler water wall dengan bahan bakar batubara serbuk.....</i>	<i>39</i>
Gambar 3. 7 Boiler water wall dengan pembakaran fluidized bed	40
Gambar 3. 8 Boiler water wall dengan bahan bakar minyak dan gas	41
Gambar 3. 9 Sirkulasi air boiler	42
Gambar 3. 10 Boiler Once Through	43
Gambar 3. 11 Sistem air pengisi boiler dan sistem air pancar pengendali suhu uap	49
Gambar 3. 12 Sistem aliran batubara dan sistem udara / gas hasil pembakaran	50
Gambar 3. 13 Instalasi pemurnian air (demineralizing plant)	53
Gambar 3. 14 Cara kerja Turbin Uap.....	54
Gambar 3. 15 Bentuk sudu turbin impuls dan turbin reaksi	55
Gambar 3. 16 Turbin PLTU dengan silinder tunggal, terdiri dari dua tingkat impuls dan 21 tingkat reaksi dengan 88 bar suhu 5100C	57
Gambar 3. 17 Turbin dengan tiga silinder / casing: silinder tekanan tinggi, silinder tekanan menengah dan silinder tekanan rendah.....	57
Gambar 3. 18 Proses ekspansi uap didalam turbin dan kerugian didalam turbin	59
Gambar 3. 19 Neraca kalor turbin.....	62
Gambar 3. 20 Sistem Governor Turbin	63
Gambar 3. 21 Sistem Governor Turbin	63
Gambar 3. 22 Sistem governor hidrolik.....	64
Gambar 3. 23 Sistem governor Electro Hidrolik	65
Gambar 3. 24 Susunan turbin tekanan rendah dan kondensor.....	70
Gambar 3. 25 Sistem air pendingin kondensor	71
Gambar 3. 26 Sistem pembersih pipa kondensor.....	72
Gambar 3. 27 Ejector	73
Gambar 3. 28 Pemanas Air Pengisi Tekanan Tinggi.....	78
Gambar 3. 29 Diagram suhu – panjang laluan Pemanas Air Pengisi Boiler	79
Gambar 3. 30 Deareatot type tray	80

Gambar 3. 31 Pengaruh perubahan posisi katup uap masuk turbin	81
Gambar 3. 32 Sistem control PLTU “Boiler Follow”	83
Gambar 3. 33 Pengaruh perubahan sinyal aliran bahan bakar terhadap perubahan daya turbin uap masuk turbin.....	83
Gambar 3. 34 Sistem control PLTU “turbine follow”	84
Gambar 4. 1 Susunan lapisan lapisan bumi , kedalaman dan suhu yang terkait dengan kedalaman 87	
Gambar 4. 2 Sebuah instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi	88
Gambar 4. 3 PLTP uap kering	90
Gambar 4. 4 PLTP flash.....	90
Gambar 4. 5 PLTP binary	91
Gambar 4. 6 Siklus air - uap (Rankine) PLTP	91
Gambar 4. 7 Tabel uap jenuh untuk tekanan 9 bar absolut dan tekanan 0,1 bar absolut	93
Gambar 4. 8 Proses ekspansi uap didalam turbin dari tekanan 9 bar absolute menjadi 0,1 bar absolute	94
Gambar 4. 9 Konstruksi dari sumur produksi	95
Gambar 4. 10 Wellhead	96
Gambar 4. 11 Separator jenis cyclone dengan pembalik arah	97
Gambar 4. 12 Rotor turbin PLTP kapasitas 55000 kW	99
Gambar 4. 13 Kondenser kontak	100
Gambar 4. 14 Cooling tower dengan tarikan udara paksa (induced draft)	102
Gambar 5. 1 Susunan peralatan sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Gas 107	
Gambar 5. 2 Proses keliling (siklus) turbin gas digambarkan dalam diagram p-v dan T-s	109
Gambar 5. 3 Diagram Temperature -Entropy untuk turbin gas ideal dan actual..	113
Gambar 5. 4 Turbin gas dengan siklus regenerasi	118
Gambar 5. 5 Turbin gas dengan siklus intercooling	119
Gambar 5. 6 Siklus Reheat.....	119
Gambar 5. 7 Turbin gas dengan precooling.....	120
Gambar 5. 8 Siklus gabungan dari beberapa modifikasi siklus Brayton.	121
Gambar 5. 9 Gas-turbine engine: (1) centrifugal compressor, (2) combustion chamber, (3) fuel injector, (4) nozzle, (5) turbine rotor, (6) exhaust pipe	123
Gambar 5. 10 Turbin gas dengan kompresor aksial dengan bagian bagian yang terkait	124
Gambar 5. 11 Segi tiga kecepatan udara masuk dan keluar sudu jalan kompresor aksial	125
Gambar 5. 12 Diagram hS proses peningkatan tekanan dari tekanan awal p_1 ketekanan p_2	126
Gambar 5. 13 Segitiga kecepatan sisi masuk dan keluar sudu jalan yang digabung	128
Gambar 5. 14 Bagian bagian kompresor sentrifugal:	128
Gambar 5. 15 Bentuk sudu impeller dan karakteristiknya.....	129
Gambar 5. 16 Karakteristik kompresor:	130

Gambar 5. 17 Karakteristik compressor axial dengan berbagai putaran konstan.	131
Gambar 5. 18 Proses penularan stall dari satu sudu kesudu lainnya	133
Gambar 5. 19 Rotor compressor axial	134
Gambar 5. 20 Cara kerja compressor axial	134
Gambar 5. 21 Konstruksi ruang bakar “can type” dan aliran udara didalam masing-masing	138
Gambar 5. 22 Nozzle bahan bakar dengan pengabutan udara	139
Gambar 5. 23 Nozle bahan bakar cair dengan pengabutan udara	140
Gambar 5. 24 Campuran bahan bakar dan udara untuk pembakaran.	141
Gambar 5. 25 Rotor turbin gas.....	143
Gambar 5. 26 Konstruksi sebuah sudu tetap (nozzle) tingkat I turbin gas dan aliran udara pendingin.....	144
Gambar 5. 27 Konstruksi sudu jalan (bucket) tingkat I turbin gas dan aliran udara pendinginnya.....	145
Gambar 5. 28 Rotor turbin gas (rotor kompressor dan rotor turbin tersambung).	145
Gambar 5. 29 Sistem pemutar poros.....	147
Gambar 5. 30 Sistem pelumas	149
Gambar 5. 31 Sistem hidrolik	151
Gambar 5. 32 Sistem Udara Pendingin dan perapat	152
Gambar 5. 33 Sistem bahan bakar cair	154
Gambar 5. 34 Sistem udara pengabut (atomizing air)	155
Gambar 5. 35 Sistem air pendingin.....	156
Gambar 5. 36 Sistem control aliran bahan bakar	157
Gambar 5. 37 Sistem kontrol dan proteksi.....	159
Gambar 5. 38 Susunan PLTG Westinghouse W 251	160
Gambar 5. 39 typical Curva start up PLTG	162
Gambar 5. 40 Rangkaian listrik dari lampu sinchrone	164
Gambar 5. 41 Peralatan Sinchron	165
Gambar 5. 42 Faktor koreksi suhu udara atmosfer.....	168
Gambar 5. 43 Faktor koreksi ketinggian tempat.....	169
Gambar 5. 44 Faktor konversi tekanan barometer terhadap altitude	170
Gambar 5. 45 Faktor koreksi kelembaban udara	171
Gambar 5. 46 Pendinginan aliran udara masuk kompressor dengan chilling dan evaporative (injeksi kabut air).	172
Gambar 5. 47 Faktor koreksi terhadap injeksi air kedalam ruang bakar	173
Gambar 5. 48 Faktor koreksi terhadap kerugian didalam	174
Gambar 5. 49 Koreksi terhadap kerugian didalam saluran.....	175
Gambar 5. 50 Penurunan daya mampu dan efisiensi akibat bertambah kotornya compressor	176
Gambar 5. 51 Fakator penurunan daya mampu dan Heat Rate	177
Gambar 5. 52 Jenis jenis overhaul	178
Gambar 5. 53 Posisi lubang pemeriksaan boroscope.....	181
Gambar 5. 54 Proses oxidasi sudu turbin tingkat 1 GE	183
Gambar 6. 1 Susunan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap tekanan tunggal	188

Gambar 6. 2 Susunan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap tekanan	189
Gambar 6. 3 Susunan PLTGU poros tunggal	190
Gambar 6. 4 Susunan PLTGU 2.2.1	191
Gambar 6. 5 Siklus Rankine	193
Gambar 6. 6 Siklus gabungan:	193
Gambar 6. 7 HRSG horizontal dengan bagian bagiannya (CB Energy).....	197
Gambar 6. 8 Permukaan pipa HRSG sisi gas panas	198
Gambar 6. 9 Susunan pipa pipa HRSG dengan a) aliran gas horizontal dan b) aliran gas vertical (www. Science direct. com. 05June 2013).....	199
Gambar 6. 10 Susunan pipa pipa HRSG aliran gas horizontal tingkat tekanan ganda (en.citizendium.org. 05 June 2013).....	199
Gambar 6. 11 Diverter Damper	202



DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Berbagai proses perubahan energi primer kedalam energi listrik.....	20
Tabel 3. 1 Rumusan hidrokarbon dan besarnya nilai Z	45
Tabel 5. 1 Soal Perhitungan efisiensi turbin gas	112
Tabel 5. 2 Besaran dari masing2 titik posisi dalam turbin gas sesuai contoh soal	116
Tabel 5. 3 Penentuan viskositas minyak pelumas untuk bearing journal	149
Tabel 5. 4 Faktor yang mempengaruhi umur peralatan / interval pemeliharaan ..	185
Tabel 6. 1 Perbedaan PLTU subkritis dengan bagian PLTU pada PLTGU	196



BAB I

PENGUSAHAAN ENERGI LISTRIK

Energi listrik sebagaimana dapat dinikmati dirumah tangga, di kantor dan industri-industri berasal dari berbagai bentuk energi primer yang terdapat didalam alam, sebagaimana dapat dilihat di dalam tabel 1.1. Didalam tabel tersebut dapat dilihat bahwa energi listrik dapat diusahakan dari berbagai macam bentuk energi primer, namun sampai saat ini pengusahaan energi listrik dengan skala besar hanya dapat dilakukan melalui generator listrik yang digerakkan oleh mesin penggerak.

Tabel 1. 1 Berbagai proses perubahan energi primer kedalam energi listrik

ENERGI PRIMER	Energi Inti	Energi Kimia	Energi Panas	Energi Mekanik	Energi Listrik
Beda potensial diantara unsur-unsur kimia	----->	Elemen galvanis	----->	----->	Kutub-kutub elemen galvanis
Panas bumi	----->	----->	----->	Turbin uap	Generator
Bahan bakar fosil	----->	Pembakaran	Ketel Uap	Turbin Uap	Generator
	----->	----->	----->	Turbin Gas	Generator
	----->	----->	----->	Motor Diesel	Generator
Air terjun	----->	----->	----->	Turbin air	Generator
Bahan bakar nuklir	Reaktor nuklir	----->	Penukar kalor	Turbin uap	Generator
Angin	----->	----->	----->	Turbin Angin	Generator
Sinar matahari	----->	----->	Ketel matahari	Turbin uap	Generator
	----->	----->	----->	----->	Sel matahari

Mesin penggerak (engine) adalah adalah mesin yang dapat merubah energi primer menjadi kerja mekanik. Mesin penggerak terbagi menjadi dua golongan utama yaitu mesin penggerak dengan pembakaran (combustion engine) dan mesin

penggerak dengan tanpa pembakaran (non combustion engine). Mesin penggerak dengan pembakaran dibagi menjadi dua kelompok yaitu mesin penggerak dengan pembakaran didalam (internal combustion engine) dan mesin penggerak dengan pembakaran diluar (external combustion engine). Mesin penggerak dengan tanpa pembakaran diperoleh dari gerakan gerakan didalam alam seperti angin, air tejun dan gelombang laut. Dengan gerakan gerakan alam tersebut kemudian dirubah menjadi gerak putar guna memutar generator listrik dan menghasilkan listrik.

Mesin penggerak yang menggunakan suhu tinggi digolongkan sebagai mesin thermal (mesin panas), karena itu mesin penggerak dengan pembakaran, baik pembakaran didalam (internal) maupun pembakaran diluar (external) juga disebut sebagai mesin thermal. Yang termasuk kedalam mesin dengan pembakaran didalam adalah mesin Diesel, mesin Otto, mesin Wankle dan mesin turbin gas, sedang yang termasuk kedalam mesin dengan pembakaran diluar adalah, mesin uap, turbin uap dan mesin Sterling.

Energi thermal adalah energi panas yang dapat diperoleh dari pembakaran bahan bakar, reaksi berantai didalam reactor nuklir, sinar matahari atau langsung dari dalam tanah berupa uap panas. Pengusahaan energi listrik dari energi thermal dilakukan dengan suatu proses tertentu didalam berbagai jenis pembangkit tenaga listrik seperti berikut:

PLTD	: Pembangkit Listrik Tenaga Diesel
PLTG	: Pembangkit Listrik Tenaga Gas
PLTU	: Pembangkit Listrik Tenaga Uap.
PLTGU	: Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap.
PLTN	: Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
PLTP	: Pembangkit Listrik Tenaga Panas bumi.

Pada PLTD proses perubahan energi thermal menjadi energi mekanik (yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator listrik) berlangsung dengan menggunakan mesin diesel, sedang pada PLTG menggunakan turbin gas.

Pada PLTU, PLTN dan PLTP proses perubahan energi thermal menjadi energi mekanik berlangsung dengan menggunakan turbin uap. Energi mekanik yang

diperoleh kemudian digunakan untuk menggerakkan generator listriknya. Uap sebagai penggerak turbin diperoleh dari:

- Pemanasan air didalam boiler oleh pembakaran bahan bakar pada jenis pembangkit PLTU.
- Pemanasan air tidak langsung didalam reaktor nuklir oleh reaksi berantai dari bahan bakar inti pada jenis pembangkit PLTN.
- Pemanasan air didalam perut bumi oleh panasnya magma pada jenis pembangkit PLTP.

Ketiga jenis pembangkit tersebut, mempunyai media dan prinsip kerja yang sama, dan terutama PLTU dan PLTN dapat dijumpai dalam skala yang besar (sampai 1.300 MW untuk satu unitnya). Ketiganya mempunyai teknologi yang kompleks. Berbagai masalah akan ditemui di dalam pembangkit ini misalnya korosi, erosi, stress, vibrasi dan lain lain.

Pada PLTGU proses perubahan energi thermal menjadi kerja mekanik terjadi baik didalam turbin gas maupun turbin uap. Disini terjadi bahwa gas panas hasil pembakaran didalam ruang bakar digunakan untuk menggerakkan turbin dari turbin gas, diteruskan untuk memanaskan air didalam boiler guna menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin uap.

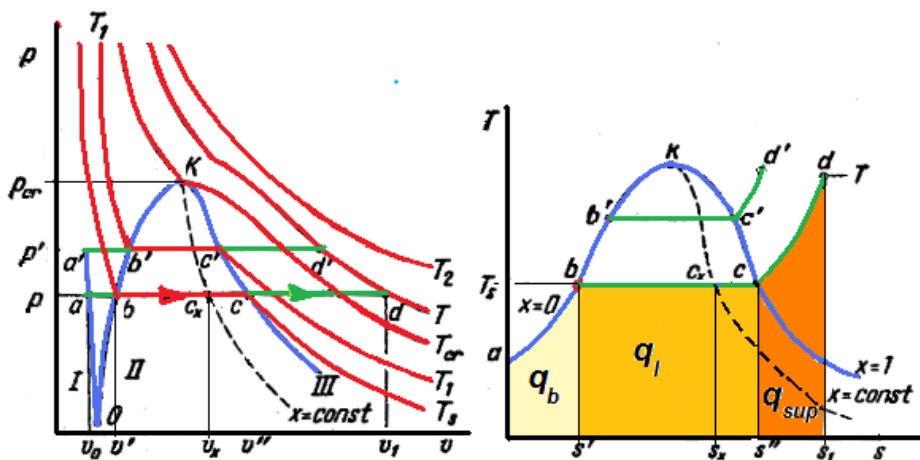


BAB II AIR & UAP

2.1 SIFAT SIFAT AIR DAN UAP

Apabila air dipanaskan pada tekanan konstan maka pertama tama air akan memuai menuju titik perpindahan fasa (titik didih), suhunya bertambah tinggi dan volumenya bertambah besar, ditunjukkan dengan garis a – b pada Gambar 2.1

Pemanasan selanjutnya menjadikan air berpindah fasa dari fasa cair menjadi fasa gas (uap). Pada kondisi ini volumenya bertambah besar, namun suhunya tetap konstan sampai seluruh bagian air menjadi uap. Kondisi ini (b – c) dikenal sebagi kondisi jenuh atau saturated. Pada titik b dimana seluruh bagian masih berupa air disebut sebagai air jenuh, dan pada titik c dimana seluruh bagian telah menjadi uap disebut sebagai uap jenuh. Daerah diantara titik b dan c adalah daerah dimana terdapat bagian air dan bagian uap bersama sama, dikenal dengan sebutan uap basah yaitu uap yang mengandung butir butir air. Besarnya bagian uap didalam uap basah disebut dengan derajat kekeringan uap x yang besarnya antara 0,00 s/d 1,00. Pemanasan selanjutnya menjadikan uap suhunya bertambah tinggi dan volumenya bertambah besar (c – d). Kondisi uap dengan suhu diatas suhu jenuh disebut sebagai uap panas lanjut (superheated steam).



Gambar 2. 1 Perubahan keadaan dari air menjadi uap didalam pv dan diagram TS

Jika tekanan dinaikkan maka proses pemanasan air untuk mencapai titik perpindahan phase menjadi lebih panjang (a- b'), sementara proses perpindahan phasanya menjadi lebih pendek (b' – c'), proses pemanasan lanjut untuk mencapai suhu yang sama juga menjadi lebih pendek. Secara keseluruhan besarnya panas (heat/kalor) yang diperlukan untuk merubah air menjadi uap dengan suhu yang sama menjadi lebih sedikit. Jika tekanan terus dinaikkan maka akan dicapai dimana proses perpindahan phasa menjadi tidak tampak lagi. Titik dimana proses perpindahan phasa menjadi tidak tampak lagi tersebut disebut sebagai **titik kritis**. Titik kritis terletak pada tekanan 225,65 kg /cm² dan suhu 374,15°C. Selanjutnya tekanan diatas tekanan kritis disebut sebagai tekanan superkritis. Demikian pula peralatan pembangkit uap (boiler) nya disebut juga sebagai pembangkit uap/boiler superkritis.

2.2 TABEL UAP

Untuk mengetahui besarnya entalpi, entropi dan volume spesifik air dan uap, jika suhu dan tekanannya sudah diketahui dapat digunakan tabel uap. Dengan tabel uap pula dapat diketahui besarnya panas penguapan atau panas pengembunan (latent heat).

Ada tiga jenis tabel uap yaitu:

1. Tabel uap jenuh (saturated steam) yang merujuk kepada besarnya tekanan. Dengan tabel ini untuk tekanan jenuh tertentu (p_s) dapat diketahui besarnya tekanan jenuh (p_s) entalpi air jenuh (h_f) entropi air jenuh (s_f) volume spesifik (v_f) air jenuh, panas latent (panas pembentukan uap h_{fg}), entalpi uap jenuh (h_g), entropi uap jenuh (s_g), dan volume spesifik uap jenuh (v_g).
2. Tabel uap jenuh yang merujuk kepada tingginya suhu. Dengan tabel ini untuk suhu jenuh tertentu (t_s) dapat diketahui besarnya tekanan jenuh (p_s) entalpi air jenuh (h_f) entropi air jenuh (s_f) volume spesifik (v_f) air jenuh, panas latent (panas pembentukan uap h_{fg}), entalpi uap jenuh (h_g),

entropi uap jenuh (s_g), dan volume spesifik uap jenuh (v_g) (lihat Gambar 2.2)

Temp. °C	Abs. Press. bar	Specific Enthalpy kJ/kg			Specific Entropy kJ/kg °C			Specific Volume dm ³ /kg		
		h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g	v_f	v_{fg}	v_g
90.0	0.7011	376.9	2283.2	2660.1	1.1925	6.2873	7.4799	1.0361	2360.3	2361.3
90.5	0.7145	379.0	2281.9	2660.9	1.1983	6.2751	7.4734	1.0365	2318.7	2319.8
91.0	0.7281	381.1	2280.6	2661.7	1.2041	6.2629	7.4670	1.0369	2278.0	2279.1
91.5	0.7420	383.3	2279.3	2662.6	1.2099	6.2508	7.4607	1.0372	2238.2	2239.2
92.0	0.7561	385.4	2278.0	2663.4	1.2156	6.2387	7.4543	1.0376	2199.2	2200.2
92.5	0.7704	387.5	2276.7	2664.2	1.2214	6.2266	7.4480	1.0380	2160.9	2162.0
93.0	0.7849	389.6	2275.4	2665.0	1.2271	6.2145	7.4416	1.0383	2123.5	2124.5
93.5	0.7996	391.7	2274.1	2665.8	1.2329	6.2025	7.4353	1.0387	2086.8	2087.9
94.0	0.8146	393.8	2272.8	2666.6	1.2386	6.1905	7.4291	1.0391	2050.9	2051.9
94.5	0.8298	395.9	2271.5	2667.3	1.2443	6.1785	7.4228	1.0395	2015.7	2016.7
95.0	0.8453	398.0	2270.2	2668.1	1.2501	6.1665	7.4166	1.0398	1981.2	1982.2
95.5	0.8609	400.1	2268.8	2668.9	1.2558	6.1546	7.4104	1.0402	1947.4	1948.4
96.0	0.8769	402.2	2267.5	2669.7	1.2615	6.1427	7.4042	1.0406	1914.3	1915.3
96.5	0.8930	404.3	2266.2	2670.5	1.2672	6.1308	7.3980	1.0410	1881.8	1882.8
97.0	0.9094	406.4	2264.9	2671.3	1.2729	6.1190	7.3919	1.0414	1850.0	1851.0
97.5	0.9261	408.5	2263.6	2672.1	1.2785	6.1072	7.3857	1.0418	1818.8	1819.9
98.0	0.9430	410.6	2262.2	2672.9	1.2842	6.0954	7.3796	1.0421	1788.3	1789.3
98.5	0.9602	412.7	2260.9	2673.7	1.2899	6.0836	7.3735	1.0425	1758.3	1759.4
99.0	0.9776	414.8	2259.6	2674.4	1.2956	6.0719	7.3675	1.0429	1729.0	1730.0
1.5	0.9953	417.0	2258.3	2675.2	1.3012	6.0602	7.3614	1.0433	1700.2	1701.2
100.0	1.013	419.1	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554	1.0437	1672.0	1673.0
100.5	1.031	421.2	2255.6	2676.8	1.3125	6.0369	7.3494	1.0441	1644.3	1645.3
101.0	1.050	423.3	2254.3	2677.6	1.3182	6.0252	7.3434	1.0445	1617.2	1618.2
101.5	1.069	425.4	2252.9	2678.3	1.3238	6.0136	7.3374	1.0449	1590.6	1591.6
102.0	1.088	427.5	2251.6	2679.1	1.3294	6.0020	7.3315	1.0453	1564.5	1565.5

Gambar 2. 2 Contoh table uap jenuh dengan merujuk pada tingginya suhu

3. Tabel air dan uap panas lanjut. Dengan tabel ini, dapat diketahui besarnya, entalpi h , entropi s dan volume spesifik v dari air atau uap pada tekanan dan suhu terkait diluar suhu dan tekanan jenuh. Pada table ini juga dijumpai garis pemisah antara sisi air dan sisi uap panas lanjut (—) (lihat Gambar 2.3). Mengingat didalam table ini diberikan dengan kelipatan kelipatan tertentu baik untuk suhu maupun tekanannya, maka untuk mencari nilai entalpi, entropi dan volume spesifik pada tekanan

atau suhu tertentu diluar yang ada didalam table tsb, harus dilakukan interpolasi dengan tekanan dan suhu yang terdekat.

Ketiga jenis tabel uap tersebut diberikan sebagai buku terpisah atau dapat dicari melalui internet.

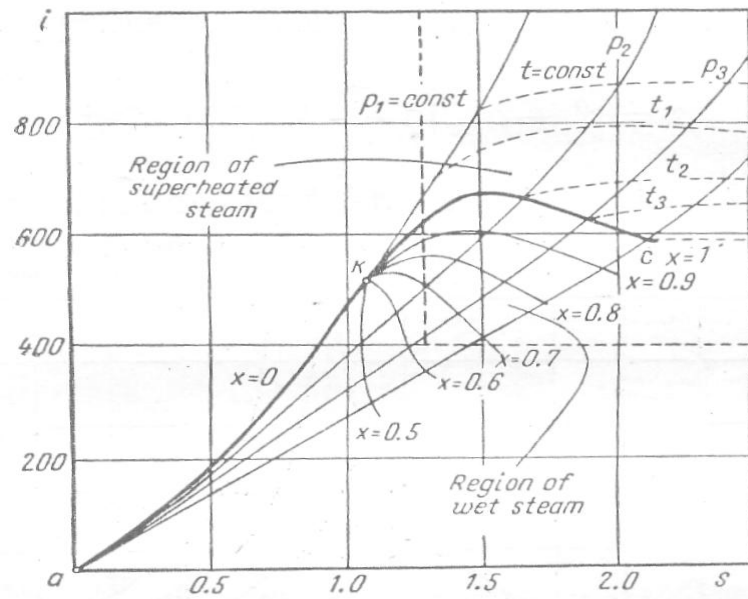
p (abs.) bar		1.0			1.1			1.2		
t_s °C		99.6			102.3			104.8		
		<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>
Sat. Liquid		417.5	1.3027	1.0434	428.8	1.3330	1.0455	439.4	1.3609	1.0475
Sat. Vapour		2675.4	7.3598	1693.7	2679.6	7.3277	1549.2	2683.4	7.2984	1428.1
t °C										
0.01	0.10	0.0000	1.0002		0.11	0.0000	1.0002	0.12	0.0000	1.0002
10	42.09	0.1510	1.0002		42.10	0.1510	1.0002	42.11	0.1510	1.0002
20	83.95	0.2963	1.0017		83.96	0.2963	1.0017	83.97	0.2963	1.0017
30	125.75	0.4365	1.0043		125.76	0.4365	1.0043	125.77	0.4365	1.0042
40	167.53	0.5721	1.0078		167.54	0.5721	1.0078	167.55	0.5721	1.0078
50	209.33	0.7035	1.0121		209.34	0.7035	1.0121	209.35	0.7035	1.0121
60	251.16	0.8309	1.0171		251.17	0.8309	1.0171	251.17	0.8309	1.0171
70	293.03	0.9548	1.0228		293.04	0.9548	1.0228	293.04	0.9548	1.0228
80	334.96	1.0752	1.0292		334.97	1.0752	1.0292	334.97	1.0752	1.0291
90	376.96	1.1925	1.0361		376.97	1.1925	1.0361	376.98	1.1925	1.0361
100	2676.2	7.3618	1695.5		419.07	1.3069	1.0437	419.08	1.3069	1.0437
105	2686.3	7.3887	1719.9		2685.1	7.3422	1561.2	2683.8	7.2894	1428.9
110	2696.4	7.4152	1744.3		2695.2	7.3688	1583.4	2694.1	7.3263	1449.4
115	2706.4	7.4413	1768.5		2705.3	7.3951	1605.6	2704.2	7.3527	1469.8
120	2716.5	7.4670	1792.7		2715.4	7.4209	1627.6	2714.4	7.3787	1490.1

Gambar 2. 3 Contoh table air dan uap panas lanjut

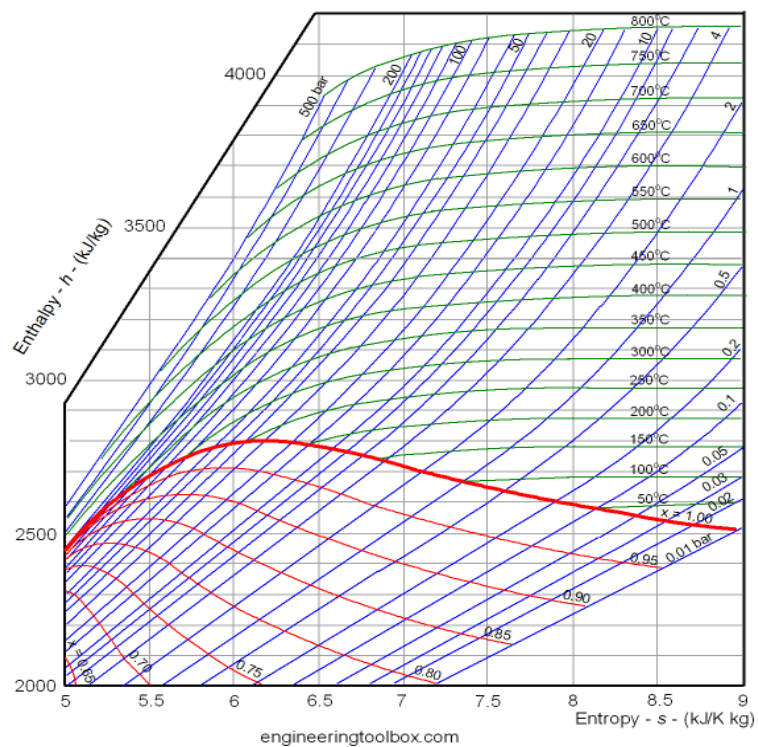
2.3 DIAGRAM ENTALPI – ENTROPI.

Proses pemanasan air menjadi uap dapat digambarkan pula didalam diagram Entalpi Entropi sebagaimana Gambar 2.4. Didalam diagram ini sebagai sumbu mendatar adalah besarnya nilai entropi, dan sebagai sumbu tegak adalah besarnya nilai entalpi. Didalam diagram ini pula terdapat garis garis tekanan konstan, suhu

uap konstan, derajat kekeringan uap konstan, dan untuk diagram yang lebih lengkap terdapat garis volume spesifik konstan.



Gambar 2. 4 Diagram $h - s$ (enthalpy – entropy) untuk air dan uap



Gambar 2. 5 Diagram Mollier

Untuk pemakaian praktis biasanya diagram entalpi – entropi (h-s atau i-s) digambarkan hanya pada sisi uapnya saja sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.5. sementara besarnya entalpi untuk air pada suhu tertentu (berapapun tekanannya) dianggap sama besar nilainya dengan nilai suhu terkait dengan satuan kcal/kg. Diagram ini juga dikenal dengan sebutan Diagram Mollier.

2.4 SOAL –SOAL

1. 300 m^3 air dipanaskan dari suhu 200°C menjadi uap dengan suhu 500°C pada tekanan 100 kg/cm^2 . Berapa besarnya:
 - Panas diperlukan untuk pemanasan tersebut.
 - Panas penguapan pada tekanan tersebut.
 - Entalpi dan entropi pada akhir pemanasan.



BAB III

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

3.1 UMUM

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah jenis pembangkit listrik skala besar yang paling banyak dijumpai. Kurang lebih 75 persen kebutuhan listrik di Jawa dan Bali disuplai dari jenis pembangkit ini. PLTU mempunyai banyak kelebihan / keuntungan dibanding jenis pembangkit lain sebagaimana yang akan diuraikan berikut ini, yaitu :

- Dapat membakar segala jenis bahan bakar. padat, cair maupun gas dapat digunakan disini.
- Dapat dibuat dalam skala sangat besar, mencapai 1200 MW persatu unitnya.
- Umurnya relatif panjang.
- Harga listrik yang dihasilkan bisa murah jika digunakan bahan bakar yang harga per kalorinya rendah.
- Tidak terpengaruh banyak oleh kondisi atmosfer.

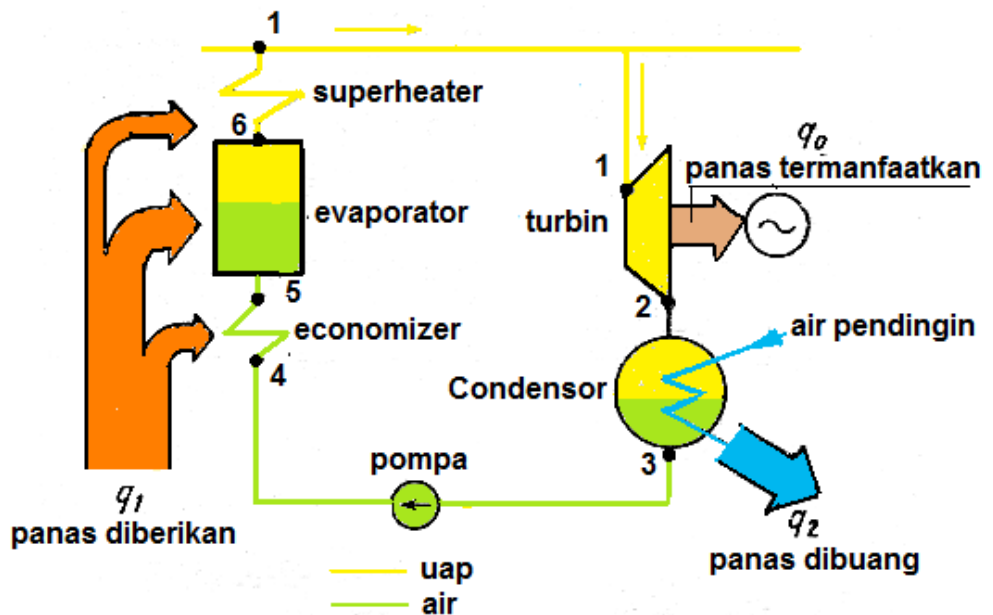
Disamping mempunyai banyak kelebihan / keuntungan, tetapi juga terdapat banyak kelemahan / kerugian antara lain:

- Membutuhkan air pendingin dalam jumlah sangat besar, karena itu banyak dipasang ditepi pantai.
- Karena bahan bakarnya, bisa menimbulkan pencemaran yang relatif tinggi.
- Waktu startnya panjang.
- Respons terhadap perubahan beban lambat.
- Memerlukan lahan yang lebih luas.
- Masa pembangunan lebih lama.
- Tidak bisa start sendiri tanpa bantuan listrik dari luar.
- Diperlukan air penambah dgn kualitas yang tinggi.

3.2 BAGIAN BAGIAN UTAMA

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan jenis pembangkit yang menggunakan air dan uap sebagai media kerjanya. Pembangkit Listrik Tenaga Uap sederhana digambarkan didalam Gambar 3.1 mempunyai bagian-bagian utama sebagai berikut:

- **Boiler**, untuk merubah energi panas dari bahan bakar menjadi energi panas pada uap, terdiri dari tiga bagian yaitu *economizer* untuk memanaskan air menuju titik perpindahan fasa, *evaporator* untuk merubah fasa air menjadi uap dan *superheater* untuk memanaskan lanjut uap tersebut sampai suhu tertentu.
- **Turbin**, untuk merubah energi panas didalam uap menjadi energi mekanik pada poros turbin guna menggerakkan rotor generator.
- **Condensor**, untuk mengembunkan uap menjadi air kembali dengan menggunakan air pendingin.
- **Generator**. Untuk merubah energi mekanik pada rotor generator menjadi energi listrik pada stator untuk disalurkan kekonsumen.



Gambar 3. 1 Siklus Rankine (PLTU sederhana)

3.3 SIKLUS RANKINE

Pembangkit Listrik Tenaga Uap mengikuti sebuah proses siklus (proses keliling) yang disebut siklus Rankine (Gambar 3.1 dan 3.2), terdiri dari:

1. Proses pemompaan air masuk kedalam boiler (3-4). Disini tekanan bertambah tinggi dan suhu sedikit naik.
2. Proses pemberian kalor dengan tekanan yang konstan didalam boiler yang menjadikan air berubah menjadi uap panas lanjut (4-1). Disini terjadi bahwa volume bertambah besar, suhu bertambah tinggi, dan entropi bertambah besar.
3. Proses ekspansi isentropis / adiabatik uap didalam turbin (1-2) yang menjadikan turbin berputar guna memutar poros generator untuk menghasilkan listrik. Disini volume uap bertambah besar, tekanan menurun, suhu menurun dan entropi konstan.
4. Proses pengembunan uap keluar turbin menjadi air kembali didalam kondensor pada tekanan yang konstan (2-3). Disini suhu tetap konstan dan volume mengecil.

Proses proses tersebut diatas digambarkan didalam diagram tekanan – volume (p-v), diagram suhu – entropi (T – S) dan diagram entalpi – entropi (h – s) sebagaimana dapat dilihat didalam Gambar 3.2 Selanjutnya seperti sudah dijelaskan didalam siklus Carnot, besarnya

$$\eta_{th} = \frac{\text{Kerja yang diperoleh}}{\text{Panas yang diberikan}}$$

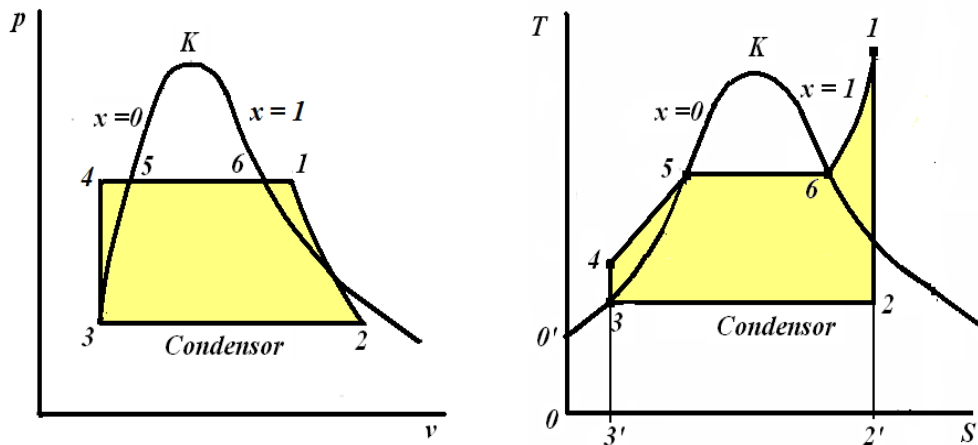
$$\eta_{th} = \frac{\text{Panas yang diberikan} - \text{Panas dibuang}}{\text{Panas yang diberikan}}$$

$$\eta_{th} = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

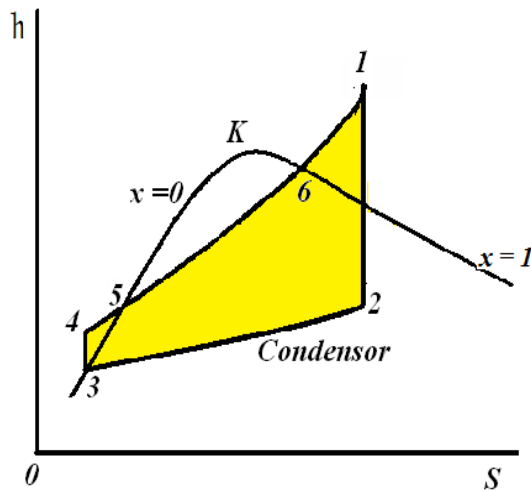
Besarnya panas yang diberikan adalah sama dengan panas yang diterima oleh air dan uap didalam boiler atau sama dengan luas 4-5-6-1-2'-3'-4 didalam diagram T- S, sedang besarnya panas dibuang sama dengan luas 3-2-2'-3'-3. Jadi besarnya kerja diperoleh sama dengan luas 4-5-6-1-2-3-4. Oleh karena besarnya panas diberikan adalah juga sama dengan besarnya selisih entalpi antara sebelum dan sesudah panas diberikan, dan besarnya panas dibuang sama dengan selisih entalpi antara sebelum dan sesudah panas dibuang maka rumus efisiensi diatas dapat ditulis:

$$\eta_{th} = \frac{(h_1 - h_4) - (h_2 - h_4)}{(h_1 - h_4)}$$

$$= \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4}$$

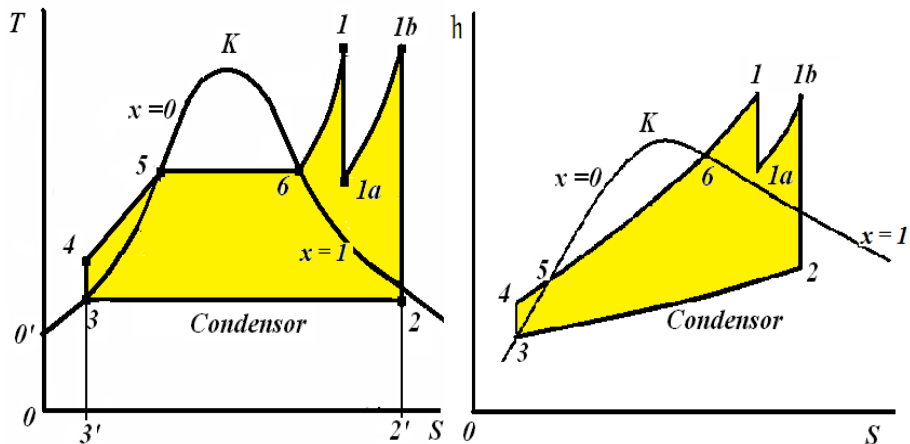


Gambar 3. 2 diagram tekanan – volume ($p-v$), diagram suhu – entropi ($T-S$) dan diagram entalpi – entropi ($h-s$)



Gambar 3. 3 Siklus Rankine digambarkan dalam diagram $p-v$

Pada PLTU - PLTU yang besar dengan daya mampu diatas 100 000 kw, umumnya siklus yang digunakan bukan siklus Rankine murni seperti diatas tetapi siklus Rankine yang telah dimodifikasi menjadi siklus Rankine Reheat sebagaimana digambarkan didalam diagram $T-S$ dan diagram $h-S$ (Gambar 3.3). Selanjutnya sebutan siklus Rankine Reheat biasa hanya disebut dengan Siklus Reheat saja. Susunan peralatan sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan siklus reheat secara lebih lengkap dapat dilihat pada Gambar 3.4



Gambar 3. 4 Diagram T- S dan diagram h - S siklus Rankine Reheat

a)

b)

3.4 BOILER

Boiler merupakan bagian dari PLTU dimana air dirubah menjadi uap melalui pemanasan yang dilakukan dengan pembakaran bahan bakar. Terdiri dua bagian utama yaitu bagian laluan air dan uap dan bagian laluan udara dan gas hasil pembakaran. Bagian laluan air dan uap terdiri dari ekonomiser, evaporator, drum uap, down comer dan superheater. Bagian laluan udara / gas panas terdiri dari ruang bakar, ruang superheater dan ruang economizer.

3.4.1 Klasifikasi Boiler

Berbagai jenis konstruksi boiler dapat dijumpai yang dapat diklasifikasikan menurut jenis konstruksinya, menurut proses pembakarannya, menurut proses pemanasan uap-nya, menurut jenis sirkulasi airnya, dan menurut tingkat tekanannya. Dari segi konstruksi dibedakan:

- **Boiler tangki**

Didalam boiler jenis ini, air terletak didalam sebuah bejana / tangki tunggal dan didalamnya terdapat ruang bakar. Jenis boiler ini hanya untuk kapasitas produksi dan tekanan yang rendah. Tidak digunakan didalam PLTU.

- **Boiler pipa api.**

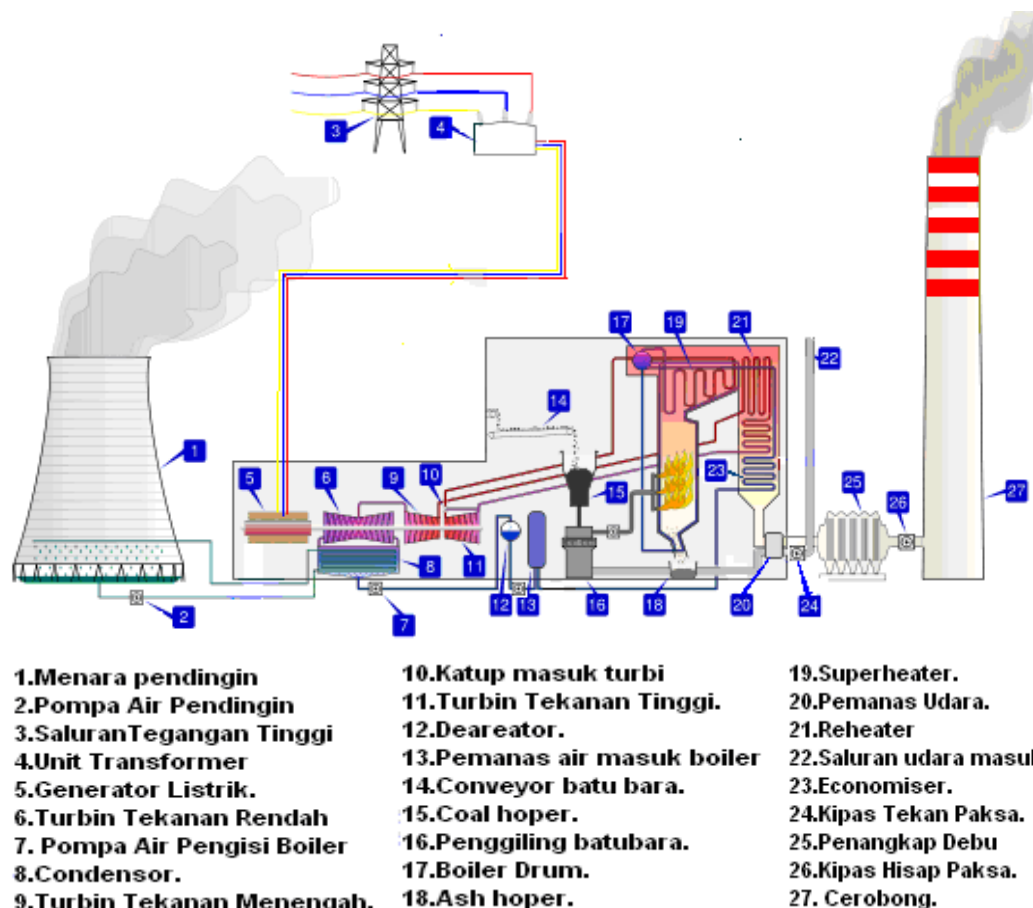
Pada dasarnya boiler ini adalah jenis boiler tangki namun luas bidang pemanasannya diperluas dengan pipa pipa api dengan jumlah yang banyak. Api mengalir didalam pipa sedang airnya berada diluar pipa. Termasuk kedalam jenis ini adalah boiler lokomotif uap.

- **Boiler pipa air.**

Boiler ini merupakan kebalikan dari boiler pipa api, dimana air berada didalam pipa sedang api / gas panas berada diluar pipa.

- **Boiler water wall.**

Boiler ini adalah jenis boiler yang digunakan di PLTU. Terdiri dari pipa pipa air yang berdiri tegak membentuk dinding dinding dimana ruang diantara dinding dinding tersebut digunakan sebagai ruang untuk pembakaran bahan bakar. Panas hasil pembakaran bahan bakar akan dipancarkan kedinding dinding pipa dan selanjutnya diteruskan kedalam air yang berada didalam pipa. Air didalam pipa akan mendidih / berubah fasa dan bergerak naik menuju drum pengumpul uap.



Gambar 3. 5 Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan siklus Reheat

Dari segi proses pembakarannya dibedakan:

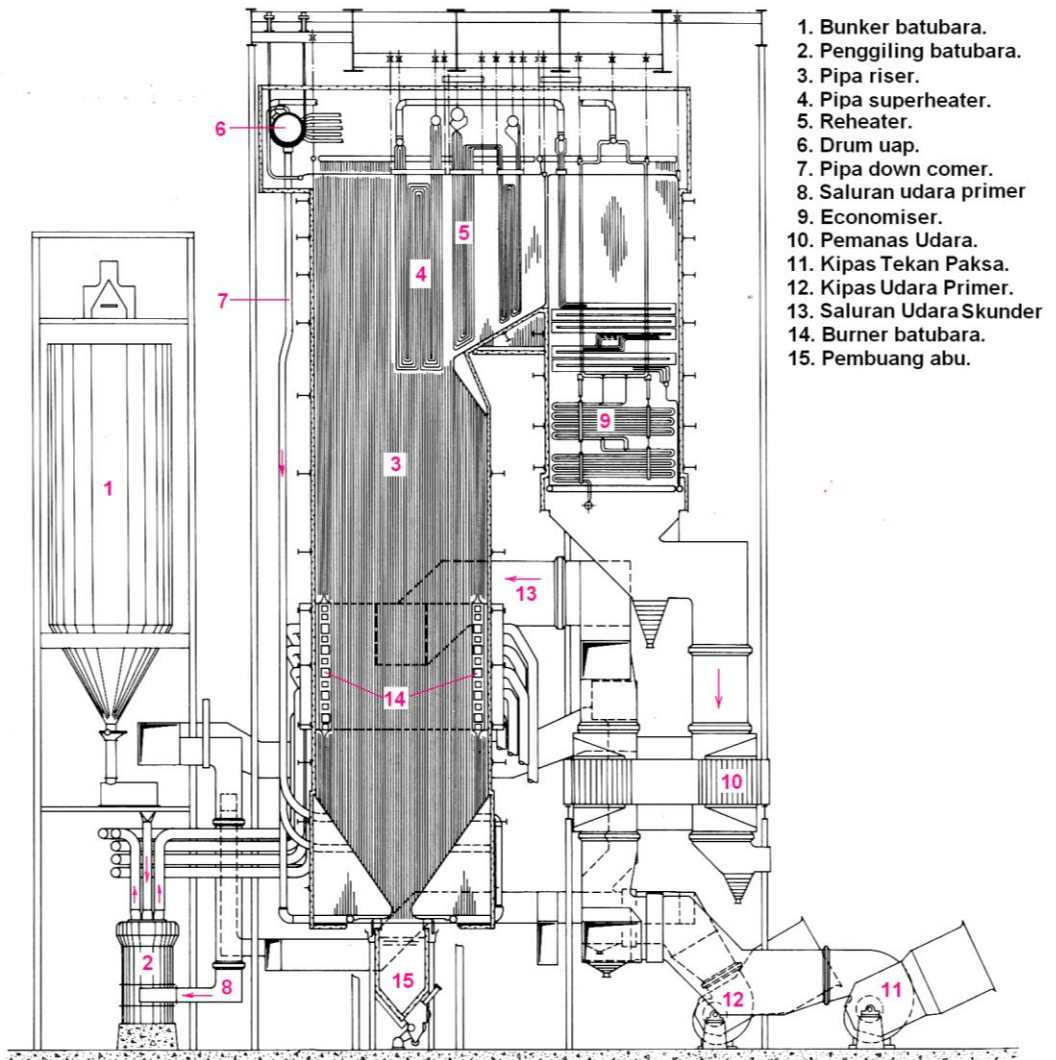
- **Boiler dengan pembakaran stocker (stocker fired)**

Disini bahan bakar padat dilempar masuk kedalam kisi kisi pembakar dalam bentuk ukuran yang relative besar (bukan serbuk). Udara pembakaran datang dari bawah kisi kisi pembakar sebagai udara primer dan dari atas kisi kisi sebagai udara sekunder.

- **Boiler dengan pembakaran batubara serbuk (pulverizer fired) (Gambar 3.5).**

Disini batubara digiling menjadi serbuk dan dimasukkan kedalam ruang bakar bersama sama dengan udara primer. Udara sekunder ditambahkan

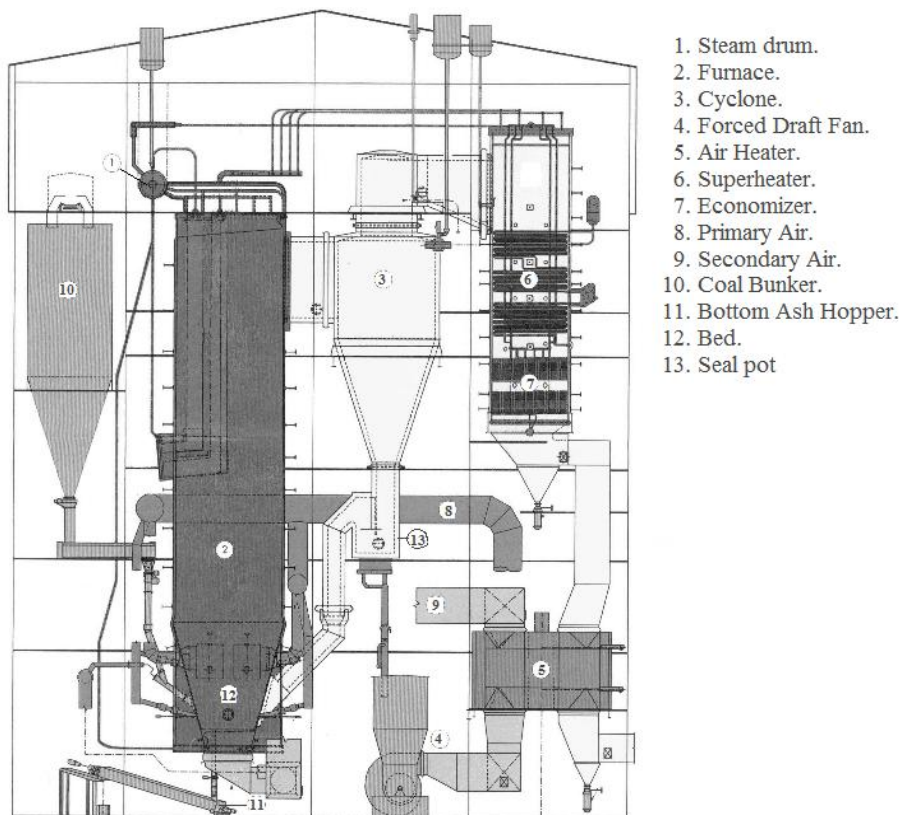
kedalam ruang bakar dari saluran lain untuk menyempurnakan proses pembakaran.



Gambar 3. 6 Boiler water wall dengan bahan bakar batubara serbuk

- **Fluidized bed fired.**

Didalam rangka meniadakan kandungan belerang didalam gas bekas, maka digunakan boiler jenis ini. Ada dua jenis boiler fluidized bed, yaitu Bubble Fluidized Bed dan Circulating Fluidized Bed. Masing masing menggunakan batu kapur untuk mengikat kadar belerang yang terdapat didalam bahan bakar. Didalam Bubble Fluidized Bed batubara terbakar

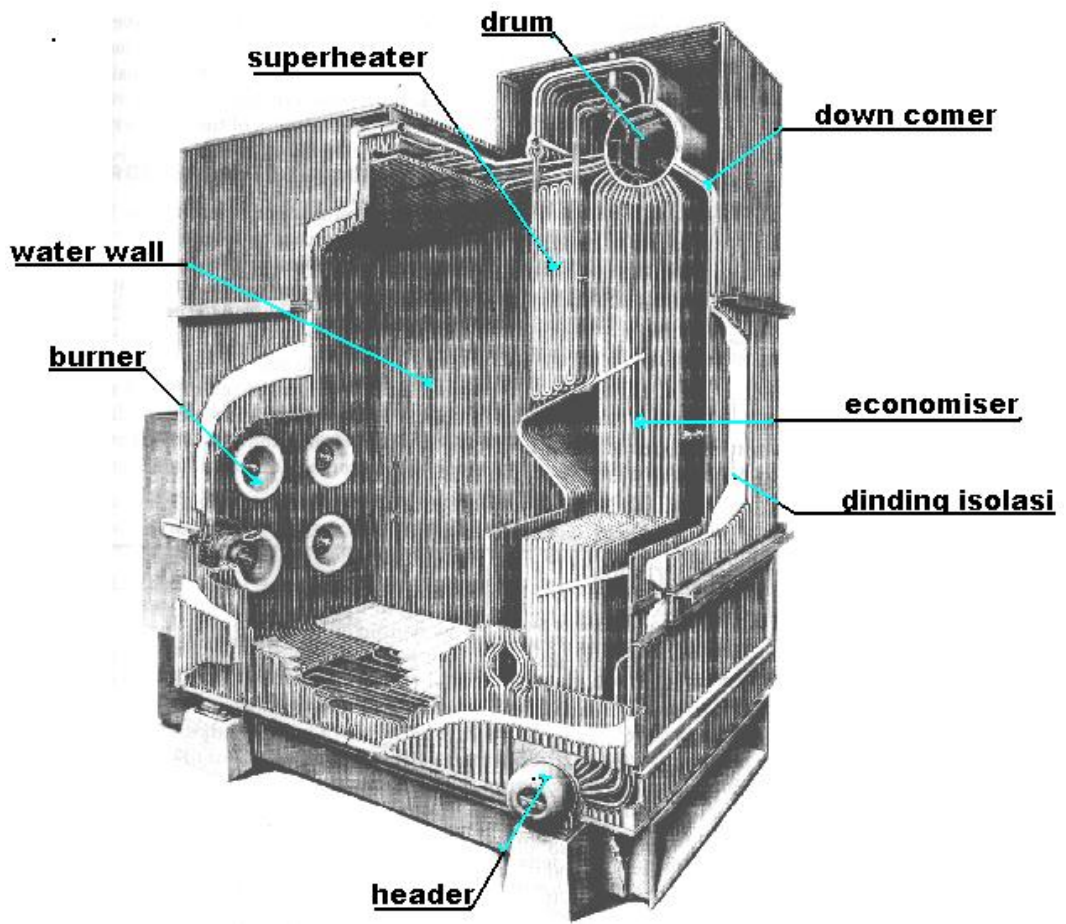


Gambar 3. 7 Boiler water wall dengan pembakaran fluidized bed

didalam ruang bakar dan bergerak bersama batu kapur laksana air mendidih, naik turun didalam ruang bakar, sedang didalam Circulating Fluidized Bed, batubara dan batu kapur bergerak bersama sama dan bersirkulasi dari ruang bakar masuk kedalam Cyclone dan kembali kedalam ruang bakar. Abu batubara akan tercampur dengan batu kapur dengan pengikatan unsur belerang oleh batu kapur.

- **Oil & Gas fired.**

Boiler ini khusus digunakan untuk pembakaran bahan bakar minyak atau gas. Oleh karena sifat proses pembakarannya yang relative lebih cepat dibanding proses pembakaran batubara, maka ukuran ruang bakarnya menjadi lebih kecil.



Gambar 3. 8 Boiler water wall dengan bahan bakar minyak dan gas

Dari segi pemanasan uapnya dibedakan:

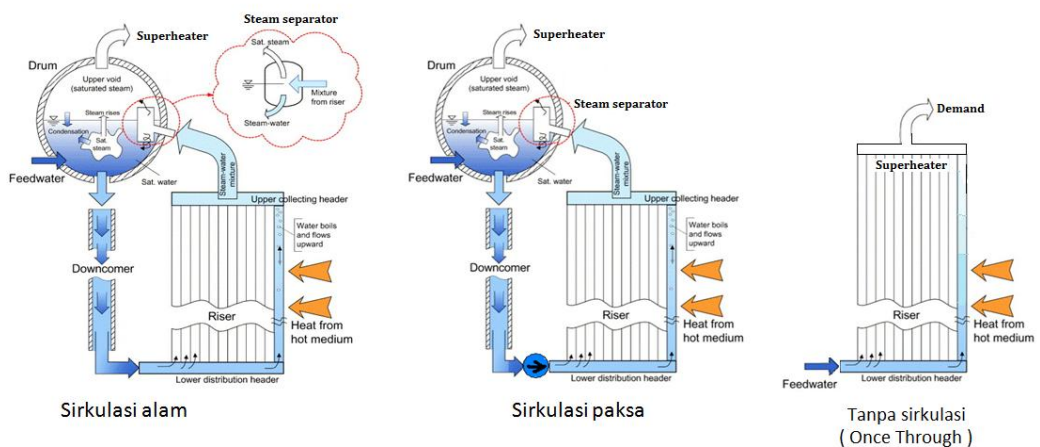
- **Boiler non reheat** adalah boiler yang hanya terdiri dari unsur utama saja yaitu ekonomiser, evaporator dan superheater.
- **Boiler reheat**, adalah boiler yang padanya ditambahkan bagian pemanasan ulang dari uap yang telah digunakan di turbin tekanan tinggi.

Dari segi sirkulasi air yang terjadi dibedakan:

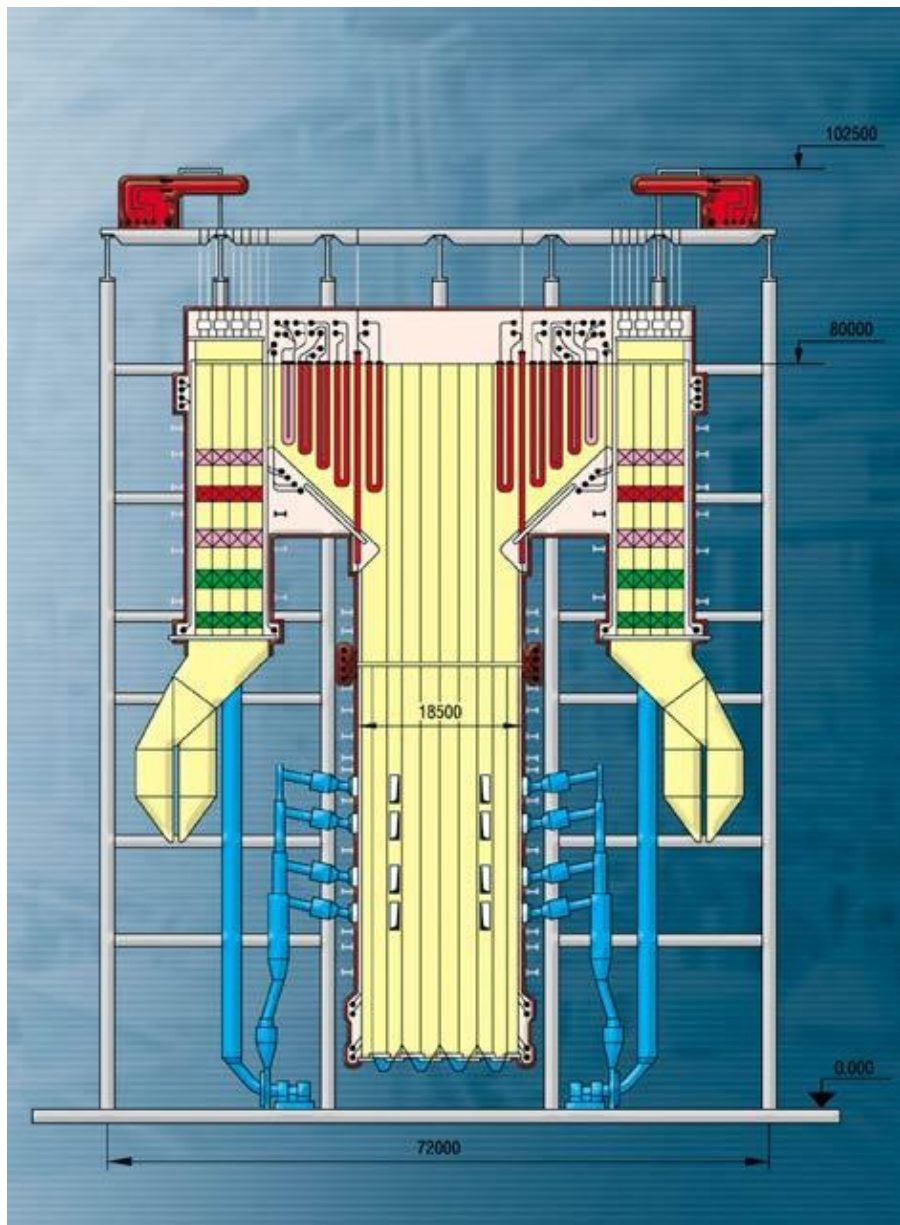
- **Boiler dengan sirkulasi alam (natural circulation)**, yaitu boiler yang sirkulasi airnya hanya mengandalkan perbedaan berat jenis antara bagian yang terkena panas dengan bagian yang tidak terkena panas. Tempat dimana air terkena panas dan bergerak naik disebut sebagai *riser* dan tempat air

tidak terkena panas dan bergerak turun disebut sebagai down comer. Riser atau juga disebut evaporator merupakan pipa pipa tegak yang membentuk dinding (disebut juga sebagai water wall) yang mengelilingi ruang bakar. Panas radiasi dari nyala api pembakaran akan memanaskan air didalam pipa dan merubahnya menjadi uap.

- **Boiler dengan sirkulasi paksa (Forced circulation)** adalah boiler yang sirkulasi airnya menggunakan pompa.
- **Boiler dengan tanpa sirkulasi (Once through).** Disini air masuk boiler langsung menjadi uap tanpa ada sirkulasi. Karena itu boiler ini disebut dengan sebutan Once Through (sekali lewat). Didalam boiler jenis ini tidak dilengkapi dengan drum uap dan pemisah air dan uap didalam drum. Umumnya boiler jenis ini beroperasi dengan tekanan superkritis (diatas 225 kg/cm^2)



Gambar 3. 9 Sirkulasi air boiler



Gambar 3. 10 Boiler Once Through

Dari segi tekanan uapnya dibedakan:

- **Boiler tekanan rendah**, yaitu boiler dengan tekanan kurang dari 10 bar.
- **Boiler dengan tekanan menengah** yaitu boiler dengan tekanan antara 10 s/d 88 bar

- **Boiler dengan tekanan tinggi** yaitu boiler dengan tekanan antara 88 - 224 bar.
- **Boiler dengan tekanan super kritis** yaitu boiler dengan tekanan diatas 225 bar.

3.4.2 Effisiensi & Kerugian didalam Boiler

Panas diberikan didalam Boiler.

Untuk membangkitkan uap dengan suhu dan tekanan seperti tersebut dalam 3-1. diperlukan panas dari hasil pembakaran bahan bakar, baik padat, cair, maupun gas. Panas yang dapat ditimbulkan oleh pembakaran 1 kg bahan bakar tergantung dari besarnya unsur-unsur kimia yang terkandung di dalamnya sebagaimana dapat dilihat dalam rumus berikut :

Untuk bahan bakar padat dan cair :

$$H_u = 81C + 290 (H - 0/8) + 25S - 6W. \quad \text{k kal/kg}$$

dimana:

$$H_u = \text{nilai kalor bawah} \quad \text{k kal/kg}$$

$$C = \text{nilai unsur karbon} \quad \%$$

$$H = \text{nilai unsur hydrogen} \quad \%$$

$$O = \text{nilai unsur oxygen} \quad \%$$

$$S = \text{nilai unsur belerang} \quad \%$$

$$W = \text{nilai unsur air} \quad \%$$

Untuk bahan bakar gas :

$$H_u = 30,2 \text{ CO} + 25,7 \text{ H}_2 + 85,5 \text{ CH}_4 + Z \text{ C}_n \text{ H}_m. \quad \text{kkal/N m}^3$$

dimana rumusan $\text{C}_n \text{ H}_m$ dan besarnya nilai Z dapat dilihat didalam table 3.1

Persamaan (3-3) disebut nilai kalor bawah yang biasa digunakan dalam perhitungan di negeri Jerman. Sedang di Amerika dan Inggris digunakan nilai kalor atas yaitu :

$$H_o = 81C + 290 (H-0/8) + 25S. \text{ k kal/kg}$$

Tabel 3. 1 Rumusan hidrokarbon dan besarnya nilai Z

$C_n H_m$	Z
$C_2 H_2$	136
$C_2 H_4$	143,2
$C_2 H_6$	153,7
$C_3 H_6$	210,7
$C_4 H_8$	223,5
$C_6 H_6$	271,9
	335,2

Persamaan (3-3) disebut nilai kalor bawah yang biasa digunakan dalam perhitungan di negeri Jerman. Sedang di Amerika dan Inggris digunakan nilai kalor atas yaitu :

$$H_o = 81C + 290 (H-0/8) + 25S. \text{ k kal/kg}$$

Panas berguna didalam Boiler.

Boiler direncanakan untuk dapat memproduksi uap dengan jumlah, tekanan dan suhu tertentu dari air dengan jumlah, tekanan dan suhu tertentu pula. Karena itu panas berguna dari sebuah boiler adalah merupakan jumlah dari masing masing uap keluar boiler dikalikan entalpinya dikurangi berat air masuk boiler dikalikan entalpinya. Oleh karena besarnya air masuk boiler sama dengan jumlah uap keluar boiler maka dapat ditulis:

$$Q_k = \sum G_u (h_u - h_a) \text{ k kal/jam}$$

Untuk boiler – boiler yang menggunakan pemanas ulang (reheater) adalah :

$$Q_k = G_u (h_u - h_a) + G_r (h_{rk} - h_{rm})$$

dimana :

Q_k = panas berguna dalam boiler k kal/jam

G_u = berat uap keluar boiler kg/jam

h_u = enthalpi uap keluar boiler kal/kg

h_a = enthalpi air pengisi masuk boiler k kal

G_r = berat uap masuk pemanas ulang (reheater) kg

h_{rm} = enthalpi uap masuk reheater k kal/kg

h_{rk} = enthalpi uap keluar reheater k kal/kg

Harga enthalpi dapat dilihat pada tabel air / uap atau pada diagram enthalpy entropi.

Effisiensi Boiler.

Panas yang dapat dibawa oleh uap masuk kedalam turbin hanyalah sebagian dari panas hasil pembakaran bahan bakar di dalam boiler. Sebagian lain diperlukan untuk keperluan boiler itu sendiri misalnya untuk pemanasan bahan bakar (minyak) untuk pemanasan awal udara pembakaran dan sebagainya. Sisanya merupakan bagian yang tidak dapat dimanfaatkan dan terpaksa harus dibuang dan ini merupakan kerugian boiler.

Effisiensi boiler adalah perbandingan dari panas yang dapat diserap oleh air/uap di dalam boiler dengan panas maximum yang dapat diberikan oleh bahan bakar.

$$\eta_k = \frac{Q_k}{Q_{bb}} = \frac{G_u (h_u - h_a) + G_r (h_{rk} - h_{rm})}{G_{bb} \cdot H_u} \times 100\%$$

Effisiensi boiler juga dapat dihitung dari kerugian-kerugian yang terjadi di dalamnya.

$$\eta_k = \frac{Q_{bb} - \sum K_n}{Q_{bb}} \times 100\%$$

dimana :

K_n = kerugian-kerugian di dalam boiler.

Kerugian didalam boiler

Kerugian didalam boiler merupakan panas yang tidak dapat dimanfaatkan untuk memproduksi uap dan itu terdiri dari dua bagian yaitu :

Kerugian dalam pembakaran terdiri dari :

Kerugian dalam kisi-kisi pembakar.

Kerugian karena bahan bakar terbawa dalam abu.

Kerugian karena gas yang tidak terbakar.

Kerugian karena jelaga dan abu terbang.

Kerugian karena panas hilang

Kerugian panas dalam gas bekas keluar cerobong.

Kerugian karena kerak yang mencair.

Kerugian karena radiasi dan bocoran.

3.4.3 Kelengkapan Boiler

Disamping bagian utama boiler yang sudah disebutkan diatas, boiler dilengkapi dengan bagian bagian lain untuk memungkinkan boiler dapat beroperasi dengan lancar, aman dan otomatis. Bagian bagian tersebut dapat dikelompokkan kedalam sistem sistem yaitu:

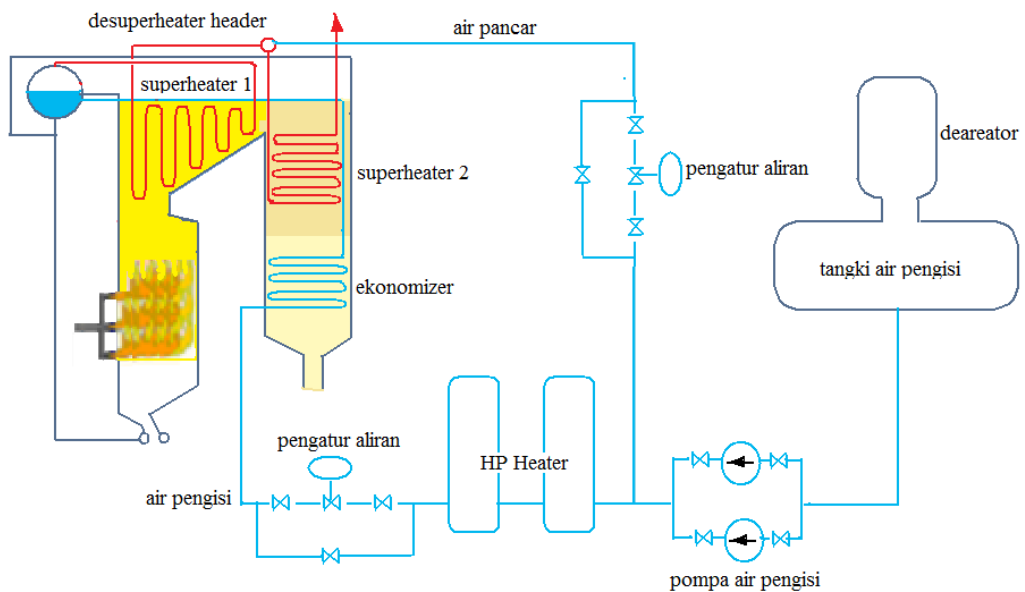
- Sistem aliran air pengisi boiler
- Sistem aliran bahan bakar
- Sistem aliran udara dan gas pembakaran.
- Sistem pengendalian suhu uap.
- Sistem pengaman.
- Sistem kontrol.

- Sistem pembersih laluan gas panas.

Sistem aliran air pengisi boiler dan sistem pengendalian suhu uap (Gambar 3.11)

Sistem aliran air pengisi boiler terdiri dari Tangki Air Pengisi, Pompa Air Pengisi, Katup Pengatur Air Pengisi, dan Pemanas Air Tekanan Tinggi. Air dihisap oleh Pompa Air Pengisi, dari Tangki Air Pengisi kemudian dipanaskan didalam Pemanas Air Tekanan Tinggi dan selanjutnya masuk kedalam Economizer. Jumlah air yang dimasukkan kedalam boiler dalam keadaan normal diatur sesuai dengan besarnya aliran uap yang masuk keturbin, dengan menggunakan katup pengatur aliran. Pengaturan aliran air pengisi juga bisa dilakukan dengan mengatur putaran Pompa Air Pengisi.

Suhu uap masuk turbin harus dijaga kestabilannya, dan tidak boleh berubah oleh karena adanya perubahan aliran uap keluar boiler. Untuk itu suhu uap dikendalikan dengan memberikan injeksi air yang relative dingin dan dimasukkan kedalam superheater. Aliran air pendingin ini dikendalikan secara otomatis, yang akan menambah jumlah alirannya jika ada tendensi suhu uap mengalami kenaikan, dan akan mengurangi jumlah alirannya jika ada tendensi suhu uap menurun.



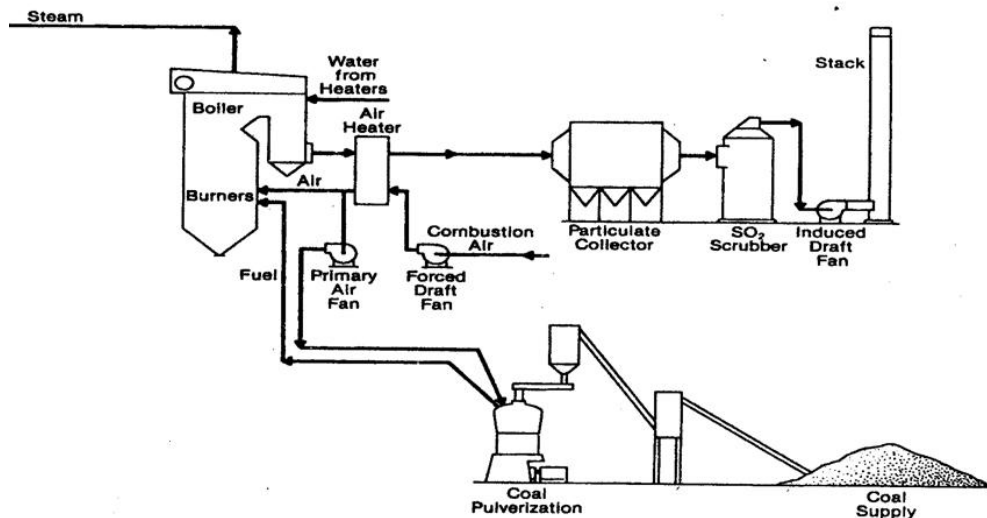
Gambar 3. 11 Sistem air pengisi boiler dan sistem air pancar pengendali suhu uap

Sistem aliran batubara dan sistem aliran udara / gas hasil pembakaran (Gambar 3.12)

Sistem aliran bahan bakar padat (batubara serbuk) terdiri dari tempat penumpukan, pengumpan, ban berjalan, bunker, pengukur aliran, penggiling dan pembakar. Batubara dipindahkan dari tempat penumpukan dengan alat berat (bulldozer menuju ban berjalan yang menghantarkan batubara menuju bunker untuk diteruskan kepenggiling setelah ditimbang / diukur jumlahnya oleh pengukur aliran. Selanjutnya didalam penggiling, batubara bertemu dengan udara pembakaran yang disebut sebagai udara primer dan keduanya secara bersama sama masuk kedalam pembakar. Ujung pembakar yang letaknya ditepi ruang bakar mengantarkan serbuk batubara masuk kedalam ruang bakar dan terbakar didalamnya. Udara sekunder diberikan kedalam ruang bakar untuk menyempurnakan proses pembakaran didalamnya.

Sistem aliran udara pembakaran terdiri dari Saluran Udara Masuk, Kipas Tekan, Pemanas Udara, Pengukur Aliran, Kotak Angin (Wind Box), Pembakar, Penangkap Abu Terbang, Penangkap Gas Belerang dan Cerobong. Udara pembakaran dihisap dengan Kipas Tekan dari atmosfir melalui Saluran Udara

Masuk, kemudian didorong masuk kedalam Pemanas Udara. Setelah dipanaskan, sebagian udara masuk kedalam



Gambar 3. 12 Sistem aliran batubara dan sistem udara / gas hasil pembakaran

Penggiling Batubara (sebagai udara primer) dan bersama dengan batubara tergiling masuk kedalam pembakar; sebagian lainnya masuk kedalam wind box untuk selanjutnya masuk kedalam ruang bakar sebagai udara sekunder.

Pembakaran bahan bakar akan menghasilkan nyala api dan gas dengan suhu yang tinggi untuk memanaskan dinding dinding pipa air (water wall), pipa pipa super-heater, economizer, pemanas udara dan menuju cerobong setelah melalui penangkap abu terbang dan penangkap gas belerang.

Sistem pengaman Boiler

Sistem pengaman boiler terdiri dari pengaman tekanan lebih (over pressure), pengaman suhu uap lebih overheat), pengaman permukaan air dan pengaman nyala api. Pengaman tekanan lebih berguna untuk mengamankan boiler dari tekanan lebih yang bisa mengakibatkan meledaknya boiler. Pengamanan dilakukan dengan melengkapi boiler dengan satu atau lebih katup pengaman (safety valve) dimana katup pengaman tersebut akan membuka jika batas operasinya terlampaui.

Pengaman suhu uap lebih berguna untuk mengamankan material yang dilalui uap dari kehilangan kekuatan akibat naiknya suhu. Pengaman ini akan memberikan alarm / peringatan buat petugas untuk mengambil tindakan yang perlu agar suhu lebih tersebut tidak berlanjut.

Pengaman permukaan air terdiri dari pengaman permukaan air rendah dan pengaman permukaan air tinggi. Pengaman permukaan air rendah digunakan untuk mengamankan boiler suhu lebih akibat tiadanya air didalamnya. Pengaman ini akan langsung mematikan nyala api jika permukaan air kelewat rendah. Pengaman permukaan air tinggi digunakan untuk menghindari mengalirnya air masuk kesuperheater dan terus keturbin. Pengaman ini hanya akan memberikan alarm jika permukaan air kelewat tinggi.

Pengaman nyala api berguna untuk menghentikan aliran bahan bakar jika nyala api didalam ruang bakar mati. Dengan demikian tidak ada lagi bahan bakar yang masuk kedalam ruang bakar jika api tidak muncul.

Sistem kontrol

Sistem kontrol atau juga disebut sebagai sistem kendali operasi boiler berguna untuk mengendalikan jumlah aliran bahan bakar, aliran air pengisi dan aliran udara pembakaran secara otomatis berdasarkan jumlah aliran uap atau berdasarkan besarnya daya listrik yang dibangkitkan generator. Terdiri dari pemungut (sensor), pemancar (transmitter) pengendali (controller) dan pelaksana (actuator). Sensor akan mengambil sinyal aliran uap untuk diteruskan ke controller melalui transmitter. Controller akan memberikan sinyal menambah atau mengurangi besarnya kerja actuator berdasarkan perbedaan sinyal input dari sensor terhadap setpoint (penyetelan awal) yang dimiliki controller.

Sistem pembersih laluan gas panas

Sistem pembersih laluan gas panas berguna untuk membersihkan abu dan jelaga yang menempel pada pipa pipa boiler. Abu dan jelaga ini akan mengurangi proses transfer energi dari gas hasil pembakaran kepada air didalam boiler. Pembersihan dilakukan dengan menyemprotkan uap pada laluan gas panas ditempat

dimana abu dan jelaga bisa menempel. Penyemprotan dilakukan secara periodik dengan interval waktu tertentu tergantung dari kadar abu dan jelaga ybs.

3.4.4 Air pengisi Boiler

Agar produksi uap berjalan terus, maka boiler harus diisi dengan air baru meng-gantikan yang telah menjadi uap dan mengalir keturbin. Air tersebut sebagian besar diperoleh dari pengembunan uap bekas keluar turbin yang terjadi didalam kondensor. Air boiler harus dirawat agar tidak menimbulkan korosi dan bebas dari kotoran lainnya yaitu dengan menjaga agar air terbebas dari oxygen dan menjaga air bersifat sedikit basa serta relative tidak menghantar listrik.

Perawatan air dibagi menjadi dua jenis yaitu perawatan air internal dan perawatan air external. Dengan perawatan air internal dimaksudkan sebagai perlakuan yang dilakukan terhadap air yang mengikuti siklus dari kondensor – deareator – boiler – turbin. Perawatan ini meliputi:

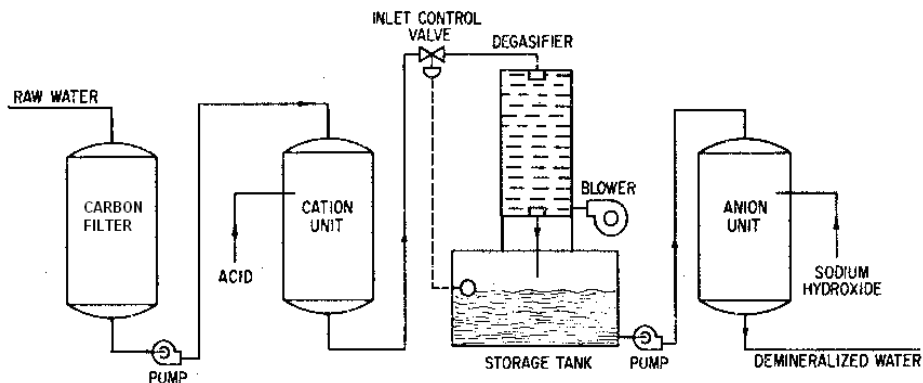
- Injeksi Hydrazene (N_2H_4) untuk mengikat Oxygen (O_2) sebelum air masuk kedalam deareator.
- Pemanasn air langsung dengan uap didalam deareator untuk membuang gas / udara yang larut didalam air selama perjalanannya didalam siklus.
- Injeksi Amoniak (NH_3) kedalam boiler untuk menaikkan pH air bila diperlukan. Injeksi amoniak ini tidak disarankan bila pipa kondensor terbuat dari bahan tembaga, karena amoniak bersifat korosi terhadap tembaga.
- Injeksi Trisodium Phospat (Na_3PO_4) kedalam boiler untuk mengikat kotoran kotoran didalam air dan mebuangnya melalui saluran blow down.

Perawatan air external meliputi perlakuan terhadap air sebelum air tersebut digunakan sebagai air penambah didalam siklus kondensor – deareator – boiler – turbin. Oleh karena adanya kebocoran yang terjadi atau adanya penggunaan uap yang lain diluar yang masuk turbin dan kebutuhan untuk pembuangan melalui saluran blowdown, maka diperlukan sejumlah air penambah. Air penambah merupakan air murni yang tidak menghantar listrik, bebas dari keasaman dan

kesadahan. Umumnya air penambah diperoleh dari penyulingan air laut atau dengan cara Reverse Osmosis untuk menghilangkan garam garamnya dan kemudian dimurnikan lagi didalam instalasi Demineralizing Plant.

Instalasi Demineralizing Plant terdiri dari tangki tangki (Gambar 3.13) dengan sebutan masing masing sbb:

- Tangki saringan karbon, didalamnya berisi bahan karbon aktif untuk menyaring chlorine, terutama jika air berasal dari Perusahaan Air Minum.



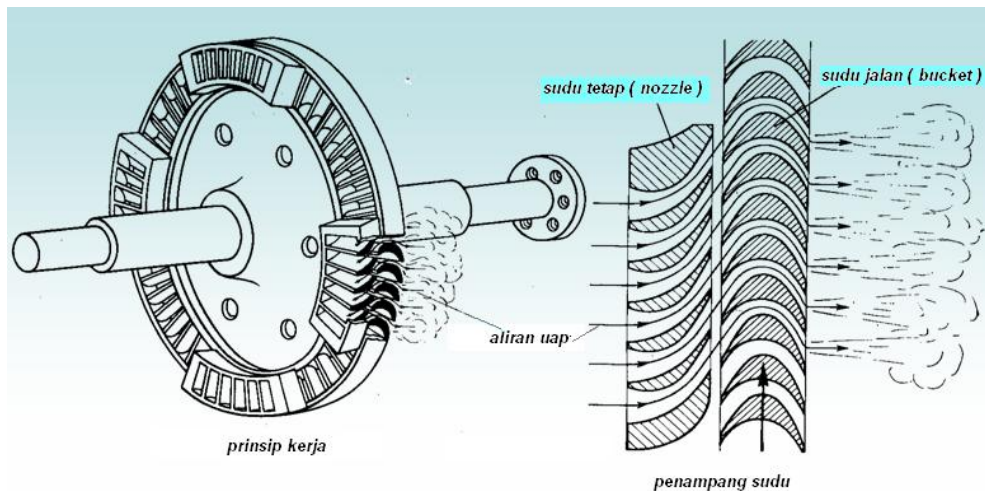
Gambar 3. 13 Instalasi pemurnian air (demineralizing plant)

- Tangki penukar cation, didalamnya terdapat resin penukar kation, untuk menangkap ion ion calsium, magnesium dan sodium. Resin tersebut pada suatu saat tertentu akan menjadi jenuh dan harus diaktifkan kembali, yaitu dengan mengalirkan asam chlorida.
- Tangki degassifier, untuk membuang gas gas yang larut didalam air. Untuk membuang gas ini air dibuat jatuh seperti hujan dan ditiup dengan udara dari arah bawah keatas dengan bantuan sebuah blower.

Tangki penukar anion, didalamnya terdapat resin anion untuk menangkap ion ion silica, carbon dioxid, chloride dan sulfat. Jika resin ini menjadi jenuh harus diaktifkan kembali dengan mengalirkan larutan caustic soda.

3.5 TURBIN

Turbin uap adalah mesin penggerak yang merubah secara langsung energi panas dari uap menjadi gerak putar pada poros. Proses perubahan energi panas menjadi kerja mekanik berupa gerak putar tsb dapat dilihat di dalam Gambar. 3.14.



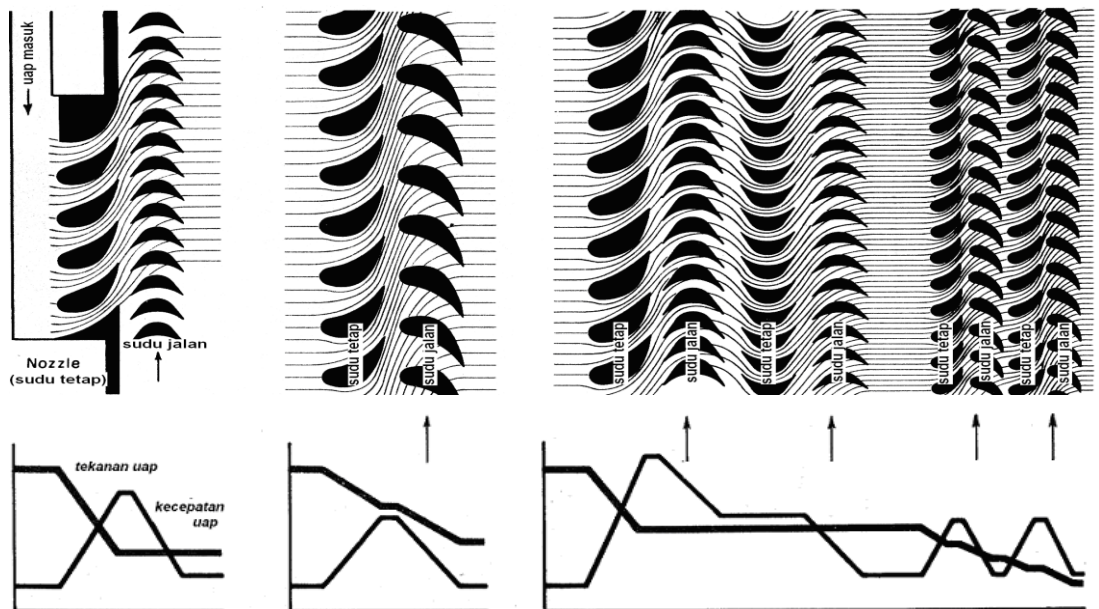
Gambar 3. 14 Cara kerja Turbin Uap

Pertama-tama uap dengan suhu dan tekanan yang ada padanya masuk ke dalam nozzle atau sudu tetap yang terpasang di dalam rumah turbin. Didalam nozzle, uap berex-pansi (tekanan turun dan volumenya bertambah besar) sehingga diperoleh kecepatan yang tinggi dan masuk kedalam laluan diantara sudu-sudu jalan. Akibat dari perjalanan yang membelok maka sudu-sudu jalan tersebut akan terdorong kearah belakang (tanda panah).

Turbin mempunyai dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang berputar, ditumpu oleh dua bantalan, padanya terpasang sudu sudu jalan yang menerima pancaran uap dari sudu tetap. Stator adalah bagian yang diam, padanya terpasang sudu sudu tetap yang mengubah enthalpy uap menjadi kecepatan untuk mendorong sudu jalan, sehingga rotor menjadi berputar. Pada stator juga terdapat saluran saluran uap pemanas untuk pemanasan air masuk boiler. Juga terpasang katup uap masuk turbin, perapat poros dll.

3.5.1 Klasifikasi Turbin.

Turbin uap diklasifikasikan menurut berbagai segi seperti: proses ekspansi uap, arah aliran uap, tekanan uap masuk, tekanan uap keluar turbin, pengaturan uap masuk dan jumlah silinder casingnya sebagaimana uraian berikut ini.



Gambar 3. 15 Bentuk sudu turbin impuls dan turbin reaksi

a)Tingkat impulse b) tingkat reaksi c) tingkat kecepatan d) tingkat reaksi

Dari segi proses ekspansi uap didalam sudu-sudu turbin dibedakan antara turbin impulse dan turbin reaksi. Turbin impulse adalah jenis turbin yang ekspansi uapnya hanya terjadi didalam nozzle atau sudu tetap saja, sedang turbin reaksi adalah jenis turbin yang proses ekspansi uapnya berlangsung baik didalam sudu tetap maupun sudu jalan.

Gambar 3.15 menunjukkan bagaimana proses penurunan tekanan dan proses pertambahan kecepatan masing masing pada turbin impulse (juga disebut sebagai turbin tingkat kecepatan) dan turbin reaksi (juga disebut sebagai turbin tingkat tekanan). Masing masing menggambarkan untuk jumlah tingkat tunggal dan jumlah tingkat ganda atau lebih.

Dari segi arah aliran uapnya dibedakan antara turbin axial dan turbin radial. Turbin axial adalah turbin yang aliran uapnya sejajar sumbu poros. Terdapat dua jenis turbin axial yaitu yang arah alirannya hanya satu arah (single flow) dan yang arah alirannya dobel (double flow). Turbin radial adalah turbin yang arah aliran uapnya tegak lurus sumbu poros.

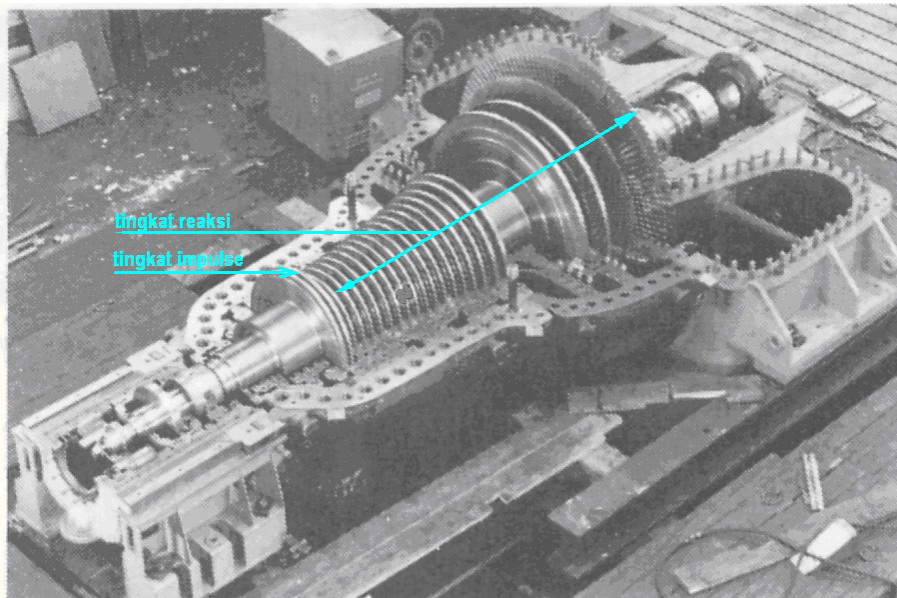
Dari segi tekanan uap masuk turbin, dibedakan berdasarkan standard yang berlaku di Jerman (DIN 4304):

- Tekanan super kritis (≥ 225 bar)
- Tekanan tinggi (88 - 224 bar)
- Tekanan menengah (10 - 88 bar).
- Tekanan rendah (< 10 bar)

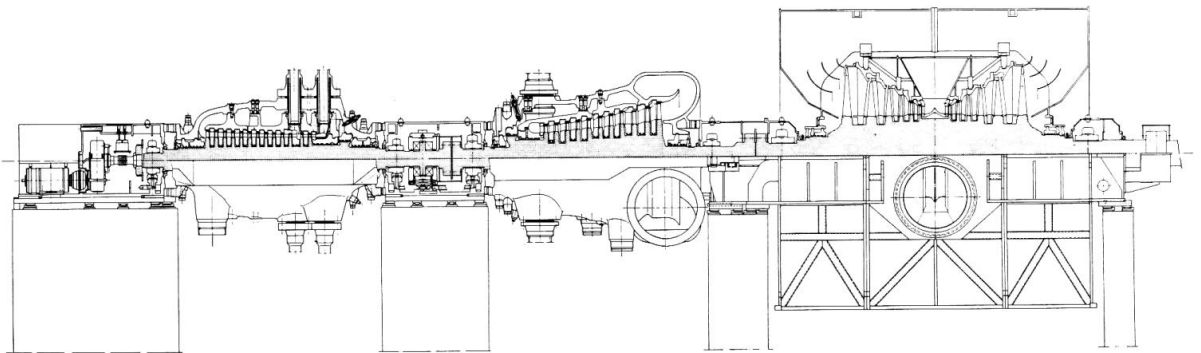
Dari segi tekanan uap meninggalkan sudu terakhir dibedakan antara turbin tekanan lawan (back pressure) dan turbin condensing. Turbin back pressure adalah turbin yang tekanan keluar sudu terakhir masih mengandung tekanan diatas tekanan atmosfir, dan uap keluar turbin digunakan untuk keperluan lain misalnya untuk pemanasan atau untuk melakukan suatu proses didalam industri, sedang turbin condensing adalah turbin yang tekanan keluar sudu terakhirnya berada dibawah tekanan atmosfir (vacuum) dan uapnya langsung diembunkan menjadi air kembali didalam condenser.

Dari segi pengaturan jumlah aliran uap masuk turbin, dibedakan antara turbin tekanan konstan dengan pengaturan throttle, turbin tekanan konstan dengan pengaturan kelompok nosel, dan turbin dengan tekanan berubah (varabel).

Dari segi jumlah silinder/casing dibedakan turbin dengan silinder tunggal, silinder ganda dan seterusnya. Gambar 3.16 menunjukkan sebuah turbin PLTU dengan silinder tunggal, terdiri dari dua tingkat impuls dan 21 tingkat reaksi dengan tekanan 88 bar gauge dan suhu 510^0C , sedang Gambar 3.17 menunjukkan turbin dengan tiga silinder / casing yaitu silinder turbin tekanan tinggi, silinder turbin tekanan menengah dan silinder turbin tekanan rendah.



Gambar 3. 16 Turbin PLTU dengan silinder tunggal, terdiri dari dua tingkat impuls dan 21 tingkat reaksi dengan 88 bar suhu 5100C



Gambar 3. 17 Turbin dengan tiga silinder / casing: silinder tekanan tinggi, silinder tekanan menengah dan silinder tekanan rendah

3.5.2 Daya Turbin.

Daya yang bisa dibangkitkan oleh turbin ditentukan oleh jumlah uap yang mengalir dan besarnya heat drop (turun entalpi) uap yang terjadi didalam turbin. Secara ideal proses yang terjadi didalam turbin adalah proses adiabatic atau proses dengan entropy konstan, yaitu proses yang berlangsung dengan tidak adanya panas

yang masuk maupun panas keluar. Oleh karena adanya kerugian didalam turbin maka heat drop ideal tersebut tidak bisa terpenuhi.

Gambar 3.18 adalah diagram entalpi entropi ($h - s$) untuk proses uap didalam turbin. Disini digambarkan tentang heat drop ideal, heat drop aktual dan kerugian kerugian yang terjadi didalam turbin dan dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Heat drop ideal (H_i) adalah turunnya intalpi ideal (proses adiabatik / entropi konstan) dari uap sebelum masuk turbin sampai masuk kondensor digambarkan sebagai garis lurus kebawah dari titik 0 ketitik 2_i.
- Heat drop ideal didalam turbin (H_i') adalah turunnya intalpi ideal (proses adiabatik / entropi konstan) dari uap setelah katup masuk turbin sampai masuk kondensor digambarkan sebagai garis lurus kebawah dari titik 1 ketitik 2.
- Heat drop aktual didalam turbin (H_a) adalah turunnya entalpi aktual dari uap setelah katup masuk turbin sampai masuk kondensor. Disini proses ekspansi uap tidak lagi adiabatik / entropi konstan lagi, tetapi entropi menjadi bertambah besar, digambarkan sebagai garis miring kebawah dari titik 1 ketitik 2'. Besarnya heat drop disini merupakan selisih entalpi antara entalpi uap sesudah katup masuk turbin (h_1) dengan entalpi keluar turbin aktual (h_2').
- Kerugian kerugian yang terjadi didalam turbin terdiri dari:
 - a) Kerugian karena throttling (penyempitan pada katup uap masuk turbin). Penyempitan katup menyebabkan tekanan sesudah katup menjadi lebih rendah dari sebelumnya (p_0 menjadi p_2). Besarnya kerugian disini digambarkan sebagai selisih entalpi ΔH .
 - b) Kerugian didalam nozzle atau sudu tetap .Pancaran uap keluar nozzle atau sudu tetap akan bergesekan dengan dinding nozzle atau sudu tetap tersebut, sehingga akan mengurangi dorongan uap terhadap sudu jalan. Kerugian ini digambarkan sebagai k_1 .

menghambat jalannya uap keluar nozzle. Kerugian ini digambarkan sebagai k_4

- f) Kerugian karena kebasahan uap. Butir butir air yang timbul akibat kondisi uap yang masuk daerah jenuh (saturated) akan menghambat aliran uap. Air yang mempunyai massa lebih tinggi dari uap bergerak lebih lambat, karenanya ia menjadi hambatan bagi jalannya uap. Kerugian ini belum digambarkan, dan bisa ditambahkan sebagai k_5 .
- g) Kerugian karena kecepatan uap meninggalkan sudu terakhir. Uap masih mempunyai kecepatan ketika meninggalkan sudu terakhir, yang berarti memiliki energi yang tidak bisa dirubah menjadi energi mekanik. Kerugian ini juga belum digambarkan, dan bisa ditambahkan sebagai k_6 .

Contoh soal

Jika besarnya aliran uap adalah 300 ton /jam, entalpi uap masuk turbin 800.kkal / kg dan entalpi uap keluar turbin adalah 200 kkal / kg maka besarnya daya turbin ideal adalah:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{G_u(h_0 - h_{2i})}{860} \\
 &= \frac{300000kg(800-200)kkal}{860kkal/kwh} \\
 &= 209302 \text{ kwh/jam} = 209,302\text{Mw}
 \end{aligned}$$

Jika jumlah kerugian didalam turbin mencapai 200 kkal /kg, maka besarnya daya turbin yang bisa dibangkitkan menjadi:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{G_u(h_0 - h_{2i}) - \sum k}{860} \\
 &= \frac{300000kg(800-200)kkal-200kkal}{860kkal/kwh} \\
 &= 139535 \text{ kwh/jam} = 139,535\text{Mw}
 \end{aligned}$$

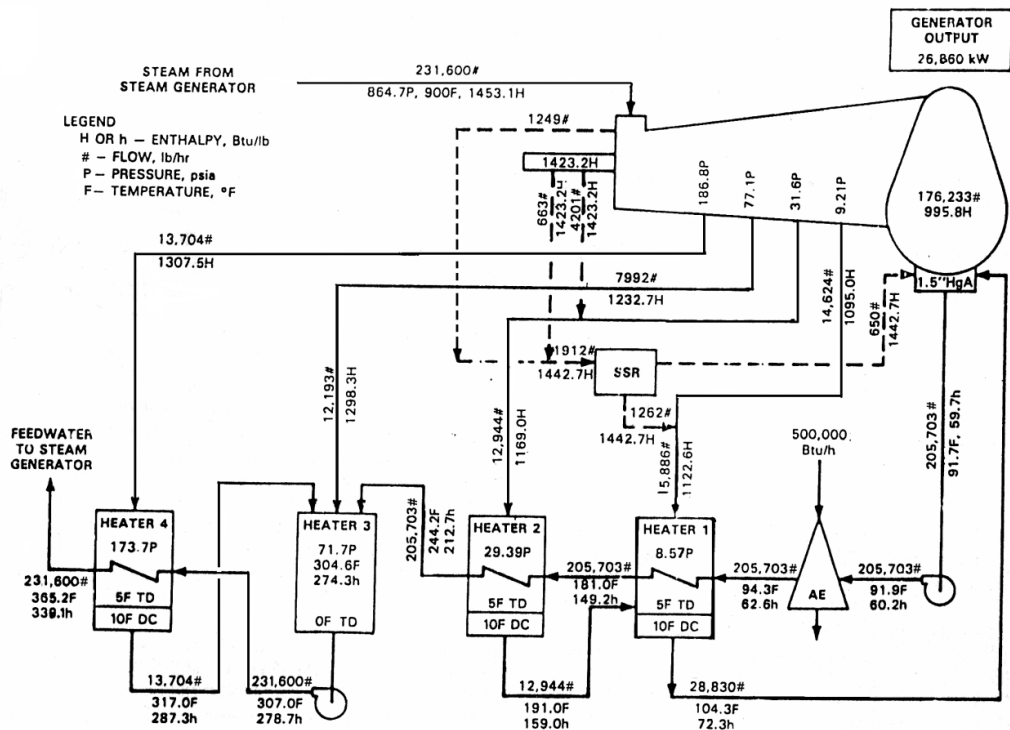
3.5.3 Konsumsi Kalor Turbin (Turbine Heat Rate).

Uap dari boiler masuk kedalam turbin dengan tekanan dan suhu tertentu. Dengan tekanan dan suhu tsb berarti uap mengandung sejumlah nilai kalor tertentu yang dikenal dengan sebutan entalpi. Penggunaan jumlah kalor didalam turbin dibanding dengan besarnya output yang dihasilkan disebut sebagai Turbin Heat Rate. Pada PLTU pengukuran besarnya turbin heat rate dihitung bukan dari ouput pada poros turbin tetapi dihitung dari output generator. Pada turbin turbin besar pembangkit listrik juga dilengkapi dengan saluran saluran pengambilan uap dari dalam turbin untuk keperluan pemanasan air pengisi boiler. Karena itu besarnya turbine heat rate dihitung berdasarkan jumlah kalor bersih yang digunakan didalam turbin dibagi dengan jumlah kwh yang dibangkitkan dari generator listriknya.

Gambar 3.18 menunjukkan neraca kalor (heat balans) dari sebuah PLTU dengan daya mampu (Output) Generator 26860 kw Jika berat uap masuk kedalam turbin perjam diberi simbol G_u dengan entalpi h_u dan berat air pengisi boiler G_{ap} dengan entalpi h_{ap} maka besarnya Turbine Heat Rate adalah:

$$\begin{aligned} \text{Turbine Heat Rate} &= \frac{G_u h_u - G_{ap} h_{ap}}{\text{kwh dibangkitkan}} \\ &= \frac{231\,600 \times 1453,1 - 231\,600 \times 339,1}{26860} \\ &= 9605 \text{ Btu/kwh} \end{aligned}$$

Turbine Heat Rate tsb diatas juga disebut dengan Turbin Gross Heat Rate karena belum dikurangi dengan listrik untuk pemakaian sendiri didalam PLTU, dan disebut sebagai Turbin Nett Heat Rate jika dihitung dengan menyertakan pengurangan dari pemakaian sendiri didalam pembangkit ybs.



Gambar 3. 19 Neraca kalor turbin

3.5.4 Kelengkapan Turbin.

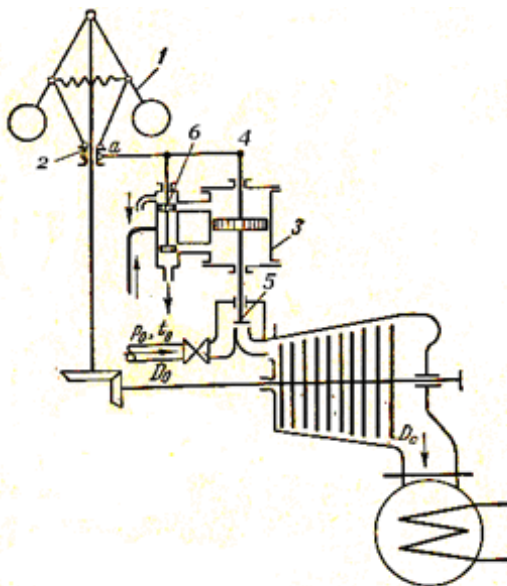
Disamping bagian utama yang sudah disebutkan diatas, turbin dilengkapi dengan bagian bagian lain untuk memungkinkan turbin dapat beroperasi dengan lancar, aman dan otomatis. Bagian bagian tersebut dapat dikelompokkan kedalam sistem sistem yaitu:

- Sistem pelumasan.
- Sistem perapat poros.
- Sistem pengatur putaran.
- Sistem pengambilan uap (extraction)
- Sistem pengaman.

Sistem pelumasan turbin berfungsi untuk melumasi dan mendinginkan bantalan karena panas yang timbul akibat gesekan yang terjadi dengan poros. Karena itu sistem pelumasan harus bisa mengalir dengan kontinue, bersih dengan

suhu yang relative rendah. Untuk itu sistem pelumas terdiri dari. Pompa Utama, Pompa Pembantu, Pompa Darurat, Pendingin, Saringan dan Perawat Pelumas.

Sistem perapat poros berguna untuk mencegah keluarnya uap dari celah antara poros dan casing pada sisi turbin tekanan tinggi dan mencegah masuknya udara kedalam turbin pada sisi turbin tekanan rendah. Perapatan poros menggunakan uap yang telah diturunkan suhu dan tekanannya disesuaikan dengan suhu dan tekanan pada sisi turbin ybs. Uap tersebut dihisap masuk dan diembunkan didalam condenser perapat poros.



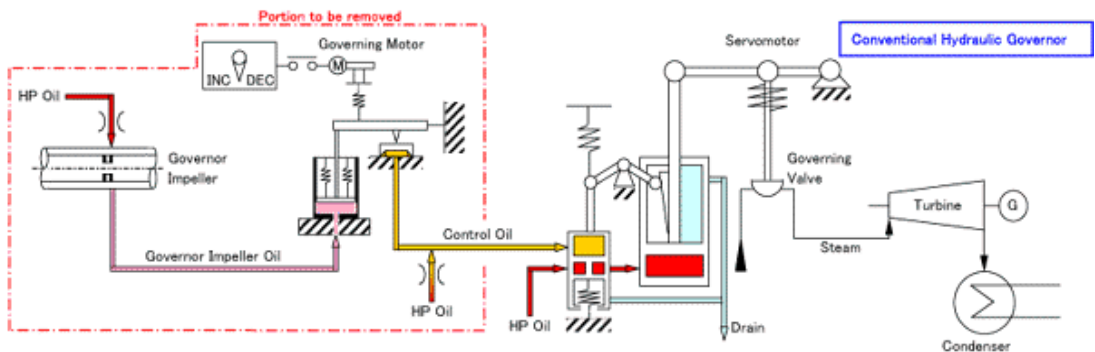
Gambar 3. 20 Sistim Governor Turbin

Sistem pengatur putaran turbin atau juga lebih dikenal dengan sebutan “Governor” berguna untuk mempertahankan putaran turbin pada level yang sudah ditentukan. Sistem pengaturan putaran ini akan menambah jumlah aliran uap ketika beban turbin bertambah dan akan mengurangi jumlah uap yang mengalir jika beban turbin mengalami penurunan. Ada tiga jenis governor yaitu jenis mekani, jenis hidrolis dan jenis elektrik. Gambar 3.19 adalah sebuah bentuk governor mekanik. Jika putaran mengalami penurunan akibat beban naik

maka bandul 1 akan tertarik kedalam, slipper 2 dan pilot 6 bergerak turun, minyak tekanan tinggi masuk kebawah piston pada silinder 3, dan piston bergerak keatas memperbesar pembukaan katup uap dan menambah jumlah aliran uap. Dengan demikian putaran turbin tidak berlanjut turun. Demikian sebaliknya jika putaran

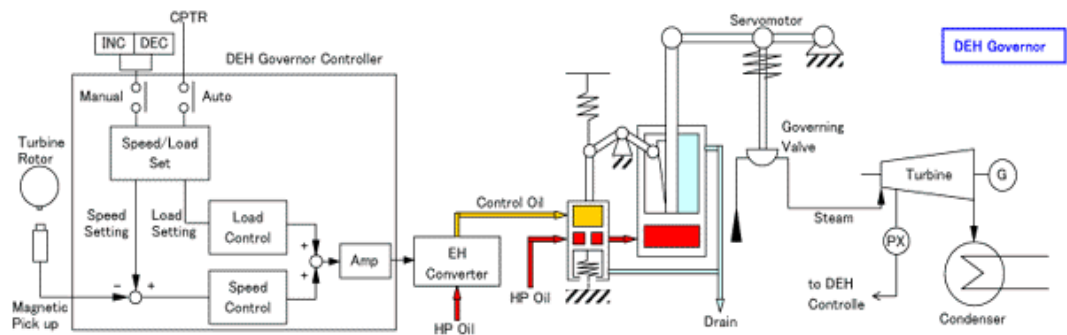
turbin mengalami kenaikan akibat berkurangnya beban. Governor mempunyai karakteristik tertentu yang dikenal dengan sebutan speed droop yaitu berubahnya putaran turbin dibanding putaran nominal pada perubahan beban 100%.

Dengan bertambah majunya teknologie, governor mekanik seperti diatas telah digantikan dengan sistem hidrolik (Gambar 3.22), dimana fungsi bandul digantikan dengan impeller pompa. Pada governor hidrolik, bertambahnya putaran poros akan mengakibatkan bertambah besarnya tekanan hidrolik keluar impeller, demikian sebaliknya jika putaran poros menurun maka akan menurunkan tekanan hidrolik keluar impeller.



Gambar 3. 22 Sistem governor hidrolik

Kini sistem governor hidrolik juga sudah mulai ditinggalkan, digantikan dengan sistem electro hidrolik (Gambar 3.23), dimana untuk bagian listriknya merupakan rangkaian elektronik. Bandul pada sistem governor mekanik atau impeller pada sistem governor hidrolik digantikan dengan speed picked up, dimana speed picked up ini akan memberikan sinyal listrik kepada sistem kontrol putaran turbin (governor controller).



Gambar 3. 23 Sistem governor Electro Hidrolik

Output dari governor controller merupakan sinyal listrik yang kemudian dirubah menjadi sinyal hidrolik oleh E/H converter. Sinyal hidrolik kemudian diteruskan untuk membuka atau menutup aliran uap masuk turbin.

Sistem pengambilan uap dari turbin dilakukan sedemikian rupa ditempat mana uap dianggap telah mengalami saturated (jenuh) ketika berhubungan dengan casing turbin. Uap ini harus dikeluarkan untuk menghindari timbulnya butir butir air akibat pengembunan yang terjadi. Pengeluaran uap ini dimanfaatkan untuk memanaskan air yang mau masuk keboiler. Dengan demikian suhu air masuk keboiler menjadi lebih tinggi sehingga dapat memperkecil penggunaan bahan bakarnya. Sistem pengambilan uap dilengkapi dengan katup otomatis penutup cepat untuk menghindari membaliknya aliran kedalam turbin ketika turbin berhenti seketika (trip).

Sistem pengaman turbin berguna untuk mengamankan turbin dari kerusakan berat akibat tidak berfungsinya kelengkapan turbin. Sistem pengaman turbin terdiri dari:

- Pengaman tekanan pelumas rendah, untuk menghinadari rusaknya bantalan akibat gesekan kering oleh karena tidak adanya pelumasan.
- Pengaman suhu bantalan tinggi. Gesekan yang terjadi pada bantalan akan mengakibatkan suhu yang tinggi, dan suhu yang tinggi akan melumerkan

metal bantalan, karena itu kenaikan suhu harus dicegah sebelum metal bantalan menjadi rusak dengan memberhentikan turbin seketika.

- Pengaman gaya axial tinggi. Dorongan uap kesudu jalan akan mengakibatkan timbulnya gaya axial pada poros. Dari sisi desain gaya axial ini sudah dieliminasi / dihilangkan, namun dengan perjalanan waktu bisa timbul gaya axial yang besar yang bisa menjadikan sudu sudu turbin bergesekan.
- Pengaman getaran tinggi. Walaupun pembuatan rotor telah dilakukan secara teliti, namun pada tahap akhirnya tetap ditemukan adanya ketidak samaan berat antara satu sisi dengan sisi yang lain (arah radial) pada rotor. Ketidak samaan berat ini disebut sebagai unbalans (tidak seimbang). Pada rotor baru unbalans ini telah dibuat menjadi balans (seimbang), yang menghasilkan getaran yang kecil. Seiring dengan perjalanan waktu getaran turbin bisa menjadi besar dan melampaui batas yang ditentukan, karena itu turbin harus diberhentikan untuk menghindari kerusakan lebih lanjut.
- Pengaman perbedaan pemuaian rotor dan stator tinggi. Pada waktu start pemuaian rotor akan lebih cepat daripada statornya, karena itu start turbin harus dilakukan dengan cermat dan hati hati agar pemuaian rotor terhadap stator masih dalam batas yang ditentukan. Jika pemuaian rotor menjadi diluar batas maka turbin harus diberhentikan seketika guna menghindari terjadinya gesekan antara rotor dan stator arah axial.
- Pengaman putaran lebih. Gagalnya sistem pengatur putaran turbin dapat berakibat naiknya putaran turbin. Naiknya putaran turbin menyebabkan naiknya gaya centrifugal yang besarnya kuadratis terhadap putaran. Karena itu kenaikan putaran harus dibatasi guna menghindari timbulnya kerusakan.
- Pengaman tekanan keluar turbin tinggi. Naiknya tekanan keluar turbin atau turunnya vacuum, berakibat pada timbulnya butir butir air pada tingkat terakhir urbin. Butir butir air ini akan menempel pada sudu sudu jalan dan dapat mengakibatkan unbalance yang berujung pada naiknya getaran, disamping timbulnya erosi.

Disamping itu turbin juga dilengkapi dengan tombol darurat untuk memberhentikan turbin dengan seketika jika diketahui terdapat hal hal yang membahayakan bagi berlangsungnya operasi.

3.6 KONDENSOR.

Fungsi kondensor adalah untuk mengembunkan uap bekas yang keluar dari turbin tekanan rendah. Pengembunan uap keluar turbin diusahakan pada tekanan yang serendah rendahnya agar turunnya entalpi uap didalam turbin menjadi tinggi. Semakin tinggi penurunan entalpi uap maka semakin besar daya turbin yang bisa dibangkitkan. Untuk menghindari kerugian, maka kondensor dipasang sedekat mungkin dengan sisi keluar turbin, karena itu umumnya kondensor dipasang tepat dibawah turbin tekanan rendah (Gambar 3.24). Tergantung dari suhu air pendingin yang ada, kondensor direncanakan untuk mampu membentuk tekanan rendah antara 0,03 sampai dengan 0,10 bar absolute.

3.6.1 Klasifikasi Kondensor

Dari segi konstruksinya, kondensor dapat dibedakan antara kondensor kontak (Contact Condensor) dan kondensor permukaan (Surface Condensor). Pada Kondensor Kontak, air pendingin dipancarkan langsung pada saluran uap bekas keluar turbin, dan air pendingin bercampur dengan air kondensat yang terjadi. Kondensor semacam ini dipakai apabila air kondensat tidak digunakan lagi didalam sistem sirkulasi air uap, seperti halnya yang terjadi didalam Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi.

Pada Kondensor Permukaan, air pendingin terpisah dengan uap bekas maupun air kondensat yang terjadi. Air pendingin mengalir didalam pipa-pipa yang biasa disebut pipa kondensor, sedang uap bekas / air kondensat berada diluar pipa. Besarnya kalor dari uap bekas yang harus dibuang pada tekanan yang serendah-rendahnya menyebabkan diperlukannya luas bidang kontak (antara permukaan air pendingin disatu sisi dan permukaan uap dilain sisi) yang besar. Untuk memenuhi

hal tersebut disusun ratusan bahkan ribuan pipa kondensor tergantung dari besarnya jumlah uap bekas yang akan diembunkan.

Dari segi arah alirannya dibedakan antara kondensor dengan arah aliran tunggal (single flow) dan kondensor dengan arah aliran ganda (double flow) atau lebih, dan dari segi material pipa kondensor yang digunakan dibedakan antara pipa kondensor dengan bahan dasar tembaga, bahan dasar nickel dan bahan titanium.

3.6.2 Kelengkapan Kondensor.

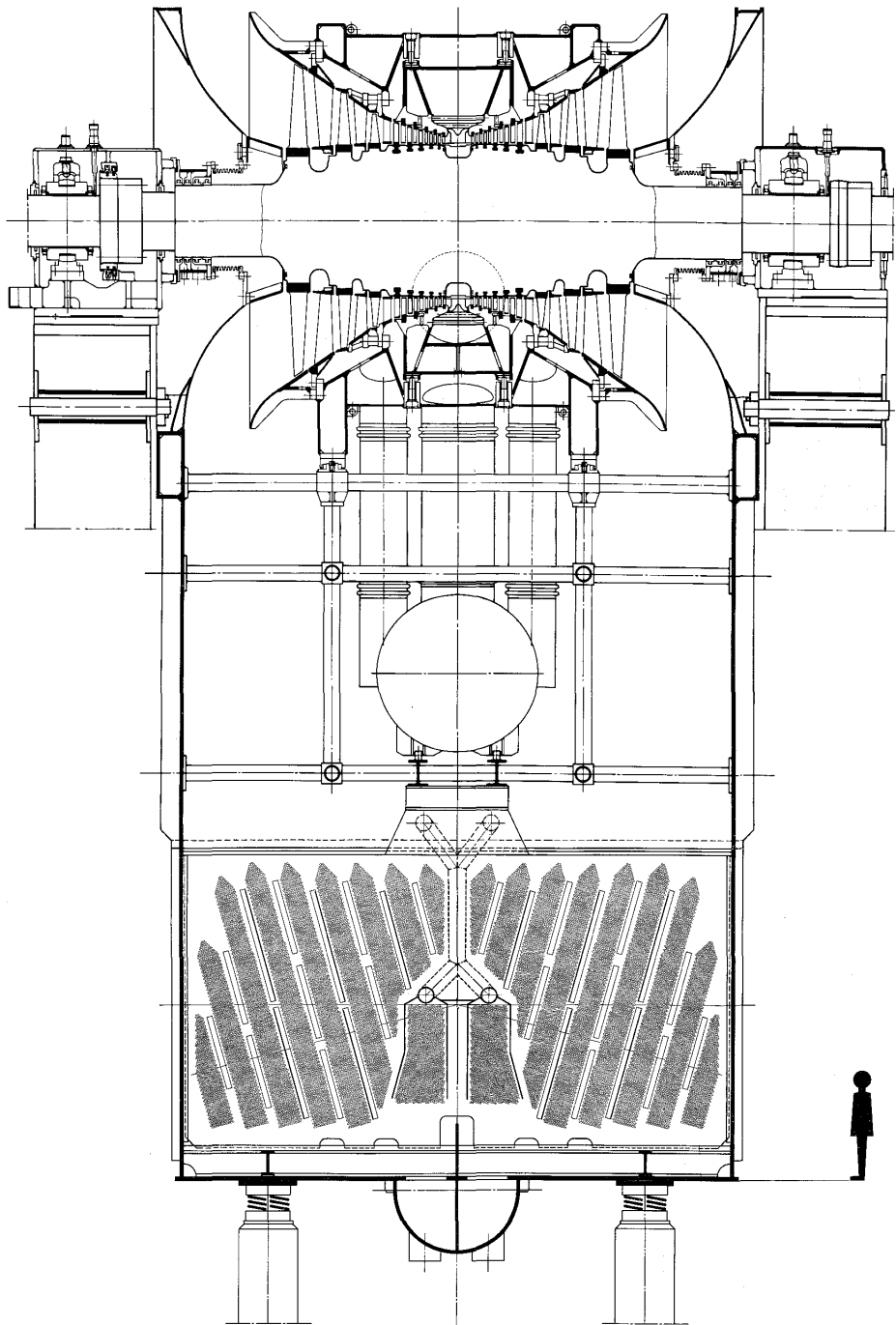
Disamping konstruksi yang sudah disebutkan diatas, kondensor dilengkapi dengan bagian bagian lain untuk memungkinkan terjadinya proses pengembunan uap berjalan dengan baik sehingga dapat menghasilkan tekanan didalam ruang uap yang serendah rendahnya. Kelengkapan kondensor terdiri dari sistem air pendingin, sistem pembuang udara dan sistem pembersih pipa.

Sistem air pendingin.

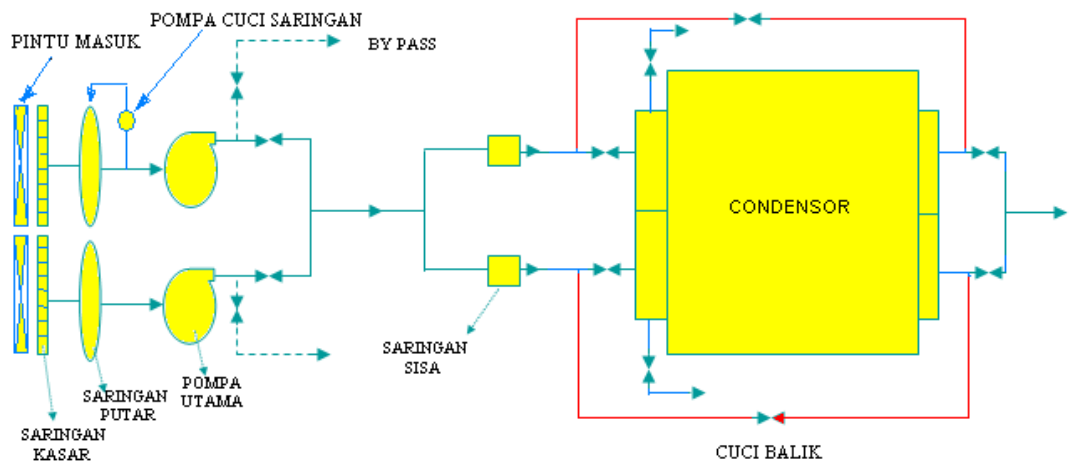
Sistem air pendingin kondensor adalah suatu instalasi yang digunakan untuk mengalirkan air pendingin kedalam kondensor. Air pendingin yang dialirkan masuk kedalam kondensor jumlahnya sangat besar, diperoleh dari air laut, air danau, air sungai atau dari menara pendingin. Air tersebut harus dialirkan kedalam kondensor dalam keadaan bersih bebas dari sampah. Untuk mencapai tujuan tersebut sistem pengaliran air pendingin (selanjutnya disebut sebagai Sistem Air Pendingin Utama) dilengkapi dengan Pintu Air, Saringan Kasar, Saringan Putar, Pompa Pencuci Saringan, Pompa Air Pendingin Utama, Saringan Sampah Sisa, Instalasi Cuci Balik Kondensor, dan beberapa katup. Gambar 3.23 menunjukkan susunan peralatan tersebut dengan penjelasan sebagai berikut:

- Pintu air masuk digunakan sewaktu waktu jika diperlukan perbaikan atau pembersihan phisik pada bagian bagian sistem air pendingin yang sudah disebutkan diatas.

- Saringan kasar digunakan untuk menyaring sampah sampah besar dan berat. Terdiri dari pelat pelat strip yang disusun dibelakang pintu air. Saringan kasar ini juga dilengkapi dengan penggaruk sampah, untuk mengambil sampah yang tertahan dan membuangnya ketempat penampungan sementara. Selanjutnya dengan truk sampah tersebut diangkut ketempat pembuangan akhir.
- Saringan putar digunakan untuk menyaring sampah / kotoran yang lolos dari saringan kasar. Saringan ini berputar secara kontinue jika jumlah sampah yang ikut aliran air pendingin berjumlah banyak, dan berputar sewaktu waktu jika jumlah sampahnya sedikit. Untuk membuang sampah yang menempel pada saringan digunakan semprotan air yang diberikan oleh pompa pencuci saringan.
- Pompa Air Pendingin Utama, adalah pompa air dengan kapasitas besar untuk menghisap dan mendorong air pendingin masuk kedalam kondensor. Pompa ini dilengkapi dengan katup penutup aliran guna mengatur aliran air pendingin secara bertahap ketika pompa distart.
- Saringan sampah sisa (Debris Filter) digunakan untuk menangkap sampah yang lolos dari Saringan Putar.



Gambar 3. 24 Susunan turbin tekanan rendah dan kondensor



Gambar 3. 25 Sistem air pendingin kondensor

- Instalasi Cuci Balik digunakan untuk membuang sampah yang tertahan pada mulut kondensor. Instalasi ini biasanya tidak dipasang jika instalasinya dilengkapi dengan debris filter tsb diatas.

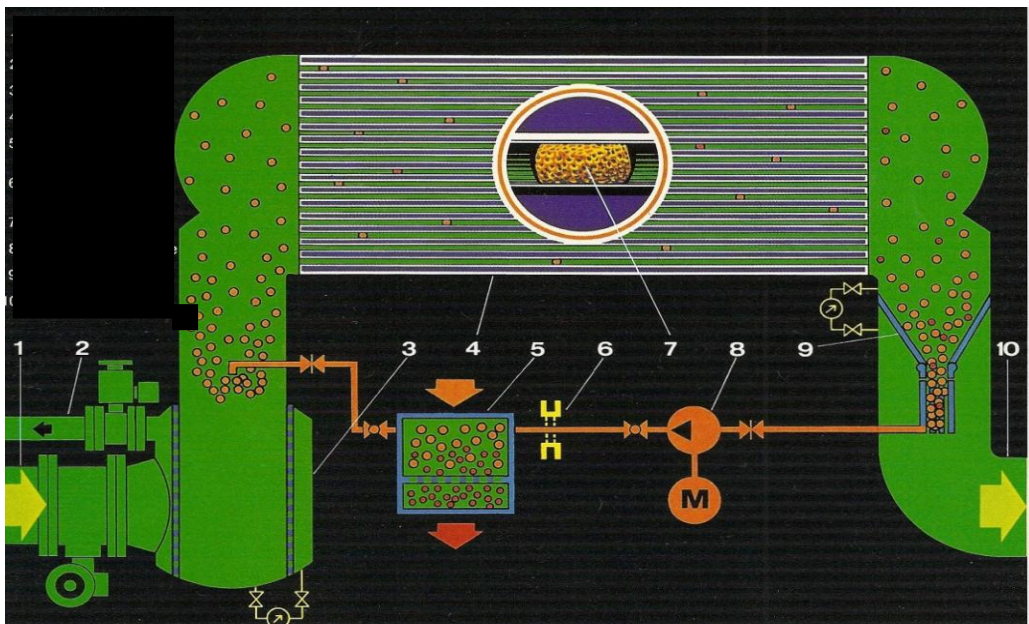
Sistem pembersih pipa kondensor

Instalasi pembersih pipa kondensor. Aliran air pendingin dengan jumlah yang sangat besar juga akan mengandung kotoran halus seperti lumpur yang tidak mungkin disaring oleh saringan saringan tersebut yang sudah dibahas diatas. Kotoran kotoran ini akan menempel pada dinding pipa kondensor (pada kondensor permukaan) dan akan menghambat jalannya perpindahan panas. Karena itu kotoran yang menempel ini harus secara periodic atau secara kontinue dibersihkan. Gambar 3.26 menunjukkan sebuah instalasi pembersih pipa kondensor yang bisa beroperasi secara kontinue atau sewaktu waktu sehingga kebersihan pipa kondensor dapat dipertahankan. Instalasi pembersih ini dikenal sebagai instalasi Tapproge. Adapun cara kerjanya adalah sebagai berikut:

Bola dimasukkan kedalam Tangki Bola 5 dan ditutup rapat, Penangkap bola 9 ditutup, dan Pompa 8 dijalankan. Bola 7 akan bergerak masuk kedalam aliran air

pendingin dan masuk kedalam pipa kondensor. Bola yang bersifat elastis dan dengan ukuran sedikit lebih besar dari diameter pipa kondensor serta mempunyai permukaan yang kasar akan menyikat permukaan pipa dan dengan demikian lumpur atau kotoran lain akan terkikis dan terdorong menuju sisi keluar pipa.

Keluar dari pipa bola masuk kedalam Penangkap 9 dan seterusnya masuk kedalam Pompa 8 dan kembali didorong menuju sisi masuk kondensor lagi. Demikian seterusnya sampai pipa kondensor dinyatakan bersih. Jika proses pembersihan sudah dinyatakan cukup, pergerakan bola dihentikan / ditahan pada Tangki Bola 5 dan Pompa 8 di stop, Penangkap Bola 5 dibuka dan bola 7 dikeluarkan. Gerakan bola selama bersirkulasi dapat dilihat pada Kaca monitor 6.

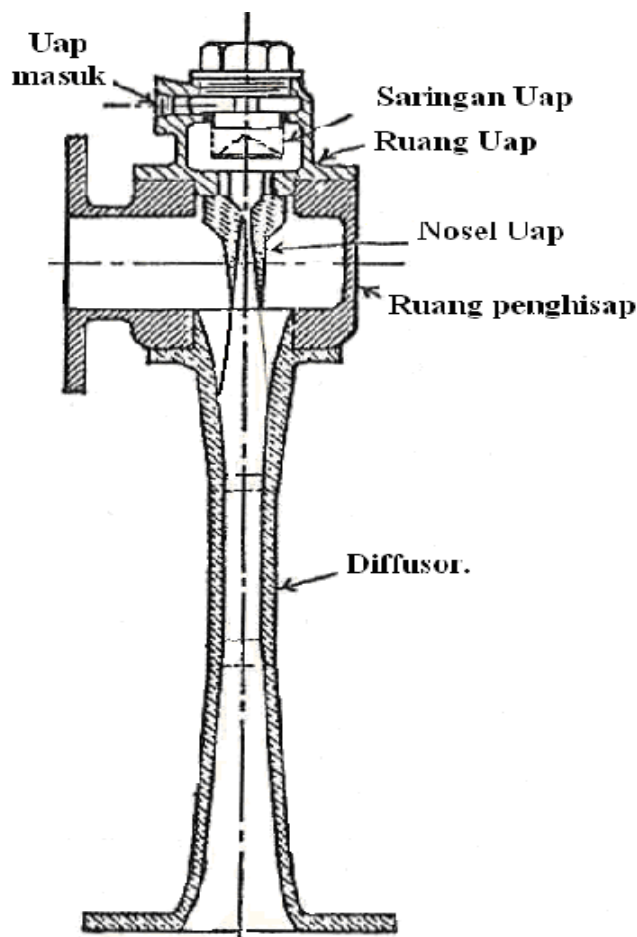


Gambar 3. 26 Sistem pembersih pipa kondensor

- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1. Air pendingin masuk. | 6. Kaca monitor |
| 2. Saluran pembuangan sampah. | 7. Tampang bola pembersih |
| 3. Saringan sampah sisa. | 8. Pompa pelempar bola. |
| 4. Kondensor. | 9. Penangkap bola. |
| 5. Tangki bola pembersih | 10 Air pendingin keluar |

Sistem penghisap udara

Tekanan rendah dibawah tekanan atmosfer didalam ruang uap kondensor memungkinkan udara masuk kedalamnya, dan akan menjadi penghambat perpindahan panas. Karena itu udara atau gas lain yang tidak bisa mengembun harus dikeluarkan. Pengeluaran udara dilakukan dengan menggunakan ejector uap atau pompa hampa. Gambar 3.27 menunjukkan sebuah ejector uap, dimana uap dengan tekanan dan suhu tertentu masuk kedalam ruang uap kemudian berexpansi didalam nozel sehingga menghasilkan kecepatan yang tinggi.



Gambar 3. 27 Ejector

Kecepatan uap yang tinggi tersebut menimbulkan tekanan yang rendah pada ruang penghisap dan karenanya udara tersedot kedalamnya serta terdorong masuk kedalam ruang diffuser terus keluar keujung bawah ejector.

3.6.3 Jalannya proses perpindahan panas.

Pada kondensor kontak air pendingin akan bercampur dengan air kondensat hasil pengembunan uap keluar turbin. Besarnya suhu dan entalpi air kondensat dan suhu air pendingin setelah proses pendinginan menjadi sama besar, karena itu berlaku persamaan sbb:

$$G_u \times (h_u - h_{camp}) = G_{ap}(h_{ap} - h_{camp})$$

$$h_{camp} = \frac{G_u \times h_u + G_{ap} \times h_{ap}}{G_u + G_{ap}}$$

dimana:

G_u = Jumlah berat aliran uap masuk kondensor kg / jam

h_u = Entalpi uap masuk kondensor kkal / kg.

h_{camp} = Entalpi campuran air kondensat dan air pendingin kkal / kg.

G_{ap} = Jumlah berat aliran air pendingin masuk kondensor kg / jam.

h_{ap} = Entalpi air pendingin masuk kondensor kkal / kg.

Untuk entalpi uap dapat dicari dari tabel uap atau dari diagram $h - s$, sedang untuk entalpi air dapat dicari juga dari tabel air dan uap atau merupakan hasil kali dari panas jenis air dengan suhu terkait.

Pada kondensor permukaan air pendingin tidak bercampur dengan air kondensat hasil pengembunan uap keluar turbin. Pada kondensor jenis ini diperlukan luas bidang pemanas yang besar, untuk mendapatkan tekanan ruang uap dan suhu air kondensat yang rendah. Disini berlaku persamaan sbb

$$G_u \times (h_u - h_{cond}) = G_{ap}(h_{out} - h_{in}) = kF\Delta t_r$$

dimana:

h_{cond} = entalpi air kondensat kkal / kg.

h_{out} = entalpi air pendingin keluar kondensor kkal / kg.

k = koefisien perpindahan panas dari uap ke air pendingin melalui dinding

pipa kondensor berkisar antara 3000 – 5000 kkal / m² jam °C

F = Luas permukaan bidang pendingin m².

Δt_r = perbedaan suhu logaritmik rata rata antara uap dan air pendingin.

$$= \frac{t_{out} - t_{in}}{2,3 \ln \frac{t_s - t_{in}}{t_s - t_{out}}}$$

t_s = suhu uap dalam ruang uap kondensor °C

Contoh soal

1. Kondensor kontak dengan tekanan pada sisi uap = 0,06 kg / cm², aliran uap 200 ton / jam, suhu air pendingin masuk = 30°C. Berapa jumlah air pendingin harus dialirkan?

Jawaban:

Dari tabel uap jenuh, untuk tekanan 0,06 kg / cm², didapat entalpi uap jenuh = 613 kkal / kg; suhu jenuh atau = suhu air kondensat = 36°C.

Panas jenis air adalah = 1 kkal / kg°C, maka besarnya h_{camp} = 36 kkal / kg.

$$\text{Dari persamaan } h_{camp} = \frac{G_u \times h_u + G_{ap} \times h_{ap}}{G_u + G_{ap}} \rightarrow 36 = \frac{200000 \times 613 + G_{ap} \times 30}{200000 + G_{ap}}$$

$$G_{ap} = 19233333 \text{ kg/jam} = 19233,333 \text{ m}^3/\text{jam}$$

2. Kondensor permukaan dengan suhu air kondensat 40°C, aliran uap masuk kondensor 200 ton / jam, suhu air pendingin masuk 30°C, keluar 36°C.
 - a) Berapa jumlah air pendingin diperlukan?
 - b) Berapa luas bidang pemanas diperlukan jika koefisien perpindahan panas pipa kondensor $k = 4000 \text{ kkal / m}^2 \text{ jam}^\circ\text{C}$.

- c) Jika panjang pipa kondensor 5 meter dan diameter pipa 25 cm berapa jumlah pipa diperlukan?

Jawaban:

- a. Dari tabel uap jenuh didapat entalpi uap jenuh $h_u = 614,7$ kkal, tekanan jenuh $= 0,075$ kg / cm^2 .

Dari persamaan $G_u \times (h_u - h_{cond}) = G_{ap}(h_{out} - h_{in})$, maka besarnya air pendingin diperlukan:

$$\begin{aligned} G_{ap} &= \frac{G_u \times (h_u - h_{cond})}{(h_{out} - h_{in})} \\ &= \frac{200000 \times (614,7 - 40)}{(36 - 30)} \\ &= 19156666 \text{ kg / jam} = 19156,666 \text{ m}^3 / \text{jam}. \end{aligned}$$

- b. Perbedaan suhu logaritmik rata rata antara uap dan air pendingin.

$$\begin{aligned} \Delta t_r &= \frac{t_{out} - t_{in}}{2,3 \ln \frac{t_s - t_{in}}{t_s - t_{out}}} \\ &= \frac{36 - 30}{2,3 \ln \frac{40 - 30}{40 - 36}} \\ &= 2,85^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Luas bidang pemanas

$$\begin{aligned} F &= \frac{G_u (h_u - h_{cond})}{k \Delta t_r} \\ &= \frac{200000 (614,7 - 40)}{4000 \times 2,85} \\ &= 10082 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- c. Luas bidang pemanas untuk satu buah pipa kondensor adalah:

$$f = \pi d l = 3,14 \times 0,254 \times 5 = 3,9878 \text{ m}^2$$

Jumlah pipa diperlukan:

$$n = \frac{F}{f} = \frac{10082}{3,9878} = 2528 \text{ buah.}$$

3.7 PEMANAS AIR PENGISI BOILER

Ada dua tujuan penggunaan Pemanas Air Pengisi Boiler yaitu:

1. Untuk meningkatkan efisiensi siklus air – uap.
2. Untuk menghindari kejutan panas (thermal shock) dari bagian bagian boiler.

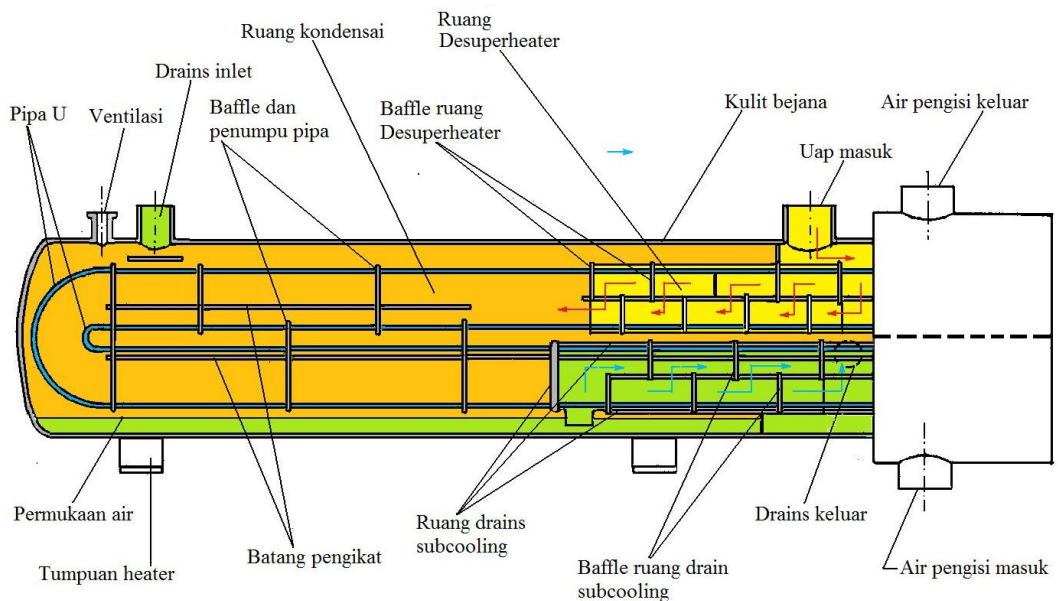
Pemanas Air Pengisi Boiler terdiri dari tiga jenis yaitu Pemanas Tekanan Rendah, Deareator dan Pemanas Tekanan tinggi. Untuk Pemanas Tekanan Rendah dan Pemanas Tekanan Tinggi biasanya terdiri dari satu, dua atau tiga buah, tergantung dari besar kecilnya PLTU, sedang untuk Deareator hanya terdiri dari satu buah. Masing masing pemanas menggunakan uap extraction dari turbin sebagai media pemanasnya. Uap extraction dari bagian turbin tekanan tinggi untuk Pemanas Tekanan Tinggi dan seterusnya uap extraction dari bagian turbin tekanan rendah untuk Pemanas Tekanan Rendah. Disebut sebagai Pemanas Tekanan Rendah bila ia ditempatkan sebelum Deareator dan disebut Pemanas Tekanan Tinggi bila ia ditempatkan sesudah Pompa Air Pengisi Boiler sebelum economizer.

Konstruksi Pemanas Tekanan Tinggi terdiri dari pipa pipa baja karbon atau stainless steel berbentuk U yang ujungnya diroll dan dilas pada tube sheet. Air mengalir didalam pipa sedang uapnya mengalir pada bagian luar pipa didalam tangki. Umumnya Pemanas Tekanan Tinggi diletakkan mendatar atau berdiri tegak. Sesuai dengan kondisi uap yang digunakan, maka Pemanas Tekanan Tinggi terbagi menjadi tiga zona (Gambar 3.28) yaitu:

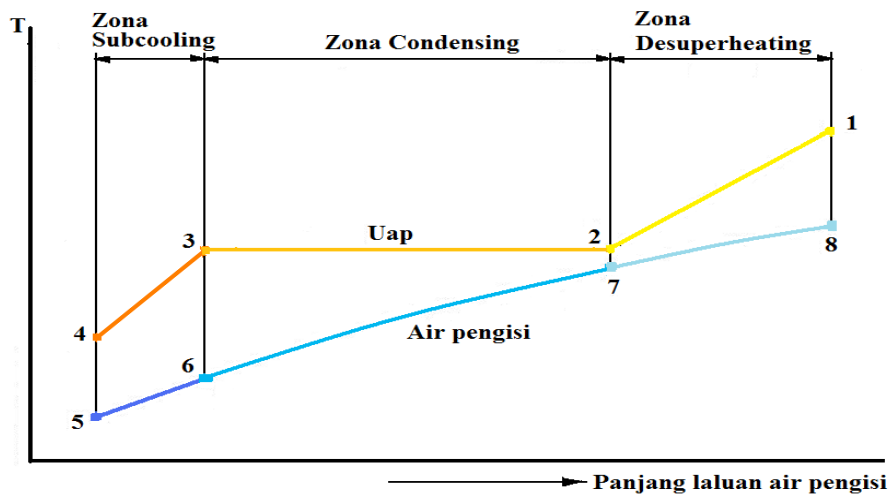
Zona Desuperheater yaitu zona dimana uap panas lanjut mengalami penurunan suhu menuju kondisi jenuh. Disini diusahakan agar seluruh bagian uap dapat bersinggungan dengan sisi keluar pipa pipa yang dilalui air pengisi boiler. Karena itu didalam zona ini uap dialirkan dengan berbelok belok memotong arah pipa.

Zona kondensasi, yaitu zona dimana uap jenuh mengalami pengembunan. Oleh karena panas yang dapat diserap disini adalah yang terbesar dengan suhu yang konstan maka diperlukan ruangan yang besar dibanding zona desuperheater.

Zona Subcooling yaitu bagian dimana air kondensat mengalami penurunan suhu. Seperti halnya zona desuperheater, disini juga diusahakan agar semua bagian air kondensat dapat bersinggungan dengan sisi masuk pipa pipa yang dilalui air pengisi.



Gambar 3. 28 Pemanas Air Pengisi Tekanan Tinggi

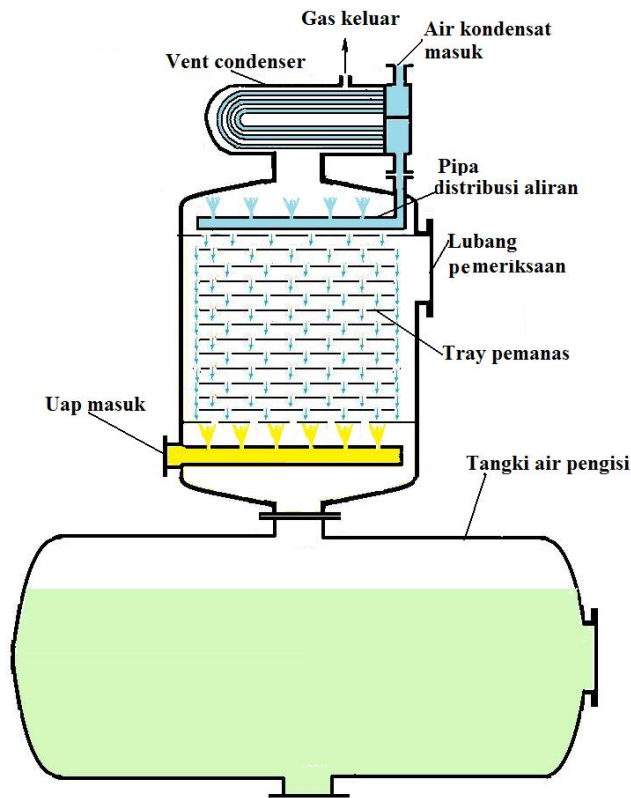


Gambar 3. 29 Diagram suhu – panjang laluan Pemanas Air Pengisi Boiler

Pemanas Tekanan Rendah mempunyai konstruksi yang sama dengan Pemanas Tekanan Tinggi, dengan perbedaan ukuran sesuai perbedaan tekanannya. Perbedaan lain adalah konstruksinya lebih sederhana antara lain pipa pipa airnya terbuat dari pipa lurus bukan pipa U.

Deareator disamping berfungsi sbagai pemanas, juga terutama berfungsi untuk membuang udara / gas yang larut didalam air. Air dipecah pecah menjadi butir butir kecil dan dipanaskan dengan uap dari extraction turbin. Pemanasan dilakukan sampai mencapai titik didihnya sehingga bagian gasnya terlepas dan terdorong keluar dibagian atas tangki deareator. Sejalan dengan proses pemecahan air tersebut, deareator dibedakan antara deareator type tray dan deareator type jet.

Dengan deareator type tray (Gambar. 3.30) dimaksudkan bahwa air kondensat dijatuhkan dari atas ke kisi kisi (tray) pertama. Pada kisi kisi pertama tersebut air akan tersebar kekiri kekanan, kedepan dan kebelakang dan jatuh ke tray kedua. Demikian seterusnya berlangsung sampai tray yang terakhir. Uap dialirkan dari bawah dan memo-tong jatuhnya air dari setiap tray. Air kondensat yang telah dipanaskan dan terbuang gasnya ditampung didalam tangki air pengisi untuk selanjutnya dipompakan kedalam boiler.



Gambar 3. 30 Deareator type tray

Dengan deareator nozzle, air kondensat dipancarkan dengan nozzle membentur dinding tangki deareator sebelah atas dan memantul dalam bentuk hujan / butir butir kecil. Uap juga dipancarkan sehingga menyebar, memotong dan memanaskan butir butir air kondensat tsb.

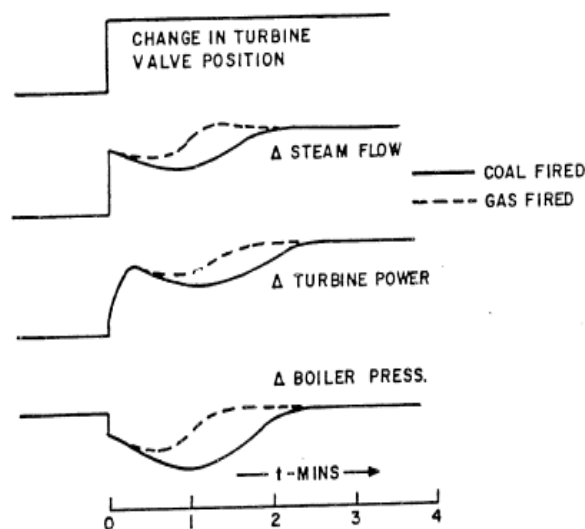
Dalam hal pencegahan korosi didalam boiler, injeksi hydrazine kedalam air kondensat dilakukan sebelum air kondensat masuk kedalam vent cooler, dan gas yang dibuang menjadi berupa gas nitrogen hasil reaksi dari oksigen dan hydrazene. Gas lainnya yang juga terlepas dari air kondensat keluar bersama sama melalui saluran ventilasi pada vent cooler.

3.8 SISTEM KONTROL PLTU

Bertambahnya beban listrik, harus diimbangi dengan bertambahnya aliran uap masuk keturbin, dan bertambahnya aliran uap masuk keturbin juga harus

diimbangi dengan bertambahnya aliran air pengisi boiler, aliran bahan bakar, dan aliran udara pembakaran. Demikian pula sebaliknya berkurangnya beban listrik harus diimbangi dengan berkurangnya aliran uap masuk keturbin, dan berkurangnya aliran uap masuk keturbin juga harus diimbangi dengan berkurangnya aliran air pengisi boiler, aliran bahan bakar, dan aliran udara pembakaran. Semuanya itu harus berjalan secara serempak, dan untuk itu diperlukan sistem kontrol yang akan mengendalikan perubahan perubahan aliran tersebut secara otomatis.

Pada dasarnya sistem control PLTU terbagi menjadi dua jenis, yaitu “boiler follow” dan “turbin follow”. Dengan boiler follow dimaksudkan bahwa boiler mengikuti perubahan beban yang dirasakan oleh turbin. Dengan perubahan beban tersebut turbin akan mengurangi atau menambah aliran uap yang datang dari boiler dengan mengurangi atau menambah pembukaan katup uap masuk turbin. Gambar 3.31 menunjukkan hubungan antara perubahan posisi katup uap masuk turbin, terhadap besarnya aliran uap, bertambahnya daya turbin dan perubahan tekanan uap pada boiler dalam satuan menit, baik untuk PLTU dengan bahan bakar batubara maupun dengan PLTU dengan bahan bakar gas / minyak.

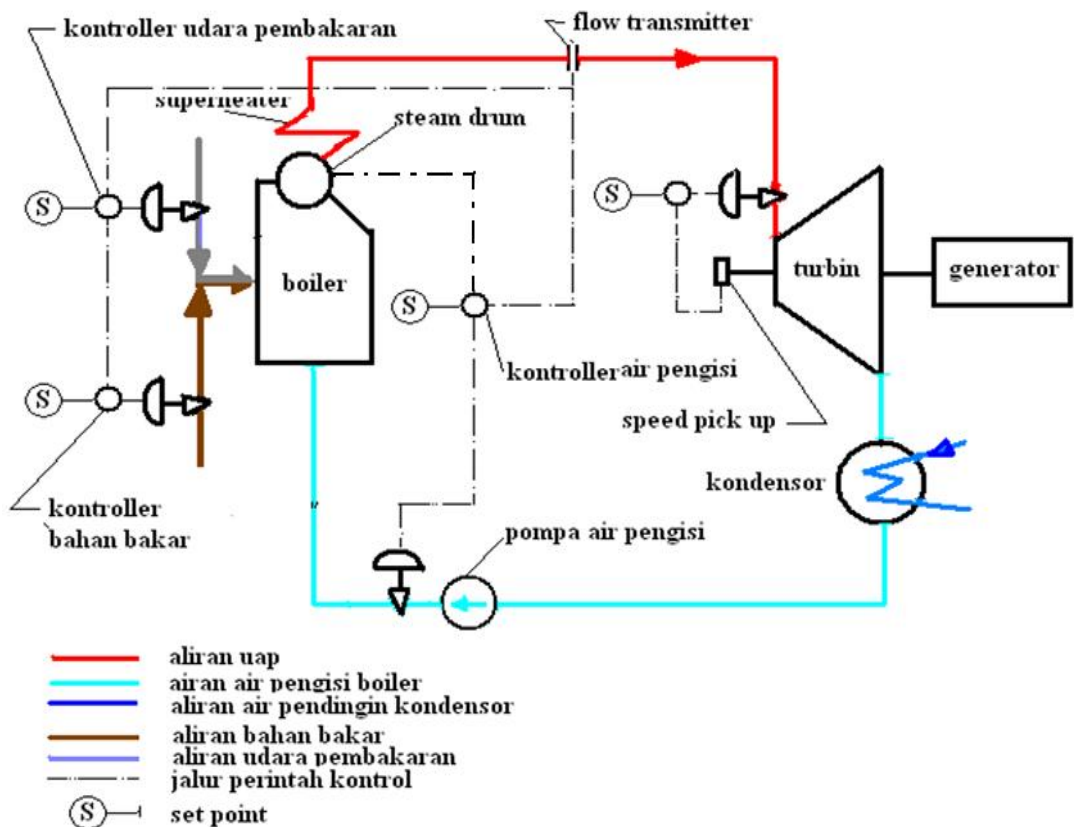


Gambar 3. 31 Pengaruh perubahan posisi katup uap masuk turbin

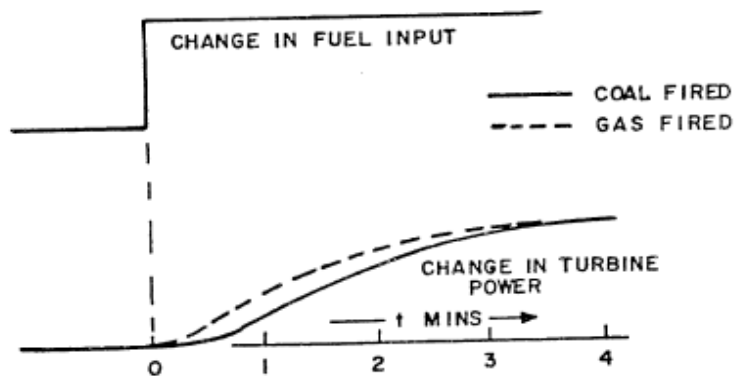
Berkurang atau bertambahnya aliran uap harus diimbangi dengan penambahan atau pengurangan jumlah aliran air pengisi boiler, aliran bahan bakar

dan aliran udara pembakaran. PLTU yang menggunakan sistem kontrol jenis ini adalah PLTU dengan tekanan uap yang konstan, dengan boiler yang volume uapnya besar. Gambar 3. 32 menunjukkan sistem control “boiler follow”, dimana perubahan beban generator akan menyebabkan berubahnya putaran turbin. Berubahnya putaran turbin akan menyebabkan sistem governor turbin bekerja untuk merubah posisi katup uap masuk turbin, sehingga aliran uap juga berubah. Perubahan aliran uap digunakan sebagai sinyal untuk merubah aliran bahan bakar, aliran udara pembakaran dan aliran air pengisi boiler.

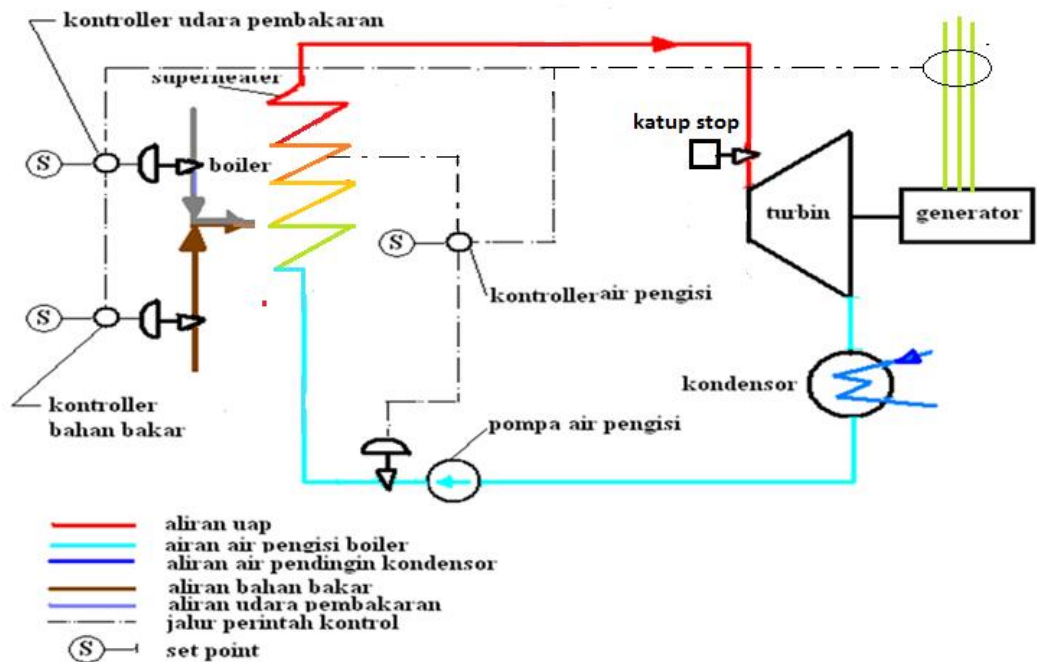
Sistem kontrol “turbine follow” umumnya digunakan untuk PLTU dengan boiler dengan volume uap yang kecil dan tekanan uap yang tidak konstan (sliding pressure). Jenis boiler yang dimaksud Adalah jenis Once Through dengan tekanan super kritis. PLTU jenis ini juga tidak dilengkapi dengan katup pengatur aliran uap masuk turbin, sehingga uap masuk melalui seluruh keliling turbin (full arc admission). Bertambahnya beban yang diberikan oleh konsumen akan menyebabkan naiknya arus keluar generator. Berubahnya arus generator digunakan langsung sebagai sinyal untuk merubah besarnya aliran bahan bakar, aliran udara pembakaran dan aliran air pengisi boiler (Gambar. 3. 33). Untuk perubahan aliran arus generator yang naik, maka akan naik



Gambar 3. 32 Sistem control PLTU “Boiler Follow”

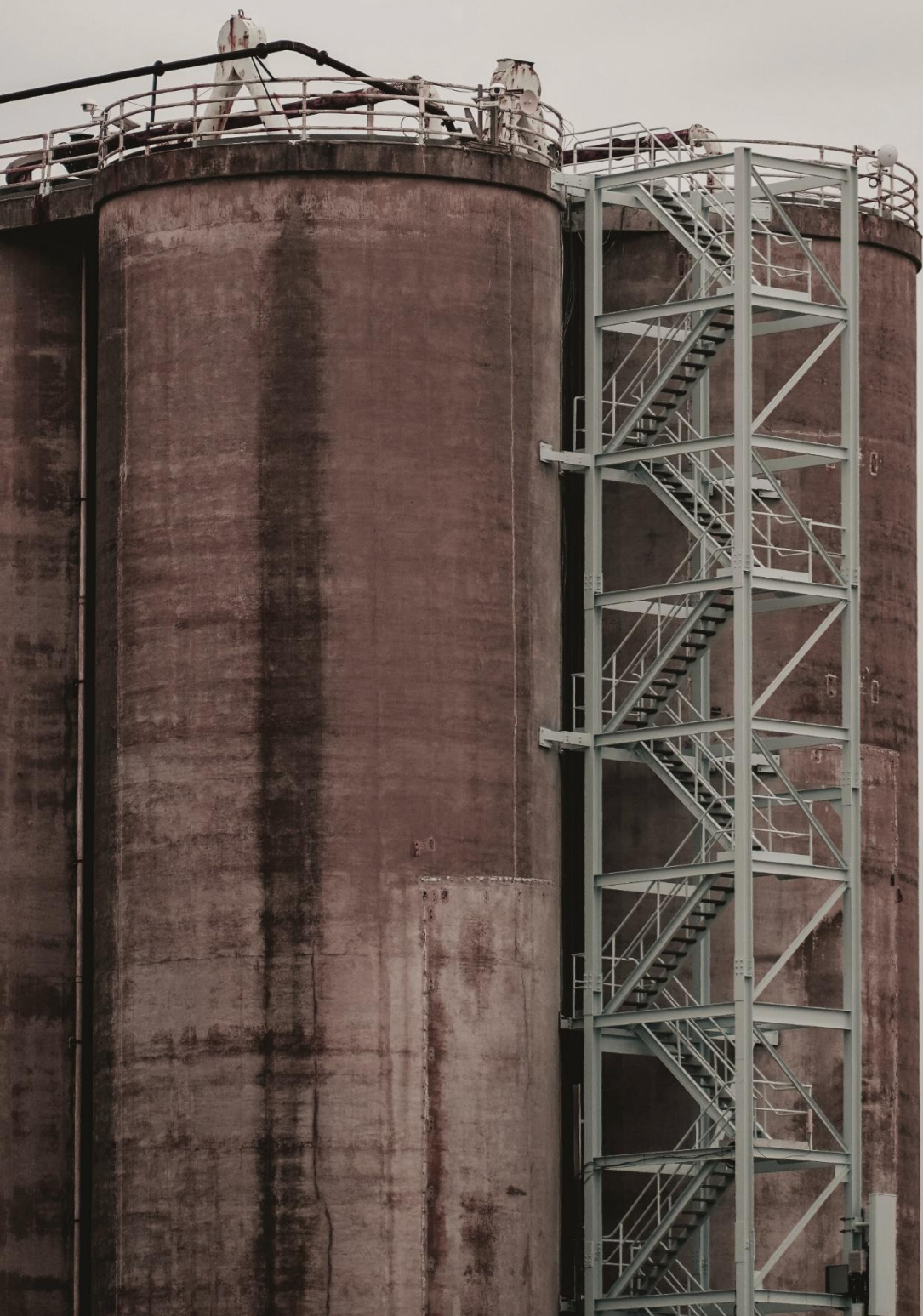


Gambar 3. 33 Pengaruh perubahan sinyal aliran bahan bakar terhadap perubahan daya turbin uap masuk turbin



Gambar 3. 34 Sisstim control PLTU "turbine follow"

pula besarnya aliran bahan bakar, aliran udara pembakaran dan alira air pengisi boiler. Naiknya aliran bahan bakar dan aliran udara pembakaran akan menambah besarnya tekanan dan aliran uap keluar boiler / masuk turbin, sehingga daya turbin menjadi bertambah besar. Demikian sebaliknya terjadi untuk arus generator yang menurun. Gambar 3. 31 menunjukkan perubahan yang terjadi pada sinyal pengatur aliran bahan bakar terhadap perubahan daya turbin pada PLTU batubara dan PLTU gas /minyak.



BAB IV

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI

4.1 UMUM

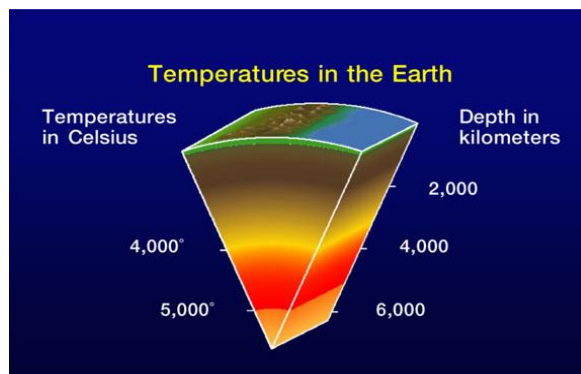
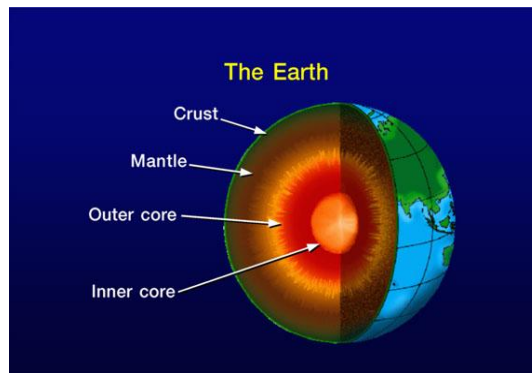
Bumi yang kita tempati pada bagian dalamnya mengandung sumber energi yang sangat besar (Gambar 4.1), berupa inti magma. Inti magma ini pada tempat tertentu muncul kepermukaan bumi melalui tempat yang kita kenal sebagai gunung berapi. Pada tempat tertentu pula kita bisa melihat adanya uap air atau air panas yang keluar dari permukaan bumi. Ini menandakan bahwa didalam perut bumi terdapat sejumlah kandungan air yang bersinggungan langsung dengan sumber panas yaitu pada mantel (berupa lapisan batu keras) yang porous, dimana air bisa menyusup langsung sampai kedekat sumber panas magma. Selanjutnya sumber panas akan menaikkan suhu air tersebut atau jika panasnya cukup akan mengubah air tersebut menjadi uap dengan tekanan yang relatif tinggi. Sumber air datang dari air hujan yang masuk kedalam tanah melalui akar akar pohon atau karena adanya tingkat porositas tanah yang tinggi.

Produksi uap didalam perut bumi ternyata dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan tenaga listrik dengan kapasitas yang cukup besar, dan selama sumber airnya dapat selalu diperbaharui, sumber energi ini tidak akan habis. Karena itu untuk menjaga agar kandungan air tidak menjadi habis pada proses pembangkit listrik panas bumi, maka uap keluar turbin yang telah diembunkan didalam kondensor, dipompakan kembali masuk kedalam perut bumi (Gambar 4.2)

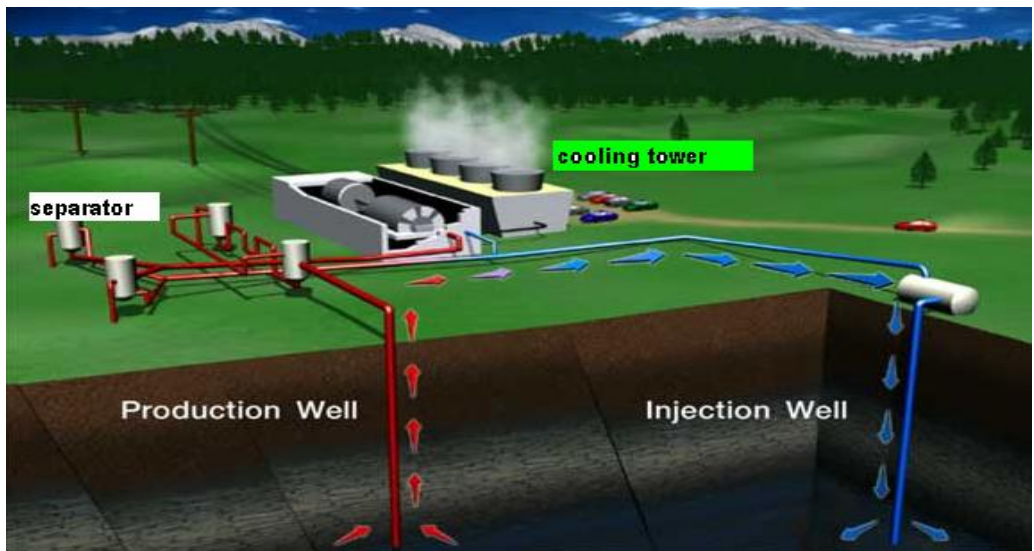
Besarnya energi yang terdapat didalam uap diukur dengan berapa besarnya tekanan, suhu, kandungan air, dan berapa besar aliran yang bisa diberikan. Tingginya. tekanan dan suhu menentukan besarnya enthalpy yang terkandung didalam uap tersebut. Rumusan rumusan yang berlaku pada PLTU diluar rumusan rumusan untuk boiler berlaku untuk pula PLTP.

PLTP mempunyai keuntungan dibanding dengan jenis pembangkit lainnya antara lain:

- Merupakan sumber energi yang terbaru, karena sumber panas didalam inti bumi / magma merupakan sumber panas abadi sehingga sepanjang air dapat masuk kedalam daerah mantel maka uap tetap dapat dihasilkan.
- Tidak memerlukan biaya bahan bakar.
- Tidak menimbulkan polusi jika konstruksinya adalah binary.



Gambar 4. 1 Susunan lapisan lapisan bumi , kedalaman dan suhu yang terkait dengan kedalaman



Gambar 4. 2 Sebuah instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Adapun kerugiannya adalah :

- Tidak bisa ditempatkan disegala tempat, terbatas pada tempat yang ada sumber panas buminya saja, umumnya berada didaerah pegunungan, jauh dari pusat kota, dan biasanya juga tidak ada sumber air pendingin, sehingga diperlukan transmisi yang panjang untuk menyalurkan listriknya dan menara pendingin untuk mendinginkan uap keluar kondensor.
- Bahaya yang timbul saat pengeboran. Oleh karena tekanan uap yang tinggi bisa terjadi semburan uap liar saat pengeboran, karena itu diperlukan tingkat keberhati hatian yang tinggi.
- Pecahnya pipa akibat korosi. Kandungan asam belerang yang dibawa uap dapat mengakibatkan korosi pada pipa yang dilaulinya, karena itu pemilihan material yang tahan korosi harus menjadi pilihan, karena itu bayanya menjadi tinggi.
- Uapnya mengandung pollutan seperti asam belerang, partikel padat dan gas beracun.

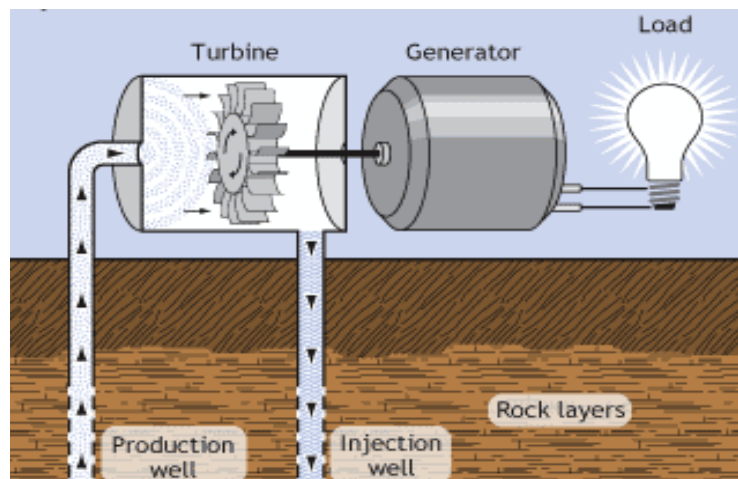
4.2 KLASIFIKASI PLTP

Dari segi sumber panas buminya PLTP dibedakan:

- PLTP hydrothermal, yaitu bahwa uap yang keluar dari perut bumi banyak mengandung air, dan ini yang paling banyak ditemui. Untuk menggerakkan turbin, butir butir yang ada harus dibuang terlebih dahulu didalam separator, sehingga uap masuk turbin dalam keadaan kering.
- PLTP Geopressurized, yaitu bahwa yang keluar dari perut bumi berupa air panas dengan tekanan yang tinggi, kemudian dengan menurunkan tekanannya diperoleh uap.
- PLTP Hot dry rock. Pada dasarnya lapisan bebatuan panas didalam perut bumi ada yang bersifat kering/tidak mengandung air (hot dry) dan ada yang mengandung air (wet dry). Pada PLTP Hot dry rock, uap panas yang diperoleh berasal dari injeksi air dari permukaan bumi kedalam lapisan bebatuan panas didalam perut bumi.

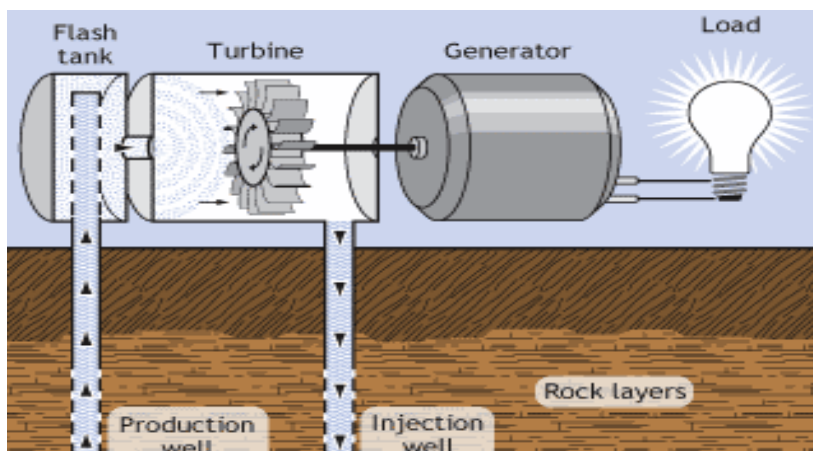
Dari segi konstruksi PLTP dibedakan:

- **PLTP uap kering** (Gambar 4.3), Dari perut bumi berupa uap kering (tidak mengandung air) dengan tekanan yang tinggi. Uap tersebut setelah melalui saringan/separator kemudian dimasukkan kedalam turbin untuk mendorong sudu sudu turbin dan menghasilkan tenaga mekanik untuk menggerakkan generator listrik. Uap keluar turbin diembunkan menjadi air kembali dan kemudian diinjeksikan lagi kedalam perut bumi.



Gambar 4. 3 PLTP uap kering

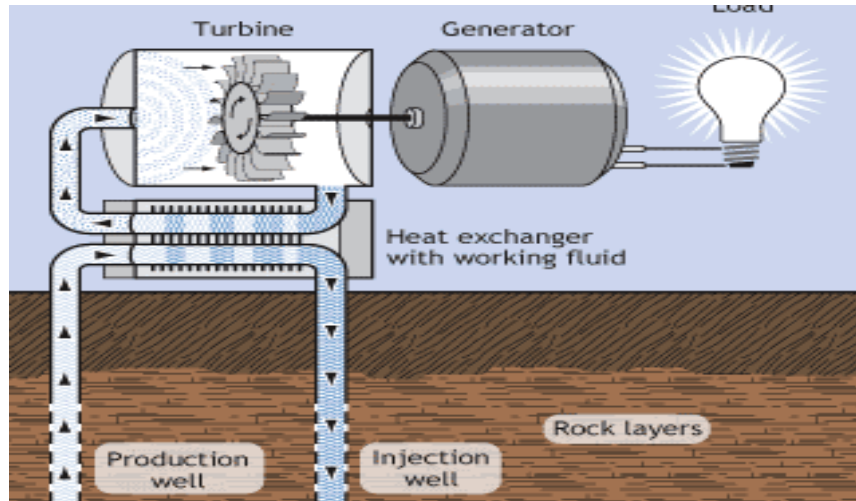
- **PLTP flash** (Gambar 4.4), Dari perut bumi berupa air panas dengan tekanan yang tinggi. Air tersebut kemudian dikabutkan kedalam ruang bertekanan rendah sehingga air tersebut berubah menjadi uap dan kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin.



Gambar 4. 4 PLTP flash

- **PLTP binary** (Gambar 4.5), Uap atau air panas dari perut bumi tidak digunakan langsung untuk menggerakkan turbin, tetapi digunakan untuk memanaskan fluida didalam heat exchanger. Fluida tersebut yang memiliki suhu didih yang rendah kemudian menguap dan menggerakkan sudu sudu

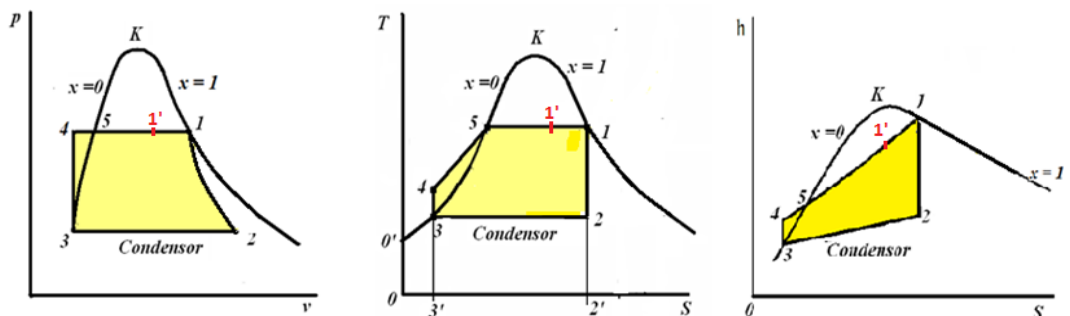
turbin. Dengan cara ini turbin dapat dijaga selalu bersih, dan gas ikutan yang tidak menguntungkan dapat dicegah keluar keudara, tetapi diinjeksikan kembali kedalam perut bumi.



Gambar 4. 5 PLTP binary

4.3 SIKLUS RANKINE PLTP.

Siklus air-uap yang terjadi di PLTP adalah seperti halnya yang terjadi di PLTU, mengikuti siklus Rankine. Hanya saja jika di PLTU terdapat proses pemanasan lanjut uap didalam superheater, didalam PLTP tidak ada proses pemanasan lanjut. Uap yang



Gambar 4. 6 Siklus air - uap (Rankine) PLTP

keluar dari perut bumi umumnya berupa uap basah yang harus dikeringkan terlebih dahulu sebelum masuk turbin.

Gambar 4.6 merupakan diagram p-v, diagram T-S dan diagram h - S dari proses air – uap untuk PLTP yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

- 1-2 ekspansi uap didalam turbin berlangsung secara adiabatik / isentropis.
- 2-3 Perubahan fasa dari uap menjadi air didalam condenser (isotermis)
- 3-4 Injeksi air kondensat kedalam perut bumi (isovolume)
- 4-5 Pemanasan air menuju titik didih didalam perut bumi (isobaris)
- 5-1 Perpindahan fasa dari air menjadi uap didalam perut bumi (isotermis).
- 1' = Uap masuk separator

4.4 ENERGI YANG DIBANGKITKAN

Uap yang keluar dari perut bumi dari sumur sumur PLTP pada dasarnya merupakan uap basah, mengandung air. Juga mengandung kotoran padat berupa serpihan serpihan tanah dari rongga uap didalam perut bumi. Sebelum uap masuk keturbin maka uap harus dikeringkan dulu dan dipisahkan dari kotoran dengan separator.

Besarnya energi yang bisa dikonversi menjadi tenaga mekanik didalam turbin, setelah uap melewati separator tersebut tergantung dari efisiensi instalasi pembangkit listrik yang bersangkutan dan besarnya tekanan uap keluar turbin. Untuk jelasnya lihat persamaan 2.20 berikut:

$$E = G(h_1 - h_2)\eta$$

dimana : E = energi yang bisa diperoleh kJ.

G = berat uap yang mengalir kg/jam.

h_1 = enthalpy uap masuk turbin kJ/kg.

h_2 = enthalphy uap keluar turbin.kJ/kg.

η = efisiensi turbo generator%

Contoh soal.

Uap keluar sumur mempunyai derajat kekeringan $x = 85\%$ dan tekanan 8 bar gauge (9 bar absolut), dan aliran 200 ton /jam. Jika separator berfungsi baik,

dan kekeringan uap masuk turbin = 100 %, maka jumlah massa uap yang mengalir masuk turbin = $0,85 \times 200 = 170 \text{ ton / jam}$.

Energi / enthalpy uap masuk turbin, sesuai tabel uap = 2773 kJ/kg , entropy = $6,6213 \text{ kJ/kg}^0\text{C}$.

Tekanan keluar turbin / didalam kondenser diperkirakan $0,1 \text{ bar}$ absolut.

- Dengan nilai entropy yang sama pada tekanan $0,1 \text{ bar}$ abs, didapat nilai kekeringan uap keluar turbin:

$$x = \frac{S - S_f}{S_g - S_f} = \frac{6,6213 - 0,6492}{8,1488 - 0,6492} = \frac{5,9721}{7,4996} = 0,7963$$

- Energi sisa uap keluar kondenser:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_f + x (h_g - h_f) = 191,8 + 0,7963 (2583,9 - 191,8) \\ &= 2096.6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

- Daya ideal yang diperoleh didalam turbin:

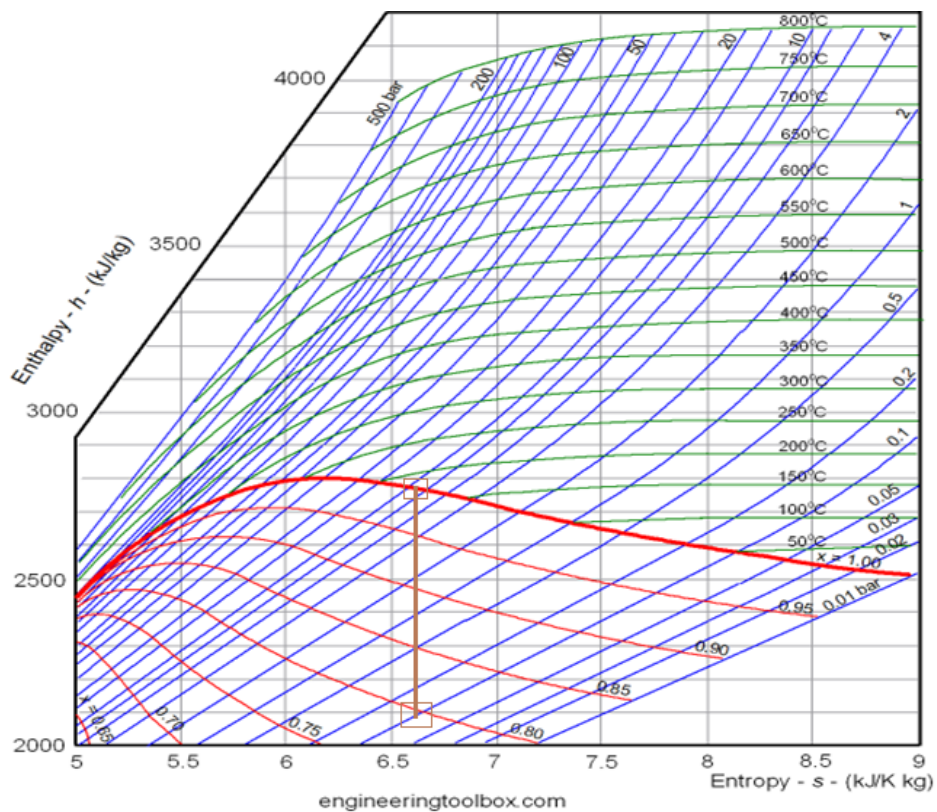
$$P = G (h_2 - h_1) = 170\,000 (2773 - 2096.6) / 3600 = 31941 \text{ kW}$$

Property		Metric Standard	
State		Saturated Steam	
Temperature (T)		175.35	0C
Pressure (P)		9	bar
Density	Saturated Liquid (ρ_f)	891.92	kg/m ³
	Saturated Vapor (ρ_g)	4.6535	
Specific Volume	Saturated Liquid (v_f)	0.001121	m ³ /kg
	Saturated Vapor (v_g)	0.21489	
Enthalpy	Saturated Liquid (h_f)	742.56	kJ/kg
	Evaporated (h_{fg})	2030.5	
	Saturated Vapor (h_g)	2773	
Entropy	Saturated Liquid (s_f)	2.094	kJ/kg-K
	Evaporated (s_{fg})	4.5273	
	Saturated Vapor (s_g)	6.6213	

Property		Metric Standard	
State		Saturated Steam	
Temperature (T)		45.806	0C
Pressure (P)		0.1	bar
Density	Saturated Liquid (ρ_f)	989.83	kg/m ³
	Saturated Vapor (ρ_g)	0.068166	
Specific Volume	Saturated Liquid (v_f)	0.0010103	m ³ /kg
	Saturated Vapor (v_g)	14.67	
Enthalpy	Saturated Liquid (h_f)	191.81	kJ/kg
	Evaporated (h_{fg})	2392.1	
	Saturated Vapor (h_g)	2583.9	
Entropy	Saturated Liquid (s_f)	0.6492	kJ/kg-K
	Evaporated (s_{fg})	74.996	
	Saturated Vapor (s_g)	8.1488	

Gambar 4. 7 Tabel uap jenuh untuk tekanan 9 bar absolut dan tekanan 0,1 bar absolut

Proses ekspansi uap didalam turbin dari tekanan 9 bar absolut menjadi 0,1 bar absolut dapat digambarkan diagram Mollier sebagaimana terlihat didalam Gambar 4.8 berikut:

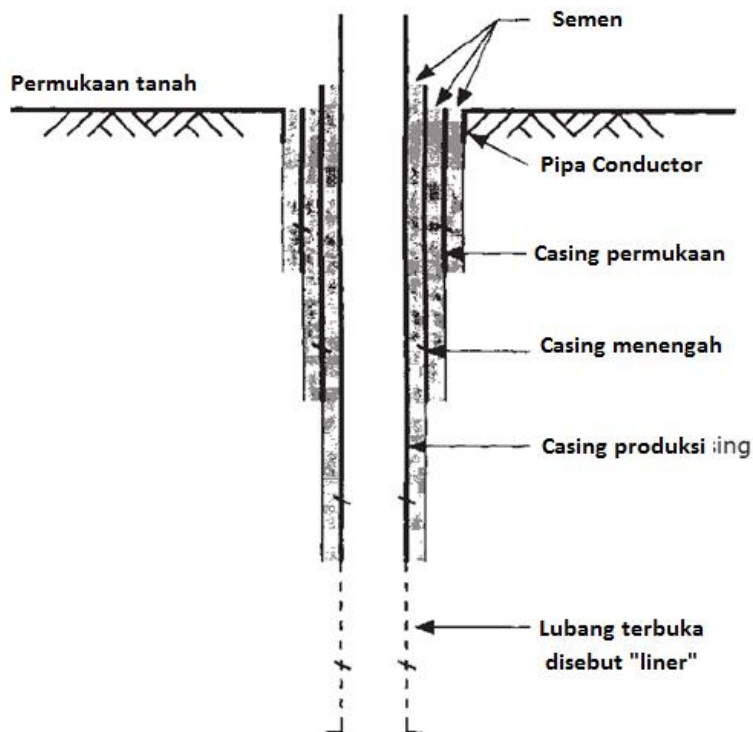


Gambar 4. 8 Proses ekspansi uap didalam turbin dari tekanan 9 bar absolute menjadi 0,1 bar absolute

4.5 BAGIAN BAGIAN UTAMA

4.5.1 Sumur produksi

Sumur produksi merupakan fasilitas utama yang bertugas mengalirkan uap dari reservoir menuju ke permukaan tanah. Sumur produksi geothermal biasanya memiliki kedalaman sekitar 2000 hingga 2500 meter di bawah permukaan tanah. Sumur ini ada yang dibor dengan arah vertikal dan ada pula yang dibor dengan arah dan belokan tertentu (*directional well*). Sepanjang lubang sumur diselubungi oleh semacam pipa baja khusus tahan korosi yang disebut *casing*. Dalam beberapa hal oleh karena tingkat korosi yang tinggi, casing dibuat dari bahan titanium. Casing ini direkatkan ke formasi batuan di sampingnya dengan menggunakan semen khusus, semen ini juga berfungsi untuk mencegah penggelembungan pipa akibat panas. Untuk sumur berukuran besar, diameternya bisa mencapai 12 inch (30 cm).



Gambar 4. 9 Konstruksi dari sumur produksi

4.5.2 Kepala sumur

Kepala sumur terdiri dari serangkaian *valve* (katup) yang terletak tepat di atas permukaan tanah dimana lubang sumur berada di bawahnya. Terdiri dari: *master valve*, *wing valve*, *service valve*, dan *bleed valve*.

- Master valve berfungsi untuk menutup atau membuka aliran dari dalam lubang sumur.
- Wing valve terdiri dari 2 buah, satu untuk mengatur aliran menuju turbin, satunya lagi dikenal juga sebagai *by pass valve* untuk mengalihkan aliran ke *silencer* atau *rock muffler* ketika diperlukan. Pada kondisi tertentu, aliran uap menuju turbin harus dihentikan, dan *by pass valve* mesti diaktifkan untuk mengalihkan aliran. Jika aliran yang sedang dialihkan ini disemburkan secara langsung ke udara maka akan menimbulkan kebisingan yang luar biasa dan dapat merusak pendengaran. Untuk meredam kebisingan tersebut, maka digunakan *silencer*.

- Service valve berfungsi untuk mengatur bukaan tempat masuknya peralatan *logging* pada saat dilakukan uji sumur (*well test*).
- Bleed valve untuk memberikan aliran kecil sewaktu master valve dalam kondisi tertutup penuh. Ini dilakukan guna menghindari terbentuknya akumulasi NCG (*non condensible gas*) di sekitar kepala sumur.



Gambar 4. 10 Wellhead

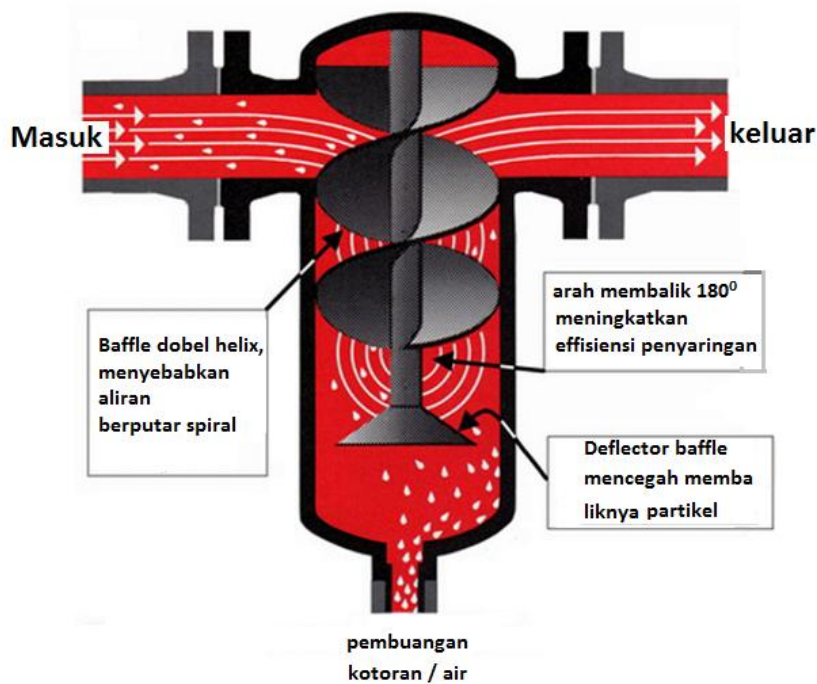
4.5.3 Pipa penyalur

Pipa penyalur digunakan untuk menyalurkan uap dari wellhead menuju turbin. Pipa ini harus diisolasi dengan baik untuk menghindari terjadinya penurunan suhu dan pengembunan. Dibeberapa tempat dilengkapi dengan saluran pembuangan air kondensat untuk membuang air kondensat yang terjadi karena uap bersinggungan dengan dinding pipa. Oleh karena jarak antara sumur dan turbin cukup jauh, maka harus dipasang pula beberapa belokan atau expansion joint untuk menghilangkan tegangan akibat pemuaian. Mengingat uap yang mengalir didalamnya mengandung

kotoran yang bersifat korosif, bahan pipa yang digunakan harus tahan korosi. Proses korosi terjadi terutama pada saat PLTP tidak beroperasi dan pipa menjadi dingin.

4.5.4 Pemisah Uap (steam separator)

Steam Separator atau demister untuk membuang kotoran padat dan butir-butir air sebelum uap masuk ke dalam turbin. Kualitas dan kemampuan separator ini dalam membuang butir-butir air dan kotoran padat sangat menentukan daya mampu dan efisiensi turbin serta umur operasi turbin. Umumnya jenis yang digunakan untuk separator ini adalah jenis cyclone, dimana uap mengalir dengan kecepatan yang tinggi dibelokkan dan diputar sehingga partikel padat atau butir-butir air kondensat yang mempunyai massa jenis lebih besar akan terlempar dan jatuh kebawah. Sementara uap akan berbalik keatas menuju saluran keluar (Gambar 4.11)



Gambar 4. 11 Separator jenis cyclone dengan pembalik arah

4.5.5 Turbin Uap

Sebagai pengubah energi panas menjadi energi mekanik pada PLTP digunakan turbin uap. Turbin uap disini tidak bedanya dengan turbin PLTU tekanan rendah. Perbedaannya jika pada turbin uap PLTU, uap yang mengalir masuk adalah

uap kering dan bersih dari kotoran, turbin untuk PLTP dialiri oleh uap yang mengandung kotoran padat, butir butir air, dan gas gas yang bersifat korosif. Karena itu bagian bagian turbin uap PLTP khususnya yang dilalui uap dibuat dari material yang lebih tahan korosi dan erosi. Berikut adalah penjelasan perihal kotoran kotoran yang terbawa didalam uap panas bumi:

- **Gas penyebab korosi.**

Uap panas bumi mengandung gas gas yang dapat mencapai 10%, terdiri dari carbon dioxide, hidrokarbon dan hydrogen sulphide. Hydrogen sulphide walaupun jumlahnya relative sedikit, tetapi merupakan penyebab korosi. Korosi akan mengurangi ketebalan material dan mengurangi kekuatan dari bagian bagian turbin.

- **Kotoran padat (debu).**

Meskipun separator dan strainer telah dipasang, untuk membersihkan kotoran dari uap yang mau masuk turbin, namun debu dengan ukuran kurang dari 10 mikron akan terbawa masuk kedalam turbin. Debu ini terdiri dari serpihan batu /pasir kuarsa dan serpihan karat logam bagian dalam pipa uap dari dalam sumur sampai keturbin. Debu ini akan akan mengendap disudut sudut, lekukan lekukan ataubelokan belokan yang akan mempersempit laluan uap. Selanjutnya kondisi ini akan menurunkan daya dan efisiensi turbin. Karena itu akan menambah beban pemeliharaan.

- **Kebasahan uap**

Meskipun butir butir air yang terkandung didalam uap keluar sumur telah dihilangkan didalam separator, namun munculnya butir butir air baru setelah uap masuk turbin akibat turunnya suhu tetap tidak bisa dihindari. Butir butir air ini akan mengakibatkan erosi pada sudu sudu turbin. Erosi bisa berupa tumbukan butir butir air terhadap permukaan sudu dengan sudut 90^0 yang memberikan luka berupa sumuran sumuran, atau berupa irisan dengan sudut 0^0 yang memberikan luka berupa goresan goresan.

Apa yang telah diuraikan diatas berkenaan dengan gas gas ikutan yang korosif, debu dan butir butir air merupakan masalah tersendiri dari turbin PLTP. Faktor factor tersebut bisa saling memperkuat untuk menurunkan daya tahan turbin, menurunkan performance, dan mempersulit proses pembongkaran turbin untuk inspection. Gambar. 4.12 menunjukkan sudu sudu jalan turbin PLTP, dimana uap melaluinya dengan segala kotoran yang terbawa didalamnya.



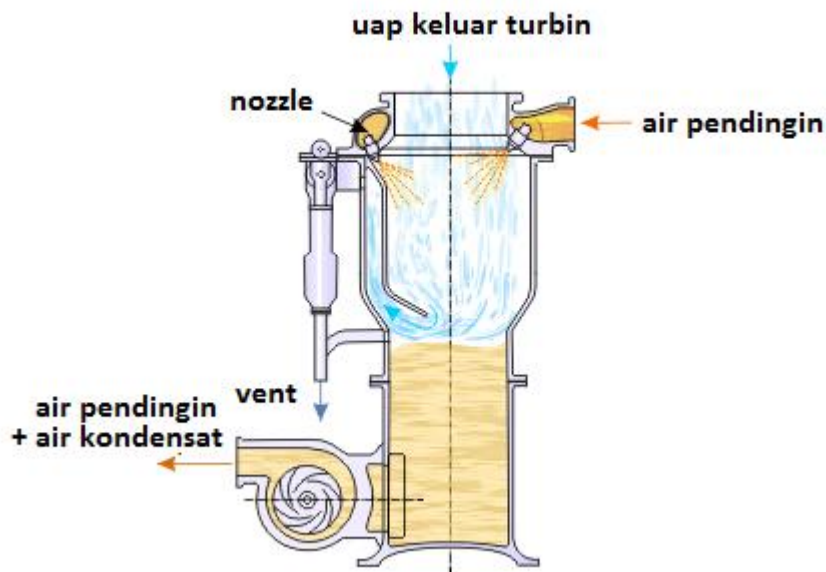
Gambar 4. 12 Rotor turbin PLTP kapasitas 55000 kW

4.5.6 Condenser

Condenser yang digunakan untuk PLTP bisa terdiri dari jenis condenser kontak (contact condenser) atau jenis condenser permukaan (surface condenser). Dengan condenser kontak dimaksudkan bahwa uap bekas keluar turbin akan bersinggungan/bercampur langsung dengan air pendingin. Disini kandungan panas yang terkandung didalam uap keluar turbin diserahkan kepada air pendingin sehingga uap berubah fasa menjadi air dan air pendingin suhunya menjadi naik. Campuran air kondensat dan air pendingin selanjutnya dipompa keluar condenser dan didinginkan didalam cooling tower dan kembali lagi kekondenser sebagai air pendingin. Oleh karena uap mengandung hydrogen sulfide yang bersifat korosif, maka seluruh bangunan yang dilalui air pendingin harus pula tahan terhadap korosi.

Keuntungan condenser kontak adalah oleh karena hasil pengembunan uap keluar turbin dijadikan sebagai air pendingin, maka tidak diperlukan tambahan air dari luar.

Dengan condenser permukaan maka air kondensat hasil pengembunan uap keluar turbin dipompakan langsung kedalam perut bumi melalui sumur injeksi. Dengan demikian pengaruh korosi terhadap instalasi PLTP dan sekitarnya bisa lebih dikendalikan, tetapi diperlukan tambahan air pendingin sebagai ganti dari air pendingin yang terbawa udara didalam cooling tower.



Gambar 4. 13 Kondenser kontak

Gambar 4.13 adalah gambar sebuah condenser kontak, dimana air pendingin mengalir dari cooling tower masuk kedalam condenser atas tarikan vacuum condenser. Selanjutnya campuran air pendingin dipompakan ke cooling tower untuk didinginkan dengan uadara atmosfir.

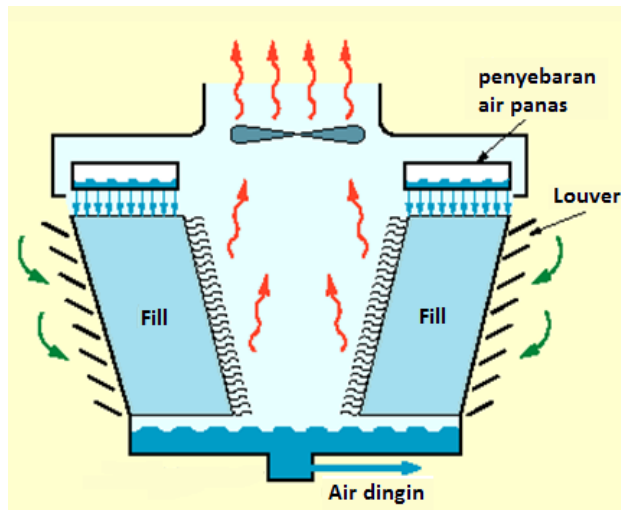
Untuk gas gas yang tidak bisa mengembun dikeluarkan dari ruang condenser keatmosfir dengan menggunakan ejector atau pompa vacuum.

4.5.7 Cooling tower

Cooling tower (menara pendingin) adalah bagian PLTP yang digunakan untuk membuang panas dari air pendingin keluar kondenser ke atmosfer. *Cooling tower* PLTP merupakan *Cooling Tower* jenis direct contact (kontak langsung antara air pendingin dan udara atmosfer). *Cooling tower* direct contact, merupakan bangunan berdinding tegak dengan kisi kisi (fill) didalamnya dimana air panas dijatuhkan dari atas dan dengan bantuan kisi kisi tersebut air menyebar dan jatuh kebawah dengan butiran yang kecil. Dengan arah yang berlawanan atau memotong, udara (dengan suhu yang lebih rendah) mengalir dan bersinggungan langsung dengan butiran² air tersebut. Panas yang ada didalam air diserahkan kepada udara, karena itu udara akan terpanaskan dan suhunya menjadi naik, sementara suhu airnya turun. Persinggungan antara udara yang bergerak keatas, dan air yang bergerak turun menjadikan sebagian air akan menguap dan terbawa oleh aliran udara. Air yang telah terdinginkan kemudian ditampung didalam bak penampung dibawah tower untuk kemudian dialirkan kekondensor lagi sebagai air pendingin.

Ditinjau dari aliran udaranya Cooling towers diklasifikasikan menjadi:

- Cooling tower dengan tarikan alam (natural draft). Disini untuk mendapatkan aliran udara yang cukup diperlukan bangunan yang tinggi
- Cooling tower dengan tarikan paksa (forced Draft). Disini ketinggian bangunan cooling tower dapat dikurangi dengan memasang kipas untuk menciptakan aliran udara.



Gambar 4. 14 Cooling tower dengan tarikan udara paksa (induced draft)

4.5.8 Sumur Injeksi (*Injection Wells*)

Sumur injeksi adalah sumur yang digunakan untuk menginjeksikan air kondensat (hasil pengembunan uap keluar turbin) kembali ke dalam perut bumi. Oleh karena air kondensat ini jauh lebih mengandung garam-garam dibanding air laut, maka tidak dianjurkan untuk dibuang dipermukaan tanah, disamping juga untuk menggantikan air yang telah berubah menjadi uap didalam perut bumi.

Sumur ini biasanya diletakkan pada topografi yang relatif lebih rendah sehingga tidak diperlukan pompa untuk mengalirkan fluida tersebut menuju ke wellpad sumur injeksi.

Sumur injeksi dibuat dengan mengebor tanah dengan kedalaman mencapai 5000 feet lebih. Seperti halnya sumur produksi sumur injeksi juga harus dilengkapi dengan casing yang membatasi antara tanah dan air injeksi. Diujung bawah casing diberi lubang lubang untuk memungkinkan air meresap kembali kedalam bebatuan guna dipanaskan kembali didalam perut bumi. Diantara casing dan tanah (kecuali bagian yang berlubang, dicor semen untuk mengikat casing dengan tanah/bebatuan sekelilingnya.

Sumur injeksi harus mendapat pemeriksaan setiap tahun sekali guna memastikan apakah injeksi bisa mencapai kedalaman yang ditentukan.



BAB V

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS

5.1. UMUM

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) adalah pembangkit listrik yang generator listriknya digerakkan dengan Turbin Gas. PLTG adalah jenis pembangkit listrik sekala besar kedua setelah PLTU yang banyak dijumpai, terutama untuk tujuan memikul beban puncak, karena sifatnya yang cepat dapat distart. PLTG juga mempunyai keuntungan dan kerugian dibanding jenis pembangkit lain. Adapun keuntungannya adalah sebagai berikut.

1. **Ringan.** Berat PLTG per satuan daya (kg/kw) adalah kecil, lebih-lebih pada putaran yang tinggi, karena itu tidak memerlukan fondasi yang berat.
2. **Cepat dapat distart.** Dibanding dengan PLTU, PLTG sangat mudah untuk distart dan cepat menghasilkan daya yang besar, karena itu sangat cocok dioperasikan untuk memikul beban puncak dan sebagai pembangkit cadangan untuk kepentingan darurat.
3. **Tidak memerlukan air pendingin.** Dibanding pembangkit jenis lain yang memerlukan air pendingin seperti PLTU dan PLTD, maka PLTG sangat cocok untuk daerah-daerah kering dan gurun pasir karena tidak memerlukan air pendingin.
4. **Masa pembangunan yang pendek.** Dibanding pembangunan PLTU maka pembangunan sebuah PLTG memerlukan jangka waktu yang lebih pendek, karena itu ia cocok untuk mengatasi krisis-krisis tenaga listrik disuatu daerah.
5. **Murah.** Dibanding pembangkit listrik yang lain harga sebuah PLTG merupakan yang paling murah untuk setiap daya (MW) terpasangnya.

6. **Dapat ditempatkan disegala lokasi.** Karena sifatnya yang ringan dan tidak memerlukan air pendingin maka ia dapat ditempatkan disegala lokasi, baik dipantai, digurun pasir maupun didaerah kutub yang bersalju.

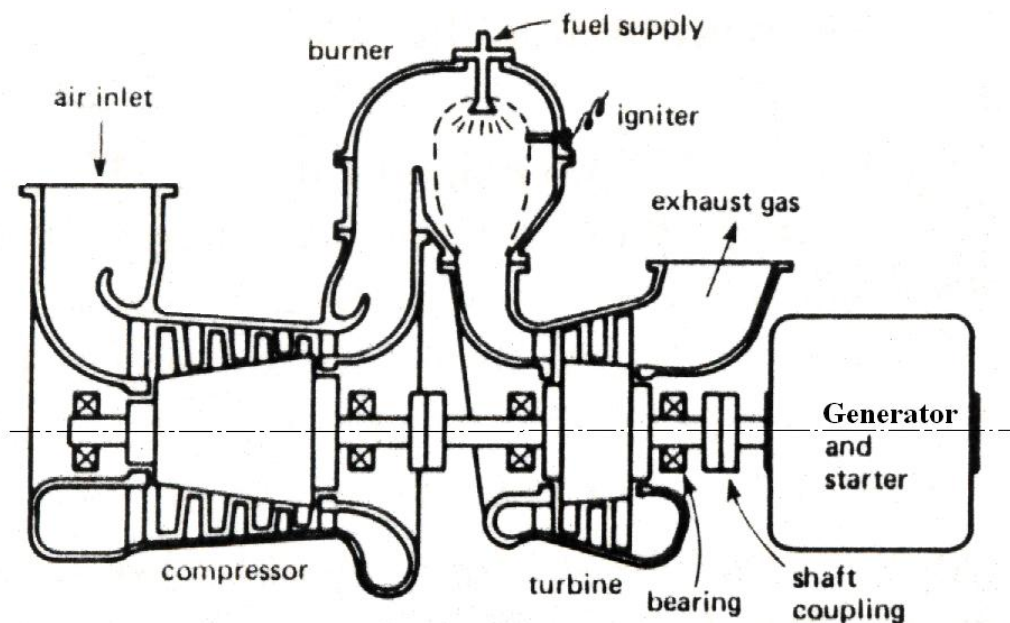
Adapun kerugian yang dimiliki PLTG antara lain adalah:

1. **Effisiensinya rendah.** Untuk daya terpasang yang sama diantara jenis Pembangkit Tenaga Listrik maka PLTG memiliki efisiensi yang paling rendah, karena itu biaya operasinya menjadi tinggi.
2. **Umurnya pendek.** Oleh karena beroperasi dengan suhu yang tinggi maka umur bagian-bagian turbin menjadi pendek dan memerlukan penggantian yang lebih sering. Disamping itu karena beroperasi dengan fluida kerja udara atmosfer dengan volume yang besar, partikel-partikel padat yang terdapat dalam udara akan mengakibatkan pengotoran dan erosi pada sudu-sudu compressor, sehingga secara berangsur-angsur daya mampunya akan menurun.
3. **Daya mampunya sangat dipengaruhi oleh udara atmosfer.** Suhu dan tekanan udara atmosfer sangat mempengaruhi daya mampu sebuah turbin gas. Makin tinggi suhu udara maka semakin rendah daya mampunya, demikian sebaliknya semakin rendah suhu udara, semakin tinggi daya mampunya. Makin tinggi tekanan udara atmosfer maka tinggi pula daya mampunya, demikian pula sebaliknya makin rendah tekanan udara atmosfer makin rendah pula daya mampunya.
4. **Harga spare partnya mahal.** Oleh karena beroperasi pada suhu yang tinggi maka harus dipilih material dengan kualitas yang tinggi disamping harus digunakan teknologi yang tinggi pula. Konsekuensinya adalah harganya menjadi mahal.

Untuk mengatasi rendahnya efisiensi beberapa cara dilakukan yaitu dengan menggabungkan atau memperbaiki siklus termodinamiknya seperti yang dikenal dengan siklus regenerasi, siklus kombinasi dan lain-lain yang akan dibahas pada bab-bab selanjutnya.

5.2. PRINSIP KERJA TURBIN GAS

Turbin gas memiliki tiga buah bagian utama yaitu Kompresor, Ruang Bakar (Combustor) dan Turbin, mempunyai cara kerja sebagai berikut :



Gambar 5. 1 Susunan peralatan sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Gas

Udara atmosfer dihisap masuk kedalam kompresor dan dikompresasi di dalamnya sehingga tekanannya naik. Selanjutnya udara tersebut 95% mengalir masuk kedalam ruang bakar (combustor), dan yang 5% digunakan sebagai pendinginan sudu turbin. Udara yang masuk kedalam combustor terbagi menjadi dua bagian, sebagian (30%) disebut sebagai udara primer digunakan untuk proses pembakaran bahan bakar yang dimasukkan kedalam

combustor, sebagian lagi (15%) digunakan sebagai pencampur dan penurun suhu nyala api sehingga nyala api tidak akan membakar bagian turbin.

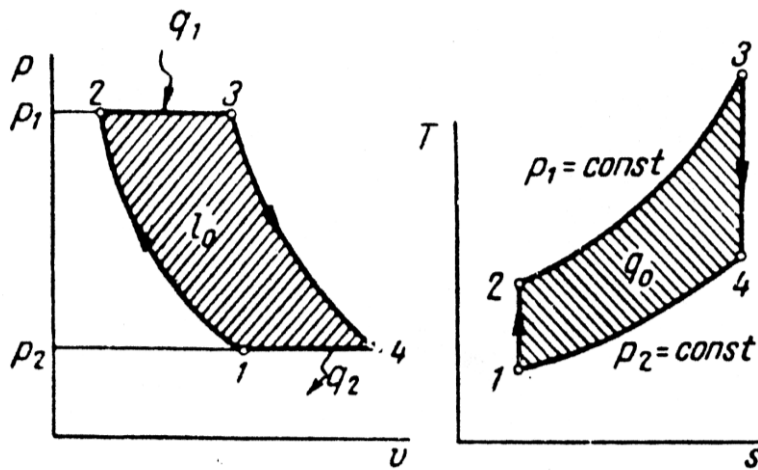
Bahan bakar dimasukkan secara continue kedalam combustor sehingga penyalaan didalamnya juga terjadi secara continue dari mulai penyalaan pertama (yang dilakukan dengan busi) sampai bahan baker berhenti mengalir (turbin gas distop). Disebabkan panas yang diberikan oleh penyalaan bahan baker, maka udara dari compressor tadi memuai dan menghasilkan kecepatan yang tinggi dan mampu mendorong sudu sudu turbin. Tenaga mekanik yang diperoleh didalam turbin sebagian besar digunakan untuk memutar kompressornya, dan sisanya digunakan untuk memutar generator untuk menghasilkan listrik, dan gas panas keluar turbin dikembalikan lagi ke atmosfir.

Pada mesin turbo jet, tenaga mekanik yang dihasilkan hanya khusus diperuntukkan untuk memutar compressor, sedang sisa gas panas keluar turbin digunakan untuk menghasilkan gaya dorong guna mendorong badan pesawat terbang bergerak maju kedepan.

5.3. EFFISIENSI TURBIN GAS

Secara ideal Turbin Gas mengikuti proses siklus Brayton (Gambar 1.2) terdiri dari :

- Kompresi adiabatik / isentropis (kalor tetap) terjadi didalam kompresor.
- Pemberian kalor pada tekanan tetap (isobaris) terjadi didalam combustor.
- Ekspansi adiabatik/isentropis terjadi di dalam turbin
- Pembuangan kalor pada tekanan tetap (isobaris) terjadi didalam terbuka (atmosfir).



Gambar 5. 2 Proses keliling (siklus) turbin gas digambarkan dalam diagram p-v dan T-s

Effisiensi thermis dari siklus sederhana turbin gas dapat ditentukan dengan rumus umum effisiensi :

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

Jumlah kalor q_1 dan q_2 secara berturut-turut sama dengan :

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2) \text{ dan } q_2 = c_p(T_4 - T_1)$$

Karena itu untuk effisiensi thermis

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

Untuk proses adiabatic (kalor tetap) 1-2 dan 3-4 dapat ditulis :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \text{ dan } \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Oleh karena $p_2 = p_3$ dan $p_1 = p_4$ maka $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$ atau $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$

Sehingga rumus diatas dapat ditulis:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

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

Jadi besarnya efisiensi thermis tergantung dari besarnya perbandingan tekanan keluar dan masuk compressor. Makin tinggi perbandingan tekanan tersebut semakin tinggi pula besarnya efisiensi thermis, demikian sebaliknya makin rendah besarnya perbandingan tersebut semakin rendah pula besarnya efisiensi thermisnya.

Besarnya kerja yang diperlukan untuk menggerakkan kompressor dapat dihitung dari besarnya perbedaan entalpi udara keluar dan masuk compressor. Demikian pula besarnya kerja yang diperoleh didalam turbin dapat dihitung dari selisih entalpi gas panas masuk dan keluar turbin. Kerja berguna dari sebuah turbin gas adalah merupakan selisih antara kerja yang diperoleh didalam turbin dan kerja yang diperlukan untuk menggerakkan kompressor.

Kerja kompresi adalah : $L_{1-2} = m(h_1 - h_2)$

Kerja turbin adalah : $L_{3-4} = m'(h_3 - h_4)$

Kerja turbin gas : $L_{3-4} - L_{1-2}$

dimana:

L_{1-2} = kerja kompresi

m = massa udara

m' = massa gas panas (udara + bahan bakar).

h = besarnya entalpi udara / gas panas pada titik ybs.

L_{3-4} = kerja turbin.

L_{TG} = kerja turbin gas.

Besarnya kerja ekspansi pada tekanan tetap selama pemberian kalor juga dapat dihitung berdasarkan selisih entalpi gas panas masuk turbin dan entalpi udara keluar compressor. Pertambahan entalpi disini adalah identik dengan kalor dari bahan bakar yang diberikan/masuk ruang bakar q_1 jika pembakaran berlangsung dengan sempurna. Demikian pula besarnya energi I kalor yang dibuang ke udara luar q_2 dapat dihitung berdasarkan selisih entalpi gas panas keluar turbin dan entalpi udara masuk compressor. Oleh karena massa bahan bakar dibanding dengan massa udara m relative sangat kecil maka untuk perhitungan sederhana massa bahan bakar dapat diabaikan, sehingga $m' = m$. Dari penjelasan tersebut dapat ditulis:

Kerja turbin gas :

$$\begin{aligned} L_{TG} &= Q_1 - Q_2 \\ &= Q_1 - Q_2 \\ &= m \{ (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \} \\ &= m (h_3 - h_2 + h_1 - h_4) \end{aligned}$$

Dengan demikian efisiensi termis turbin gas dapat ditulis:

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{L_{TG}}{Q_1} \\ &= \frac{h_1 - h_2 + h_1 - h_4}{h_3 - h_2} \\ \eta_t &= 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \end{aligned}$$

Perhitungan efisiensi turbin gas dengan menggunakan besaran entalpi udara dapat digunakan tabel gas atau nomogram sifat sifat udara pada lampiran I.

Contoh :

Proses turbin gas berlangsung sebagai berikut: Aliran massa udara adalah 10 lb/det, suhu udara masuk kompressor $T_1 = 530$ R, suhu masuk turbin $T_3 = 2060$ R dan perbandingan tekanan keluar dan masuk kompressor = 6. Hitung efisiensi turbin gas, kerja kompressor, kerja turbin, kalor diberikan dan kalor dibuang.

Jawaban :

Dari nomogram sifat sifat udara lampiran I persoalan diatas dapat ditabelkan seperti tabel 5.1:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{Pr_2}{Pr_1} = \text{atau } Pr_2 = Pr_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = (2,679) (6) = 16,074$$

dan
$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{Pr_3}{Pr_4} = \text{atau } Pr_4 = Pr_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right) = 406,65 * 6^{-1} = 67,775$$

Tabel 5. 1 Soal Perhitungan efisiensi turbin gas

Posisi	T (°R)	Pr	H (Btu/lb)
1	530	2,679	31,21
2	880,4	16,074	116,06
3	2060	406,65	426,22
4	1303,8	67,775	222,60

Kerja kompressor $L_C = L_{1-2} = 10 (116,06 - 31,21) = 848,5$ Btu / det.

Kalor diberikan $Q_1 = 10 (426,22 - 116,06) = 3101,6$ Btu / det.

Kerja turbin $L_T = L_{3-4} = 10 (426,22 - 222,60) = 2306,2$ Btu / det.

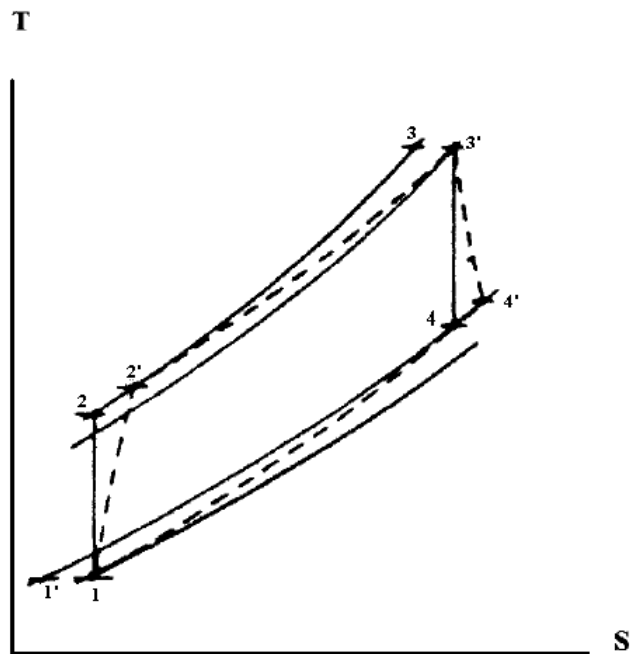
Kalor dibuang $Q_2 = 10 (222,60 - 31,21) = 1913,9$ Btu / det.

Kerja turbin gas $L_{TG} = 3101,6 - 1913,9 = 1187,7$ Btu/det.

Effisiensi thermis turbin gas $\eta_t = \frac{1187,7}{3101,6} = 38,2\%$

Kondisi dalam contoh diatas adalah kondisi ideal yang tidak memperhitungkan adanya kerugian didalam compressor, didalam ruang bakar maupun didalam turbin. Untuk memberikan gambaran tentang turbin gas yang sebenarnya (actual) yaitu dengan memperhatikan adanya kerugian dirnasing masing tempat yang dilalui udara dan gas panas, dapat dilihat dalam gambar 1.3 dengan penjelasan sebagai berikut:

Proses kompresi yang secara ideal berlangsung pada entropy konstan (adiabatic), pada kenyataannya terdapat gesekan gesekan dengan sudu² compressor sehingga suhu pada akhir kompresi menjadi lebih tinggi (dari titik 2 menjadi titik 2'). Aliran udara didalam ruang bakar yang secara ideal berlangsung pada tekanan konstan, karena adanya gesekan gesekan dengan dinding ruang bakar maka tekanan pada akhir ujung ruang bakar/sisi masuk turbin menjadi



Gambar 5. 3 Diagram Temperature -Entropy untuk turbin gas ideal dan actual

lebih tinggi (dari titik 4 menjadi titik 4'). Gesekan gesekan yang terjadi pada laluan gas panas keluar turbin dan gesekan gesekan pada laluan udara masuk compressor mengakibatkan tekanan gas panas keluar turbin tidak sarna dengan tekanan udara masuk compressor (titik 4' ke titik 1).

Dengan adanya kerugian kerugian yang tetjadi didalam kompressor, ruang bakar, turbin dan laluan udara/gas panas maka didefinisikan effisiensi di masing masing komponen tersebut:

$$\text{Effisiensi kompressor } \eta_c = \frac{\text{Kerja kompressor ideal } L_{Ci}}{\text{Kerja koessor aktual } L_{Ca}} = \frac{L_{Ci}}{L_{Ca}}$$

$$\text{Effisiensi turbin } \eta_t = \frac{\text{Kerja turbin aktual } L_{Ca}}{\text{Kerja turbin ideal } L_{Ci}}$$

$$\text{Effisiensi thermis actual } \eta_{TGa} = \frac{\text{Kerja turbin gas aktual}}{\text{Kalor yang diberikan}}$$

dimana kerja turbin gas actual $L_{TG} = L_{Ta} - L_{Ca}$

Kerugian akibat penurunan tekanan didalam ruang bakar biasanya ditunjukkan didalam %, ditulis sebagai berikut:

$$\frac{p_2 - p_{3'}}{p_2} = \frac{p_3 - p_{3'}}{p_3} = \frac{\Delta p_A}{p_2}$$

Kerugian akibat gesekan pada laluan gas buang dan laluan udara masuk ditulis sebagai berikut:

$$\frac{p_{4'} - p_1}{p_1} = \frac{p_4 - p_1}{p_1} = \frac{\Delta p_R}{p_1}$$

Misalkan dari contoh soal diatas terdapat $\eta_c = 84\%$, $\eta_t = 88\%$, $\frac{\Delta p_A}{p_2} = 4\%$, $\frac{\Delta p_R}{p_1} = 6\%$ sedang perbandingan tekanan kompresor tetap = 6.

Jadi
$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{2'}}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}} = r_{pc} = 6$$

$$\begin{aligned} \frac{p_{3'}}{p_4} = \frac{p_{3'}}{p_{4'}} &= \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \left(\frac{1 - \frac{p_2 - p_1}{p_2}}{1 + \frac{p_{4'}}{p_1}} \right) \\ &= \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \left(\frac{1 - \frac{\Delta p_A}{p_2}}{1 + \frac{\Delta p_R}{p_1}} \right) \\ &= \frac{Pr_{3'}}{Pr_4} = r_p T \\ &= 6 \left(\frac{1 - 0,04}{1 + 0,06} \right) = 5,43 \end{aligned}$$

Contoh persoalan diatas yang telah memperhitungkan kerugian kerugian dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Kerja compressor:

$$L_{Ca} = m(h_2 - h_1) \rightarrow P_{r2} = P_{r1} \cdot r_{pc} = (2,679)(6) = 16.074$$

$$h_2 = 116,06 \text{ Btu/lb,}$$

$$T_2 = 880,4 \text{ R}$$

$$\eta_C = \frac{L_C}{L_{Ca}} = \frac{m(h_2 - h_1)}{m(h_2' - h_1)} = 0,84$$

$$h_2' = \frac{h_2 - h_1}{\eta_C} + h_1 = \frac{116,06 - 31,21}{0,84} + 31,21 \\ = 132,41 \text{ Btu/lb.}$$

$$L_{Ca} = 10 (132,41 - 31,21) = 1012,1 \text{ Btu/det}$$

2. Kalor yang diberikan:

$$Q_{Aa} = m(h_3 - h_2') = 10(426,22 - 132,41) = 2938,1 \text{ Btu/det}$$

3. Kerja turbin:

$$L_{Ta} = m(h_3 - h_4) \rightarrow Pr_3' = Pr_3 ; Pr_4 = \frac{Pr_3}{r_{pT}} = \frac{406,65}{5,43} = 75,0$$

$$h_4 = 231,78; T_4 = 1339,2R$$

$$\eta_T = \frac{L_{Ta}}{L_T} = \frac{m(h_3 - h_4')}{m(h_3 - h_4)} \\ h_4' = h_3 - \eta_T(h_3 - h_4) \\ = 426,22 - 0,88(426,22 - 231,78) \\ = 255,12 \text{ Btu/lb.} \\ T_{4'} = 1428,7R$$

$$L_{Ta} = 10(426,22 - 255,12) = 1711,0 \text{ Btu/det.}$$

Tabel 5. 2 Besaran dari masing2 titik posisi dalam turbin gas sesuai contoh soal

Posisi	T (°R)	Pr	H (Btu/lb)
1	530	2,679	31,21
2	880,4	16,074	116,06
2'	946,8	20.875	132,41
3	2060	406,45	426,22
3'	2060	406,65	426,22
4	1339,2	75,0	231,78
4'	1428,7	95,95	255,12
1'	530	2,679	31,21

4. Kalor dibuang:

$$Q_{Ra} = m(h_4 - h_1) = 10(255,12 - 31,21) = 2239,1 \text{ Btu/det}$$

5. Kerja turbin gas actual $L_{TGA} = Q_{Ao} - Q_{Ra} = 2938,1 - 2239,1 = 699,0 \text{ Btu/det}$

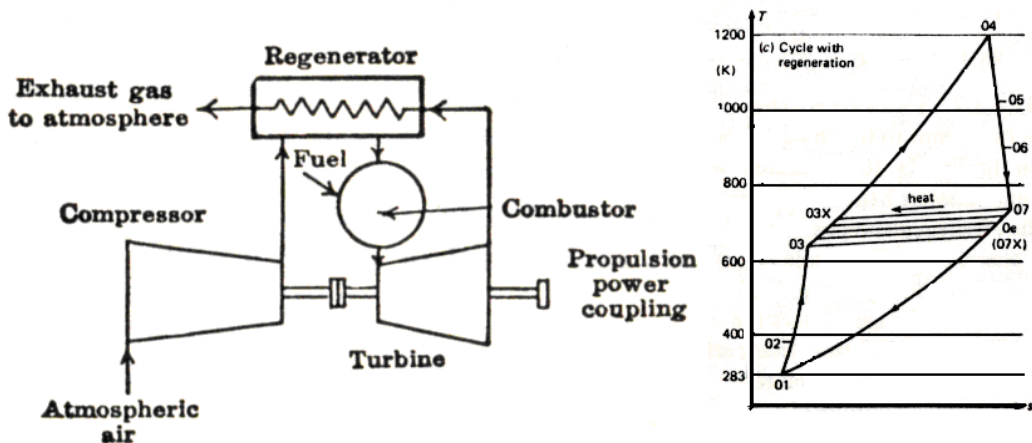
Jadi berkurangnya efisiensi dari kondisi ideal adalah $0,382 - 0,238 = 14,2\%$

Untuk mempermudah jalannya perhitungan berkenaan dengan nomogram sifat-sifat udara dilakukan pentabelan sebagaimana terlihat dalam tabel 5.2.

5.4. SIKLUS BRAYTON YANG DIMODIFIKASI

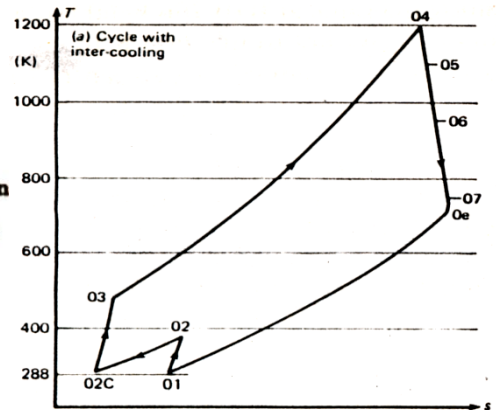
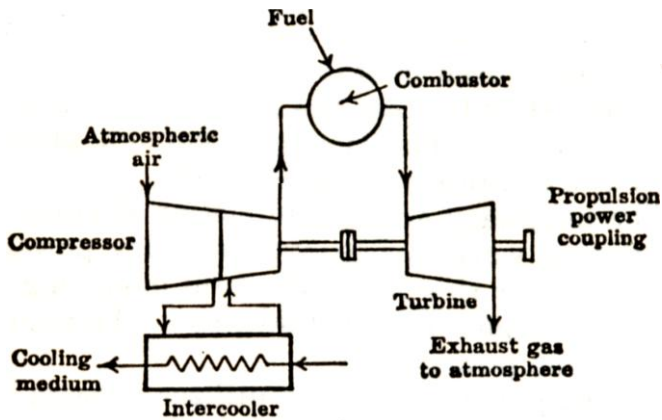
Untuk memperbaiki efisiensi turbin gas, terdapat berbagai usaha perbaikan yang secara termodinamik dapat dilakukan. Perbaikan tersebut berupa memodifikasi siklus Brayton menjadi siklus-siklus yang dikenal dengan siklus regenerasi, siklus intercooling, siklus precooling, siklus reheat dan siklus gabungan antara siklus yang satu dengan siklus yang lainnya.

Siklus regenerasi. Siklus ini (Gambar 5.4) diartikan sebagai usaha memanfaatkan gas panas keluar turbin yang suhunya masih tinggi untuk digunakan sebagai pemanas udara keluar compressor sebelum masuk ruang bakar. Dengan demikian jumlah bahan bakar yang diberikan menjadi lebih sedikit untuk daya mampu yang sama, atau dengan kata lain efisiensi turbin gas tersebut menjadi lebih baik. Proses penyerahan kalor dari gas panas keluar turbin ke udara keluar compressor dapat dilihat pada diagram TS sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 1.4b dimana besarnya nilai kalor yang diserahkan merupakan luas bagian yang diarsir 03-03X-07-07X.

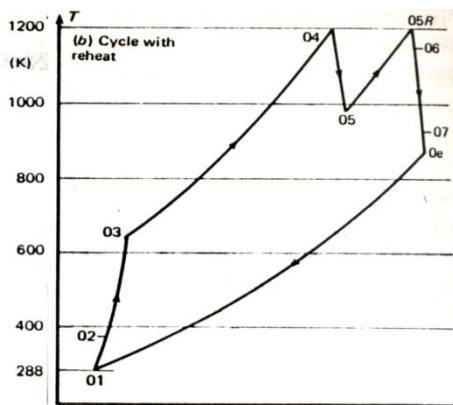
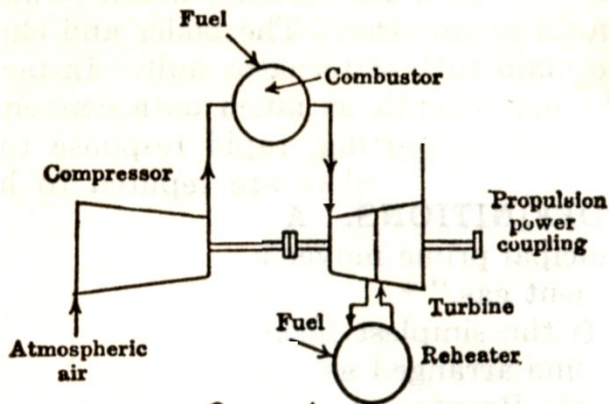


Gambar 5. 4 Turbin gas dengan siklus regenerasi

Siklus intercooling. Siklus ini (Gambar 5.5) dimaksudkan sebagai usaha untuk mengurangi besarnya energi yang diperlukan untuk mengkompresi udara. Kompresi udara berlangsung secara bertingkat dimana udara keluar dari compressor tingkat pertama didinginkan dulu sebelum masuk compressor berikutnya. Proses pengurangan energi untuk kompresi dapat dilihat pada diagram TS Gambar 1.5b, dimana besarnya energi yang bisa dihemat merupakan luas bagian yang ditutup oleh garis 01-02-02C.



Gambar 5. 5 Turbin gas dengan siklus intercooling

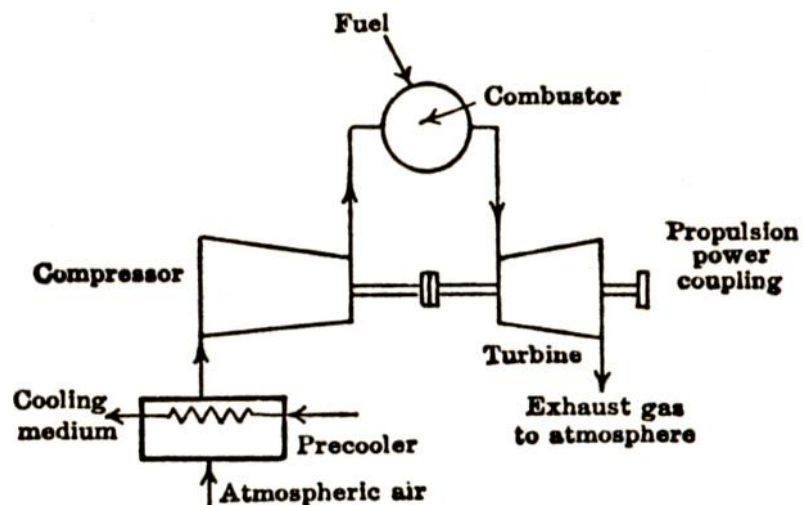


Gambar 5. 6 Siklus Reheat

Siklus reheat. Didalam siklus ini turbinnya terdiri dari dua tingkat, yaitu tekanan tinggi dan tekanan rendah. Gas panas keluar turbin tekanan

tinggi yang mengandung udara dalam jumlah besar diberi bahan bakar kembali (Gambar 5.6) sehingga menambah besarnya entalpi gas panas tersebut dan dengan demikian akan mampu memberikan daya yang lebih besar pada turbin tekanan rendahnya. Proses ekspansi gas panas didalam turbin dan pemberian bahan bakar kembali dapat dilihat pada diagram TS Gambar 5.6 b yaitu berupa garis 05-05R-0_e.

Siklus precooling (Gambar 5.7) Siklus ini didasari atas sifat udara yang akan mempunyai kerapatan lebih tinggi pada suhu yang rendah dibanding pada suhu yang tinggi.

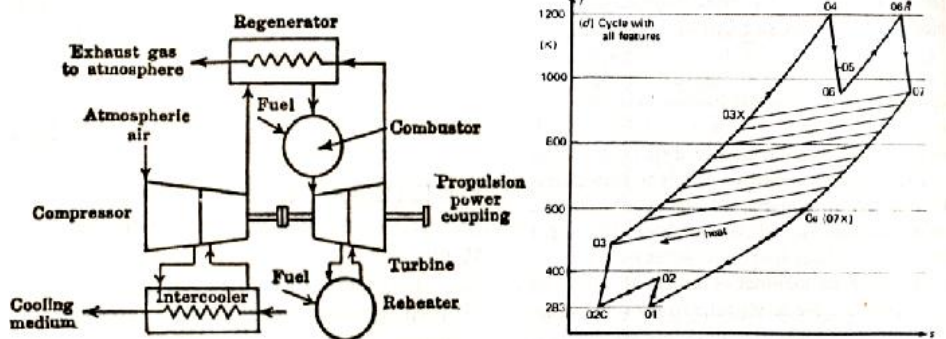


Gambar 5. 7 Turbin gas dengan precooling

Dengan demikian akan menambah jumlah udara yang masuk kedalam compressor dan dengan sendirinya akan menambah besarnya daya mampu turbin gas tersebut. Pada lokasi dengan kelembaban yang rendah proses pendinginan semacam ini dapat dilakukan dengan menginjeksikan kabut air ke sisi masuk compressor, namun teknik ini akan terbatas pada besarnya selisih suhu “dry bulb dan wet bulb” udaranya. Pendinginan dengan menggunakan teknik pendinginan (chiller) juga dapat dilakukan, namun secara keseluruhan hanya akan menjadi efisien apabila energi yang

digunakan untuk mendinginkan menggunakan kalor yang keluar dari gas panas keluar turbin.

Siklus gabungan. Dari beberapa modifikasi siklus Brayton yang telah dikemukakan diatas digabungkan sedemikian rupa, sehingga membentuk satu kesatuan secara skematis yang dapat dilihat dalam Gambar 5.8 dan proses yang terjadi dapat dilihat didalam diagram TS Gambar 5.8. Dengan siklus ini diharapkan efisiensi yang rendah yang dimiliki turbin gas dapat lebih diperbaiki lagi.



Gambar 5. 8 Siklus gabungan dari beberapa modifikasi siklus Brayton.

5.5. KLASIFIKASI TURBIN GAS.

Turbin Gas dapat diklasifikasikan dari berbagai segi, baik dari segi konstruksi maupun segi penggunaannya.

Dari segi konstruksi Turbin Gas dibagi menjadi:

- Turbin Gas dengan compressor sentrifugal. Disini udara atmosfer dihisap masuk kedalam compressor melalui laluan sekitar sumbu poros dan keluar compressor dengan arah tegak lurus sumbu poros. Besarnya tekanan yang diperoleh tergantung besarnya putaran dan diameter luar impellernya. Makin besar putaran dan diameter makin besar tekanan yang diperoleh.

- Turbin Gas dengan compressor axial. Disini udara atmosfer dihisap dan masuk kedalam compressor melalui saluran melingkar poros. Sudu sudu komprssor yang terpasang melingkar poros dan dengan kecepatan yang tinggi mendorong udara bergerak kedepan. Tekanan yang dperoleh tergantung banyaknya jumlah tingkat dan kecepatan putaran sudu.

Dari segi penggunaanya turbin gas dibagi menjadi:

- Turbin Gas Aeroengine, yaitu turbin gas untuk mesin pesawat. Putarannya dibuat tinggi untuk mendapatkan berat yang ringan.
- Turbin Gas Heavy Duty, adalah turbin gas untuk pembangkit listrik, untuk penggerak compressor pada saluran pipa gas alam, dan untuk keperluan lainnya yang bersifat operasi kontinnue. Biasanya turbin gas semacam ini mempunyai putaran yang relative rendah dan berat yang lebih.
- Turbin Gas Aeroderivative. Ini adalah turbin gas jenis mesin pesawat terbang, namun pada laluan gas panas keluar turbin dipasang turbin baru penggerak generator listrik.

5.6. BAGIAN UTAMA TURBIN GAS.

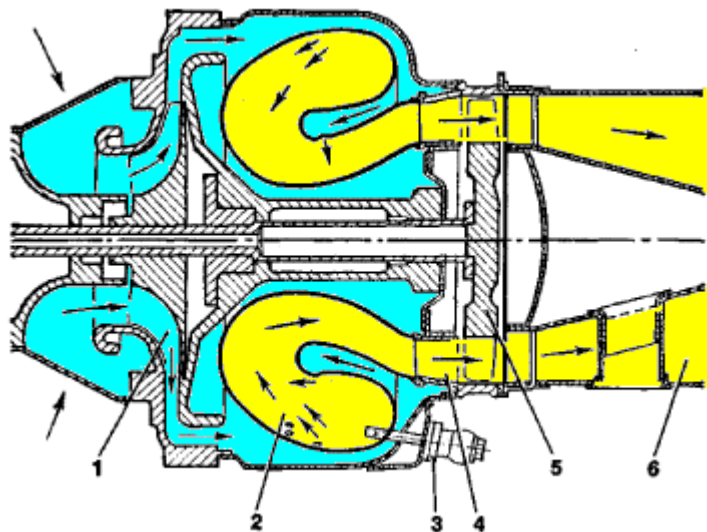
5.6.1. Kompresor

Ada dua jenis compressor yang digunakan didalam turbin gas yaitu compressor dengan aliran tegak lurus sumbu poros, disebut “compressor sentrifugal”, dan compressor dengan aliran sejajar sumbu poros, disebut compressor axial. Untuk turbin gas dengan kapasitas kecil digunakan compressor sentrifugal sedang untuk turbin gas dengan kapasitas besar digunakan compressor axial.

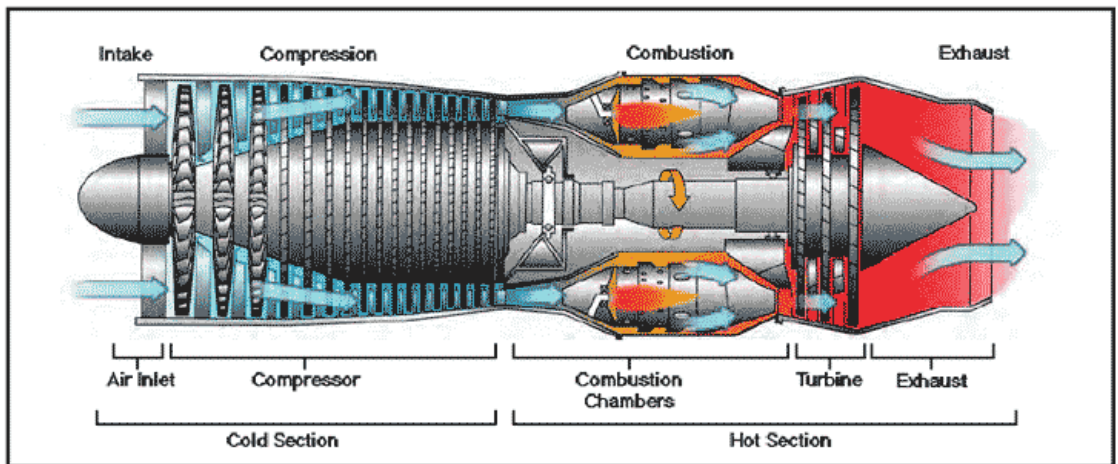
Pada compressor sentrifugal (Gambar 5.9), udara masuk pada bagian tengah sejajar poros dan keluar tegak lurus poros. Udara yang masuk kedalam compressor akan terlempar keluar akibat gaya sentrifugal yang ditimbulkan oleh gerak putar rotor.

Pada compressor axial (Gambar 5.10) udara mengalir sejajar poros. Gerak sudu sudu rotor akibat berputarnya rotor menyebabkan udara terlempar kebelakang. Kecepatan gerakan sudu menyebabkan kecepatan aliran udara bertambah tinggi atau dengan kata lain mempunyai tekanan dinamis yang lebih tinggi. Tekanan dinamis ini kemudian dirubah menjadi tekanan statis didalam sudu tetap (stator vane). Tekanan yang diperoleh didalam kompressor axial tergantung dari jumlah tingkat dan kecepatan putar rototr. Jumlah udara yang masuk kedalam compressor diatur dengan menggunakan Inlet Guide Vane.

Gambar 5.9 adalah sebuah turbin gas dengan compressor sentrifugal sedang Gambar 5.10 adalah sebuah turbin gas dengan compressor axial. Kedua jenis compressor ini disebut sebagai compressor dinamis karena pembentukan tekanan udara keluar compressor diperoleh dengan menaikkan kecepatannya.



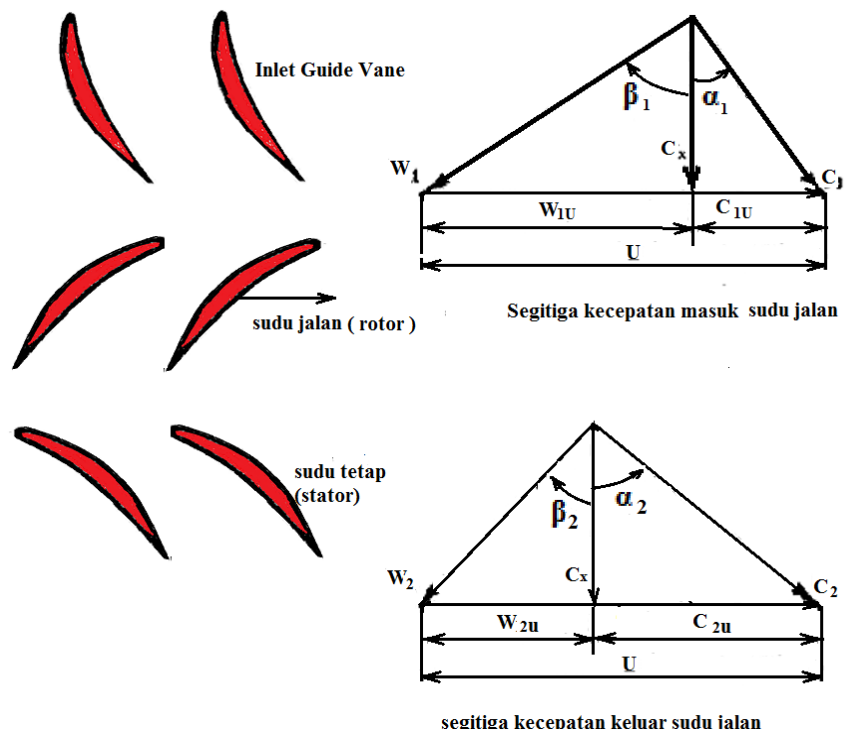
Gambar 5. 9 Gas-turbine engine: (1) centrifugal compressor, (2) combustion chamber, (3) fuel injector, (4) nozzle, (5) turbine rotor, (6) exhaust pipe



Gambar 5. 10 Turbin gas dengan kompressor aksial dengan bagian bagian yang terkait

a) Kompresor aksial

Untuk menjelaskan bagaimana bekerjanya sebuah compressor aksial secara matematis, diambil satu bagian dari tingkat sudu compressor sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar. 5.11. Disini terjadi peningkatan tekanan dari p_1 menjadi p_2 , peningkatan entalpi dari h_{01} menjadi h_{02} , dan perubahan kecepatan dari C_1 menjadi C_2 .



Gambar 5. 11 Segi tiga kecepatan udara masuk dan keluar sudu jalan compressor aksial

Oleh karena didalam compressor relative tidak ada penambahan kalor maka hukum termodinamika pertama dapat ditulis:

$$L = G \left[\left(u_2 + \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{C_2^2}{2g} \right) - \left(u_1 + \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{C_1^2}{2g} \right) \right]$$

dimana:

L = Kerja yang diberikan kepada compressor kgm

G = Berat udara yang mengalir kg

u = energi dalam dari udara kgm

p = tekanan.kg/m²

γ = kerapatan udara kg/m³

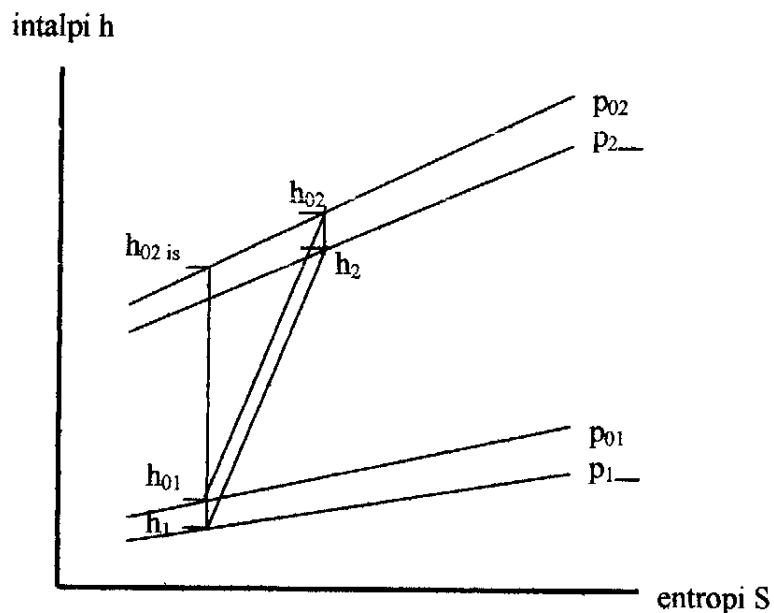
C = kecepatan aliran m/det

$$g = \text{gravitasi m/det}^2$$

$u + \frac{p}{\gamma}$ dikenal sebagai intalpi dan diberi notasi h berlaku untuk fluida yang diam, sedang untuk fluida yang bergerak dikenal adanya "stagnan intalpi" dan diberi notasi h_0 :

$$\begin{aligned} h_0 &= h + \frac{C^2}{2g} \\ &= u + \frac{p}{\gamma} + \frac{C^2}{2g} \end{aligned}$$

Gambar 5.12 menunjukkan perubahan intalpi dan perubahan tekanan pada proses kompresi udara dari p_1 menjadi p_2 .



Gambar 5. 12 Diagram hS proses peningkatan tekanan dari tekanan awal p_1 ketekanan p_2

Proses kompresi udara yang terjadi didalam compressor ideal (Gambar 5.12) berlangsung secara adiabatic (entropi konstan),

mengakibatkan naiknya entalpi dari h_{01} menjadi h_{02is} . Pada kenyataannya yang ideal tsb tidak pernah terjadi, disebabkan karena adanya gesekan dengan sudu sudu, maka suhunya menjadi lebih tinggi. Karena itu besarnya entalpi udara juga menjadi lebih tinggi, dan entropy juga menjadi tidak konstan lagi sebagaimana ditunjukkan oleh garis h_1-h_2 dan $h_{01}-h_{02}$

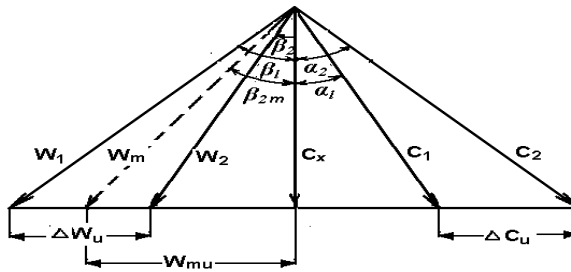
Effisiensi kompresi:

$$\eta = \frac{\text{kerja kompresi isentropis}}{\text{kerja kompresi aktual}}$$

$$= \frac{h_{02is} - h_{01}}{h_{02} - h_{01}}$$

Proses kompresi udara berjalan secara dinamis yaitu adanya pertambahan kecepatan pada sudu jalan dan perubahan kecepatan menjadi tekanan statis pada sudu tetap. Bertambahnya kecepatan didalam sudu jalan (rotor) maupun perubahan kecepatan menjadi tekanan statis didalam sudu tetap (stator) dapat dilihat didalam Gambar 5.13. Didalam Gambar tersebut terlihat dua buah segitiga kecepatan, masing masing untuk udara masuk sudu jalan dan udara keluar sudu jalan.

Pada segitiga kecepatan masuk sudu jalan terdapat kecepatan absolute masuk sudu jalan C_1 yang membentuk sudut α_1 , kecepatan relatif masuk sudu jalan W_1 yang membentuk sudut β_1 dan kecepatan keliling sudu U . Pada segitiga kecepatan keluar sudu jalan terdapat kecepatan absolute keluar sudu jalan C_2 yang membentuk sudut α_2 , kecepatan relatif keluar sudu jalan W_2 yang membentuk sudut β_2 dan kecepatan keliling sudu U

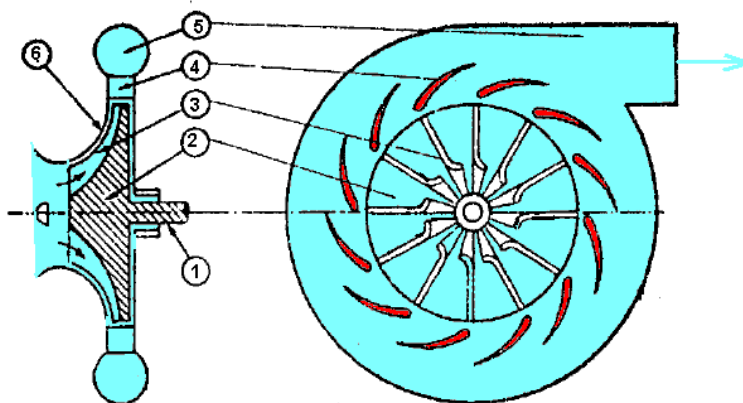


Gambar 5. 13 Segitiga kecepatan sisi masuk dan keluar sudu jalan yang digabung

Jika kedua segi tiga kecepatan tersebut digabung menjadi satu maka akan nampak sebagaimana digambarkan didalam Gambar 5.13.

b) Kompresor sentrifugal

Kompresor sentrifugal sebagaimana digarnbarkan didalam Gambar 5.14, mempunyai bagian bagian utama sebagaimana terlihat didalam gambar.

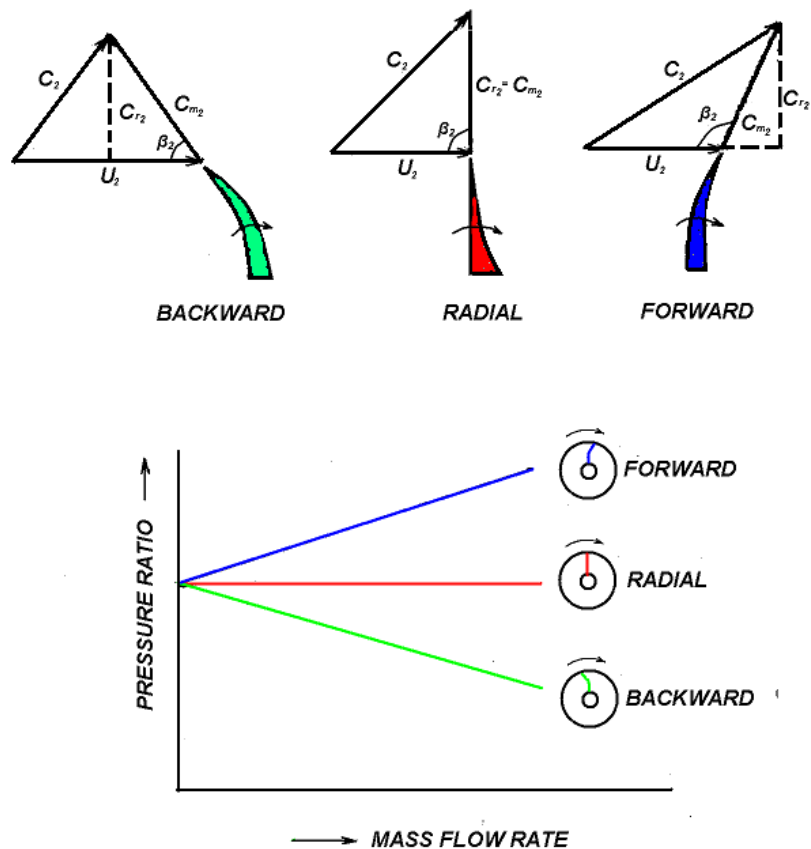


Gambar 5. 14 Bagian bagian compresor sentrifugal:

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1. Poros. | 4. Sudu diffusor |
| 2. Cakra impeller. | 5. Ruang pengumpul |
| 2. Sudu impeller. | 6. Rumnh / Casing |

c) Karakteristik Kompresor.

Pada compressor sentrifugal sudut keluaran sudu impeller akan menentukan bentuk kurva karakteristik. sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 5.15. Sudut sudu impeller 90° akan memberikan kurva mendatar sedangkan untuk sudut yang kurang atau lebih dari 90° akan memberikan kurva miring keatas atau kebawah. Disebabkan adanya kerugian kerugian didalam impeller berupa gesekan dan benturan maka karakteristik tersebut berubah tidak lagi membentuk garis lurus. tetapi membentuk garis lengkung, dan untuk impeller yang sudunya membentuk sudut 90° karakteristiknya seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.16.

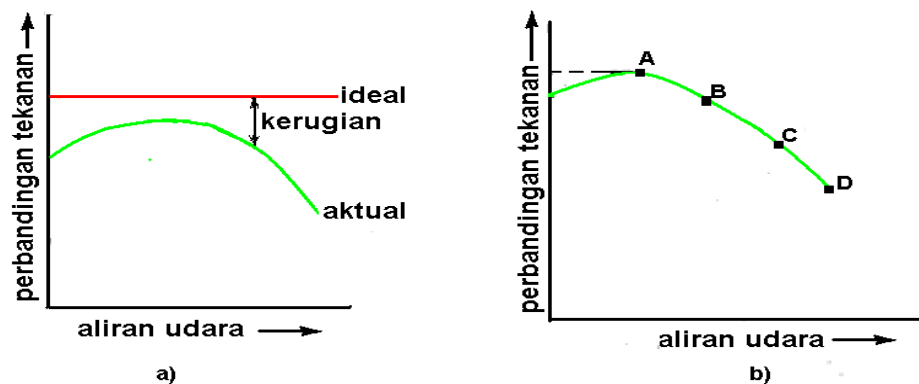


Gambar 5. 15 Bentuk sudu impeller dan karakteristiknya

Karakteristik tersebut adalah merupakan karakteristik putaran konstan. Bila sekarang kompressor beroperasi pada titik C (Gambar 5.16)

kemudian sisi keluar kompressor berangsur angsur ditutup maka titik kerja kompressor akan bergeser kekiri ketitik B, dan seterusnya ketitik A yaitu pada perbandingan kompressi yang paling tinggi.

Penutupan selanjutnya akan mengakibatkan hal yang sebaliknya yaitu perbandingan kompressi justru akan menurun. dan pada kondisi semacam ini bisa terjadi tekanan pada sisi masuk menjadi lebih tinggi dari sisi keluarnya. Selanjutnya dalam waktu yang singkat kompressor akan mendorong udara baru lagi, tekanan akan naik. dari titik terendah ketitik maximum dan turun lagi ketitik kerja disebelah kiri titik maximum. Demikian terus berulang, udara tekanannya akan naik dari tekanan yang paling rendah menuju titik maximum, kembali turun setelah mencapai titik A. Peristiwa semacam ini disebut “surging”.



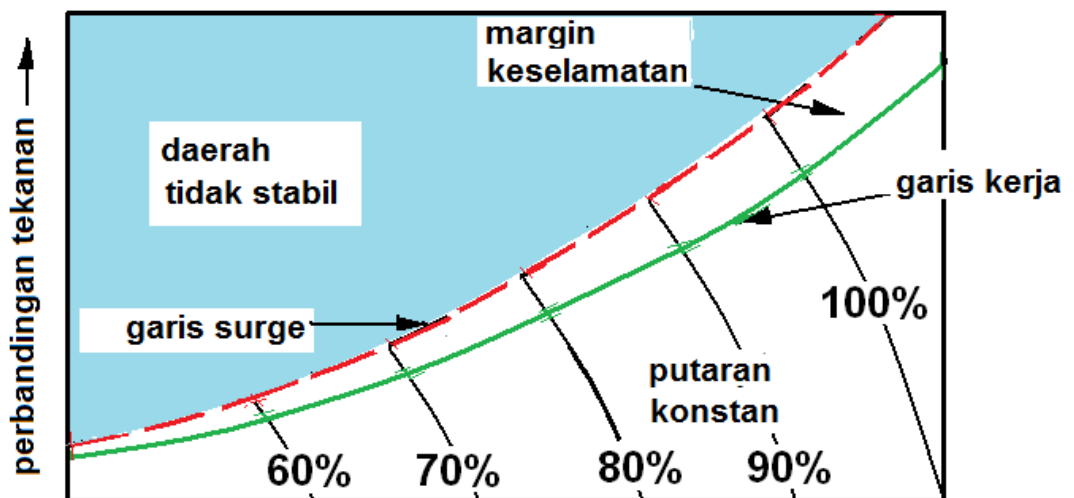
Gambar 5. 16 Karakteristik kompressor:

- a) *Karakteristik ideal dan aktual*
- b) *Titik titik kerja kompressor*

Kondisi tidak stabil ini bisa terjadi pada kompressor dengan perbandingan tekanan yang tinggi. yang secara pasti akan menyebabkan kerusakan fisik disebabkan oleh karena beban tumbukan dan getaran frekuensi tinggi.

Dengan dasar tersebut diatas maka kopressor tidak boleh dioperasikan pada titik kerja melebihi perbandingan kompresi maksimum (disebelah kiri titik A). Sebaliknya bila hambatan aliran diperkecil sehingga aliran udara bertambah besar, maka titik kerja compressor akan bergeser kekanan. Hal ini disebabkan dengan bertambahnya aliran maka perbandingan kompresi akan bertambah kecil dan kerapatan udara keluar kompressor menjadi lebih rendah, kecepatan udara keluar impeller menjadi semakin besar dan sudut masuk diffuser juga bertambah besar, yang pada akhirnya akan mencapai kondisi yang disebut "*choking*" yaitu kondisi yang tidak memungkinkan terjadinya pertambahan aliran (titik D)

Karakteristik kompressor dengan berbagai putaran konstan diperlihatkan didalam Gambar 5.17. Pada karakteristik kompressor tersebut terdapat garis kerja (working line) dan garis surge. Dalam keadaan normal, pengoperasian kompressor akan terletak pada garis kerjanya, tetapi oleh karena suatu sebab misalnya oleh karena kompressor kotor, garis kerja bisa bergeser menuju garis surge melampaui daerah safety margin.



Gambar 5. 17 Karakteristik compressor axial dengan berbagai putaran konstan

d) Stall dan surge

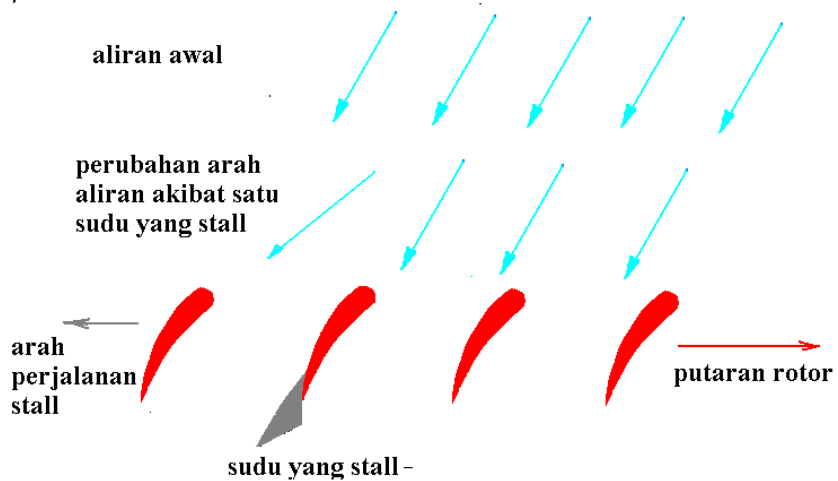
Hal yang paling berpengaruh terhadap unjuk kerja kompresor aksial adalah stall, yaitu berkurangnya jumlah aliran udara. Pada saat start atau pada putaran rendah kenaikan tekanan yang kecil terjadi dari sudu tingkat pertama sampai sudu tingkat terakhir sebagaimana desainnya. Jadi pada putaran rendah, dikarenakan belum terbentuknya tekanan pada tingkat terakhir, mengakibatkan berlebihnya kecepatan udara daripada desainnya, dan ini bisa mengakibatkan choking seperti sudah diuraikan diatas. Choking cenderung membatasi besarnya aliran yang memungkinkan terjadinya stall. Stall pada putaran rendah terjadi pada sudu tingkat pertama sedang stall pada putaran tinggi terjadi pada sudu tingkat akhir karena berkurangnya laju aliran udara yang berarti turunnya kecepatan.

Investigasi terhadap sudu sudu yang terkena stall menunjukkan bahwa stall merupakan suatu fenomena yang berulang ulang (periodic). Semua sudu tidak mengalami stall dalam waktu yang bersamaan, tetapi satu sudu yang mengalami stall akan menularkan kejadian tersebut kepada sudu yang lainnya dalam baris yang bersangkutan dengan arah yang berlawanan dengan arah putaran. Kecepatan penularan ini lebih rendah dari kecepatan putaran, karena itu stall akan tampil dengan arah sesuai putaran namun dengan arah kecepatan yang lebih rendah. Putaran ini disebut sebagai "putaran stall"

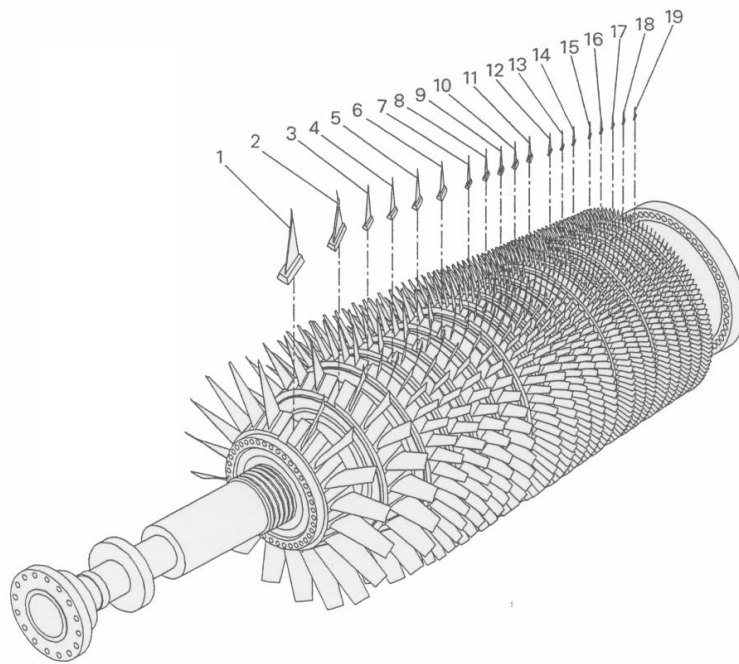
Didalam susunan sudu sudu yang beroperasi didekat kondisi stall, suatu perubahan kondisi yang kecil dan permanen, akan mengakibatkan sebuah sudu mengalami stall. Apabila ada sebuah sudu mempunyai suatu kelainan kecil dibanding sudu lainnya maka ia akan bereaksi pertama kali. Lalu, udara yang mengandung permukaan sudu yang stall akan menjadi hambatan, dan karenanya aliran udara diarahkan kepada laluan sudu dibelakangnya yang berarti ia akan mendapat tambahan aliran sebesar i,

sedangkan sudu yang pertama tadi akan mengalami pengurangan aliran sebesar i . Pertambahan aliran pada sudu dibelakang sudu pertama tadi mungkin akan melebihi kondisi desain dan dengan sendirinya akan juga mengalami stall. Sudu yang stall akan membatasi aliran dan akan menularkan kondisi stall tsb kesudu dibelakangnya. Demikian seterusnya stall terjadi pada seluruh baris sudu tsb.

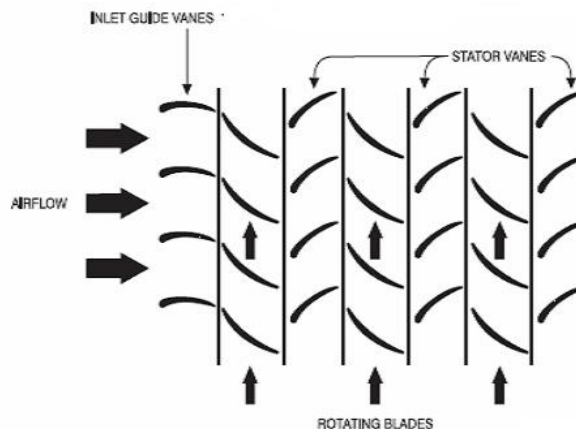
Jumlah aliran pada laluan sudu yang stall akan berkurang, karena itu energi transfer yang terjadi padanya juga berkurang. atau dengan kata lain efisiensi kompresor menjadi lebih rendah. Diluar itu stall yang berlebihan akan mengakibatkan ketidak stabilan dan mengurangi jumlah aliran yang banyak serta dapat mengakibatkan terjadinya surging.



Gambar 5. 18 Proses penularan stall dari satu sudu kesudu lainnya



Gambar 5. 19 Rotor compressor axial



Gambar 5. 20 Cara kerja compressor axial

5.6.2. COMBUSTION CHAMBER

Combustion chamber atau ruang pembakaran sebuah turbin gas adalah sebuah ruang dimana bahan bakar mengalami proses secara berurutan sebagai berikut :

- Percampuran dengan udara sehingga membentuk campuran yang mudah terbakar.
- Penyalaan.
- Pembentukan nyala api.
- Pendinginan nyala api dengan udara.

Untuk memenuhi kebutuhan diatas pada Combustion chamber terletak beberapa peralatan sebagai berikut:

- a. Nozzel bahan bakar yang berfungsi untuk memasukkan bahan bakar kedalam ruang bakar dalam bentuk butir butir kecil (kabut) yang memungkinkan bahan bakar menjadi mudah terbakar.
- b. Ignitor atau busi yang berfungsi sebagai pemantik nyala api pertama kali.
- c. Combustion liner berfungsi sebagai mantel / kantong pembakaran dimana didalamnya terjadi percampuran antara nyala api dan udara kompresor untuk menjadi gas panas sebagai penggerak turbin.

Selanjutnya combustion chamber harus memenuhi syarat sebagai berikut:

- Memungkinkan terjadinya pembakaran sempurna didalamnya. Ketidak sempurnaan proses pembakaran akan berakibat langsung terhadap peningkatan pemakaian bahan bakar dan penurunan efisiensi termis. Juga dapat berakibat terbentuknya deposit karbon yang akan mempengaruhi bentuk aliran gas panas.
- Penurunan tekanan udara yang mengalir didalamnya harus serendah mungkin. (lihat bab I).
- Penyalaan bahan bakar harus dapat terjadi dengan mudah meskipun kondisi atmosfernya berubah ubah, khususnya untuk mesin pesawat terbang.
- Suhu dan kecepatan gas panas masuk turbin harus dapat dibuat sama sehingga distribusi panasnya dapat merata.

Bentuk combustion chamber atau ruang bakar sesuai syarat syarat diatas harus memiliki satu bagian ruang yang memungkinkan terjadinya penyalaan bahan bakar secara cepat dan kontinue pada setiap tingkat daya yang dikehendaki. Pada bagian ruang ini percampuran bahan bakar dan udara harus berada pada daerah stoichiometric sehingga dengan demikian diperoleh suhu tertinggi.

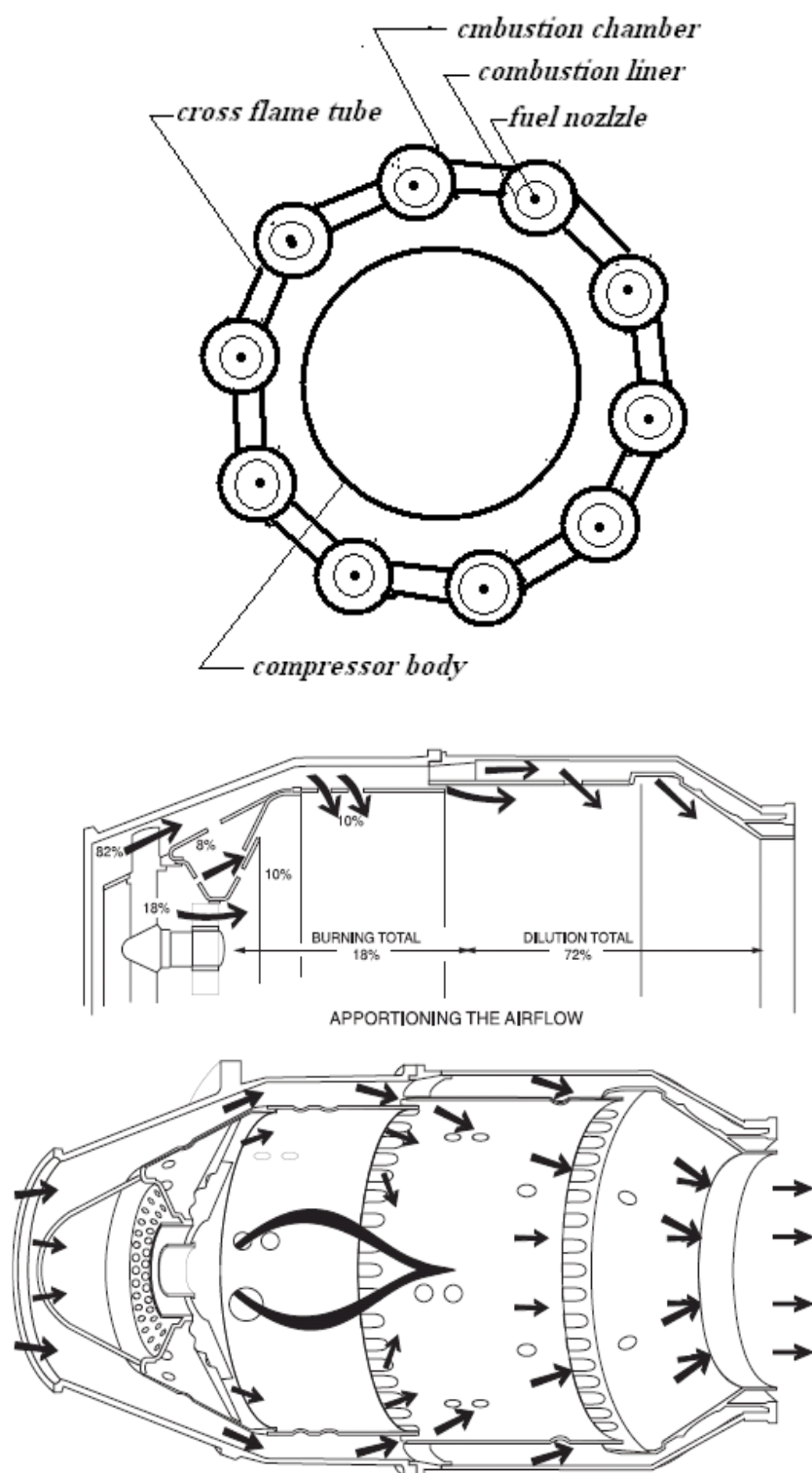
Campuran stoichiometrik untuk bahan bakar hidrokarbon berkisar pada satu bagian bahan bakar dan lima belas bagian udara, sehingga untuk perbandingan udara dan bahan bakar sebesar 60 : 1 hanya seperempat bagian udara yang melalui bagian ini. Bagian ini disebut sebagai zona primer atau zona reaksi. Sisa udara atau $\frac{3}{4}$ bagian udara yang tidak ikut dalam reaksi pembakaran dialirkan melalui lubang lubang pendingin yang ada pada combustion liner guna menurunkan suhu nyala api sehingga sesuai dengan kekuatan material bagian sisi masuk turbin.

Susunan yang dikehendaki sesuai uraian diatas dari beberapa type dan merek turbin gas secara sederhana dapat dilihat dalam Gambar 5.21. Dari Gambar 5.21 ini zona reaksi pembakaran atau disebut sebagai zona primer hanya diberi aliran udara yang secukupnya saja untuk proses pembakaran sempurna yaitu dalam perbandingan campuran stoichiometrik, sedang udara sisanya digunakan sebagai udara pendingin yang masuk pada lubang lubang combustion liner pada zona pendinginan dan percampuran (diluting and mixing zone). Combustion liner juga harus dilindungi dari kemungkinan terbakar oleh nyala api. karena itu udara yang masuk harus pula dapat berfungsi sebagai perisai, sehingga nyala api tidak akan menyentuh dinding liner tersebut. Casing luar berfungsi sebagai penumpu combustion liner sekaligus sebagai penyalur udara dari compressor masuk kedalam liner.

Nozzle Bahan Bakar

Ada dua jenis bahan bakar yang digunakan turbin gas yaitu bahan bakar cair dan bahan bakar gas, namun masing masing harus dapat bereaksi dengan udara pembakaran dengan baik sehingga menghasilkan nyala api yang baik pada setiap kondisi operasi turbin gas tersebut.

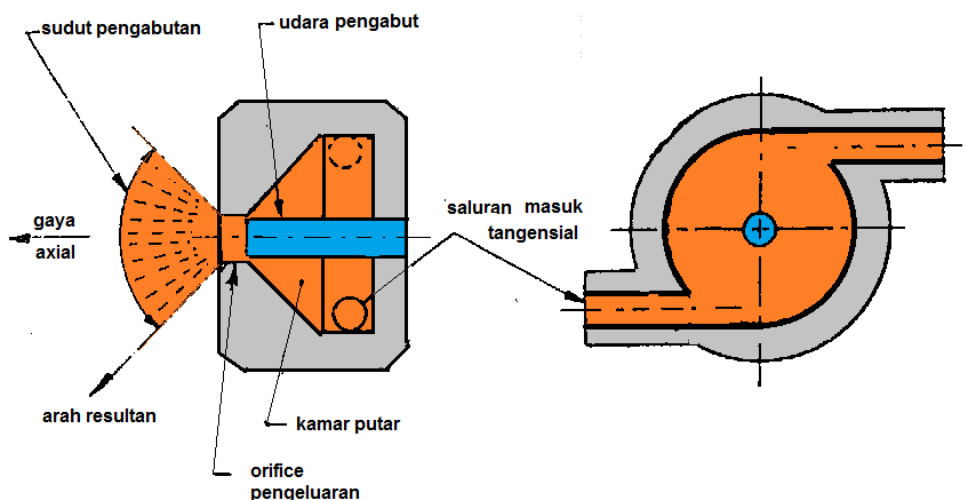
Bahan bakar gas akan memberikan kualitas pembakaran yang lebih baik dan dapat memberikan daya mampu maksimum yang lebih tinggi serta mampu memberikan umur bagian bagian panas (*hot part*) yang lebih panjang. Bahan bakar cair memerlukan penanganan yang lebih, untuk menghindari kerusakan bagian bagian panas, seperti penyaringan terhadap bahan bahan padat dan pemisahan terhadap unsur unsur kimia yang bersifat korosif pada suhu tinggi seperti vanadium dan sodium.



Gambar 5. 21 Konstruksi ruang bakar “can type” dan aliran udara didalam masing-masing

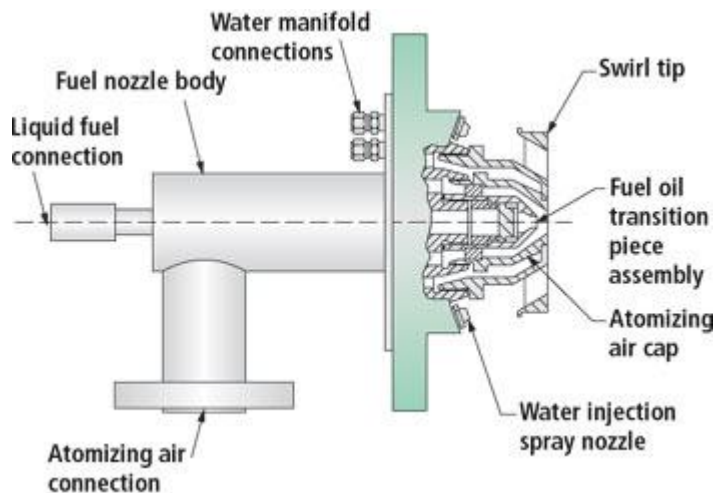
Untuk bahan bakar cair nozzle bahan bakar berfungsi sebagai alat yang sangat menentukan kualitas pembakaran didalam ruang bakar. Bahan bakar keluar nozzle harus segera dapat bereaksi dengan udara disekitarnya, karena itu nozzle harus mampu memecah bahan bakar menjadi butir butir kecil sehingga mudah menguap (atomization) dan bergerak memotong aliran udara disekitarnya.

Untuk mencapai tujuan tersebut bahan bakar diberi tekanan yang tinggi dan sebelum masuk kelubang nozzle arah alirannya dibuat tangensial sehingga ketika keluar dari lubang nozzle memiliki gerakan melingkar (sentrifugal) disamping gerakan kearah depan. Dengan demikian bahan bakar keluar nozzle akan membentuk kerucut kabut (Gambar 5.22).



Gambar 5. 22 Nozzle bahan bakar dengan pengabutan udara

Cara lain untuk mendapatkan pengabutan yang sebaik baiknya digunakan udara pengabut, yang memungkinkan bahan bakar bercampur dengan udara lebih dini sebelum bereaksi dengan udara didalam ruang bakar, karena itu pengabutan dengan udara akan menghasilkan kualitas penyalaan yang lebih baik, namun memerlukan alat tambahan berupa compressor udara tersendiri.



Gambar 5. 23 Nozle bahan bakar cair dengan pengabutan udara

Selanjutnya sebuah nozzle bisa dianggap mempunyai kualitas yang baik bila memenuhi hal hal sebagai berikut:

- a. Pengabutan dapat berlangsung pada aliran yang besar maupun yang kecil.
- b. Tidak ada bagian bagian yang bergerak pada nozzle.
- c. Bahan bakar dapat terdistribusikan secara merata kedalam aliran udara.
- d. Masing masing nozzle dapat memberikan jumlah dan bentuk aliran yang sarna, karena itu harus dibuat dengan ketelitian yang tinggi serta harus terus dikalibrasi secara periodic.

Ukuran besarnya lubang nozzle ditentukan oleh besarnya aliran bahan bakar dan tekanan yang diberikan kepadanya. Dengan menggunakan rumus dasar Bernouli dan dengan menganggap kecepatan aliran sebelum lubang nozzle jauh lebih kecil dibanding kecepatan keluar nonzzle, maka besarnya aliran dapat ditentukan sebagai berikut:

$$G = A\sqrt{2g\gamma\Delta p}$$

dimana:

G = berat aliran bahan bakar kg/det.

A = luas penampang lubang nozzle m^2 .

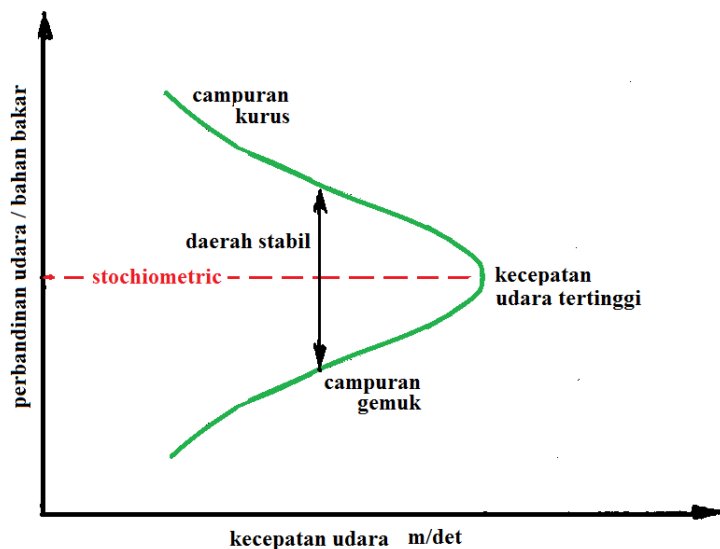
γ = berat jenis bahan bakar kg/m^3

g = percepatan gravitasi $9,81 m/det^2$.

Δp = selisih tekanan bahan bakar dan ruang bakar.

Jika perbedaan tekanan Δp tenendah yang menjamin pengabutan berjalan baik adalah $1.5 kg/cm^2$ maka untuk mendapatkan aliran dua kali diperlukan perbedaan tekanan empat kali atau $= 6 kg/cm^2$, dan untuk mendapatkaa aliran lima kali diperlukan tekanan $37,5kg/cm^2$.

Untuk mendapatkan pembakaran yang baik dan stabil. maka campuran bahan bakar dan udara harus berada pada suatu perbandingan tertentu yang berada diantara campuran gemuk dan campuran kurus. Campuran diantara kedua jenis campuran gemuk dan kurus disebut sebagai campuran "stoichiometric" (Gambar 5.24). Stabilitnya nyala api juga



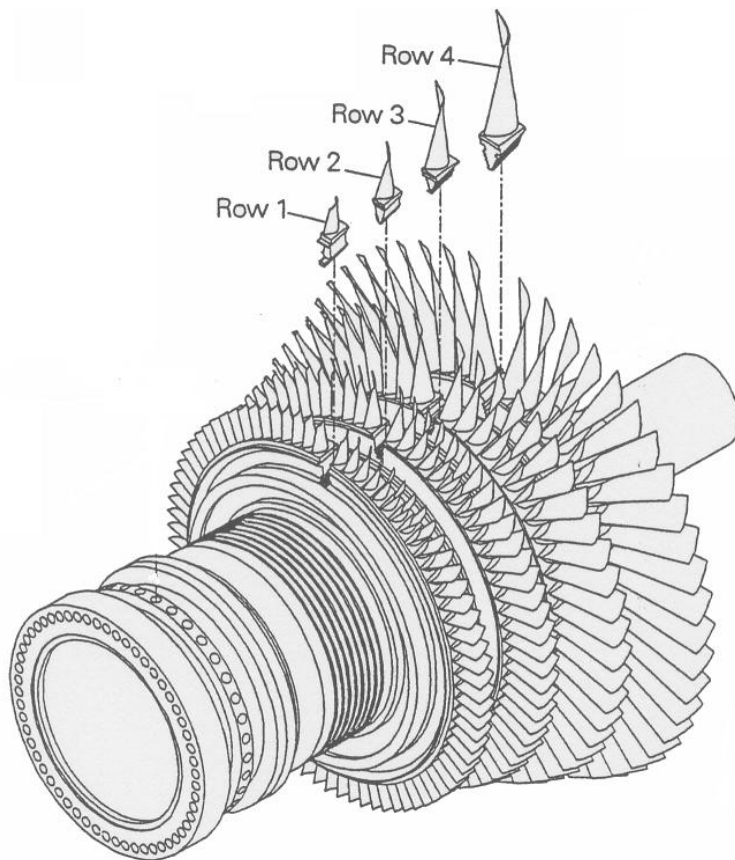
Gambar 5. 24 Campuran bahan bakar dan udara untuk pembakaran.

tergantung dari tekanan, suhu dan kecepatan alirannya. Tekanan dan suhu yang rendah mengakibatkan sulit penyalanya, sedang kecepatan yang tinggi mengakibatkan nyala api tidak stabil dan juga sulit dinyalakan.

Dengan ruang bakar tunggal berarti terdapat banyak nozzle bahan bakar didalam satu ruang pembakaran, sedang dengan ruang bakar “can type” berarti terdapat banyak ruang bakar dengan nozzle bahan bakarnya masing masing.

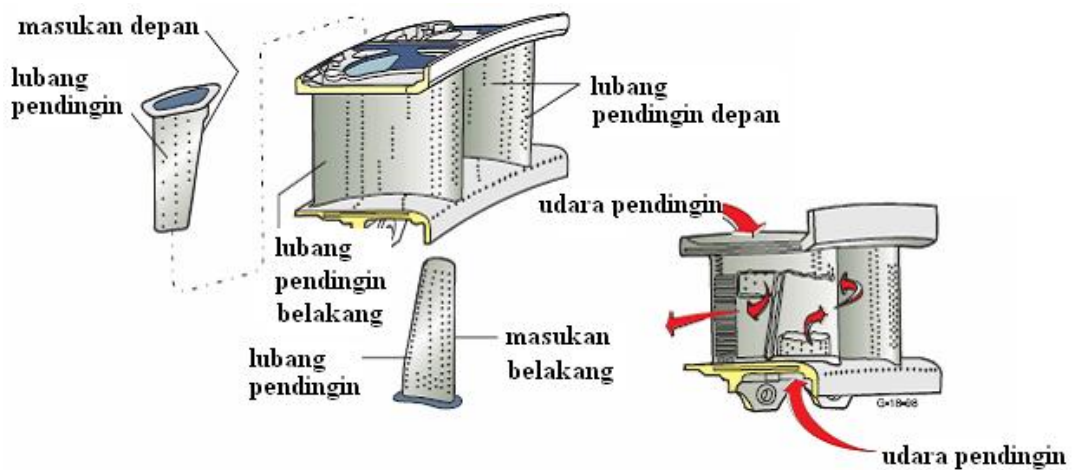
5.6.3. TURBIN

Transformasi energi panas menjadi energi mekanik terjadi didalam turbin. Turbin bisa berupa jenis turbin impuls maupun jenis turbin reaksi, tergantung dari pertimbangan pabrik pembuat masing masing dengan jumlah tingkat antara 1 sampai dengan 5 tingkat. Poros turbin merupakan sambungan terusan dari poros compressor (Gambar 5.25). Pada Gambar 5.25 tersebut terlihat bahwa masing masing sudu turbin dapat dilepas untuk tujuan penggantian jika telah mencapai umur operasinya.



Gambar 5. 25 Rotor turbin gas

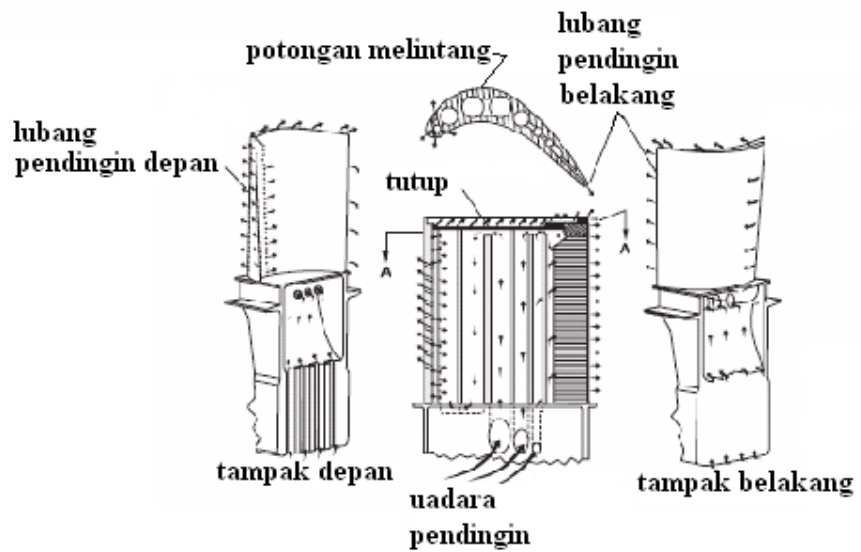
Sesuai prinsip Carnot yang telah disampaikan pada bab II, efisiensi akan semakin baik jika suhu pada waktu pemberian kalor dapat dibuat setinggi tingginya, dan suhu pada saat pembuangan kalor dibuat serendah rendahnya, maka pada turbin gas juga berlaku hal yang sama. Karena itu orang berusaha agar suhu masuk turbin dibuat setinggi tingginya, namun semuanya itu dibatasi pada kekuatan material sudu turbin yang digunakan.



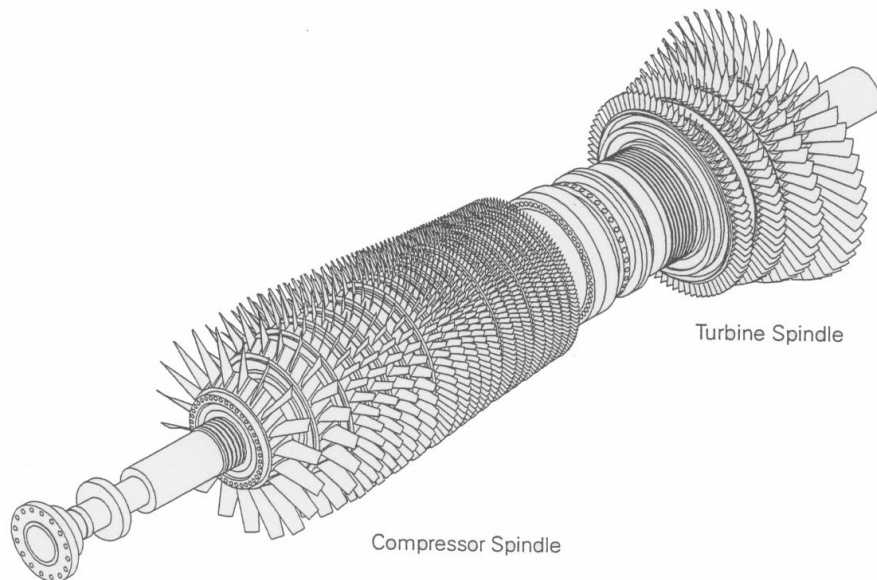
Gambar 5. 26 Konstruksi sebuah sudu tetap (nozzle) tingkat I turbin gas dan aliran udara pendingin

Untuk dapat mempertahankan material sudu turbin dari tingginya suhu gas panas yang melaluinya maka baik pada sudu tetap maupun sudu jalan turbin mempunyai konstruksi berrongga dan kepadanya dilewatkan udara dingin yang diambilkan dari tingkat tertentu kompressor. Gambar 5.26 menunjukkan bagaimana konstruksi sebuah sudu tetap dan udara pendingin mengalir didalamnya, sedang Gambar 5.27 menunjukkan konstruksi sudu jalan dan aliran udara pendingin didalam maupun diluarnya.

Rotor kompressor dan rotor turbin tersambung menjadi satu dan membentuk satu kesatuan (Gambar 5.28) Rotor ini akan mengalami pemeriksaan dan penggantian sudu turbin setelah mencapai umur operasi yang ditentukan yaitu pada saat dilakukannya inspeksi turbin, dimulai dengan penggantian sudu turbin tingkat I pada inspection turbin pertama dilanjutkan dengan penggantian sudu turbin tingkat I dan II pada inspection berikutnya. Demikian pula terjadi pada bagian sudu tetap juga dilakukan dengan kurun waktu yang sama.



Gambar 5. 27 Konstruksi sudu jalan (bucket) tingkat I turbin gas dan aliran udara pendinginnya



Gambar 5. 28 Rotor turbin gas (rotor kompressor dan rotor turbin tersambung)

5.7 ALAT ALAT BANTU PLTG

Disamping bagian utama yang sudah disebutkan diatas, turbin gas dilengkapi dengan bagian bagian lain untuk memungkinkan turbin gas dapat beroperasi dengan lancar, aman dan otomatis. Bagian bagian tersebut dapat dikelompokkan kedalam sistem sistem yaitu:

- Sistem pemutar poros.
- Sistem pelumasan.
- Sistem hidrolik
- Sistem udara pendingin
- Sistem air pendingin.
- Sistem bahan bakar
- Sistem kontrol.
- Sistem pencucian kompressor.
- Sistem pengaman.
- Bangunan pelindung (enclosure/compartement)

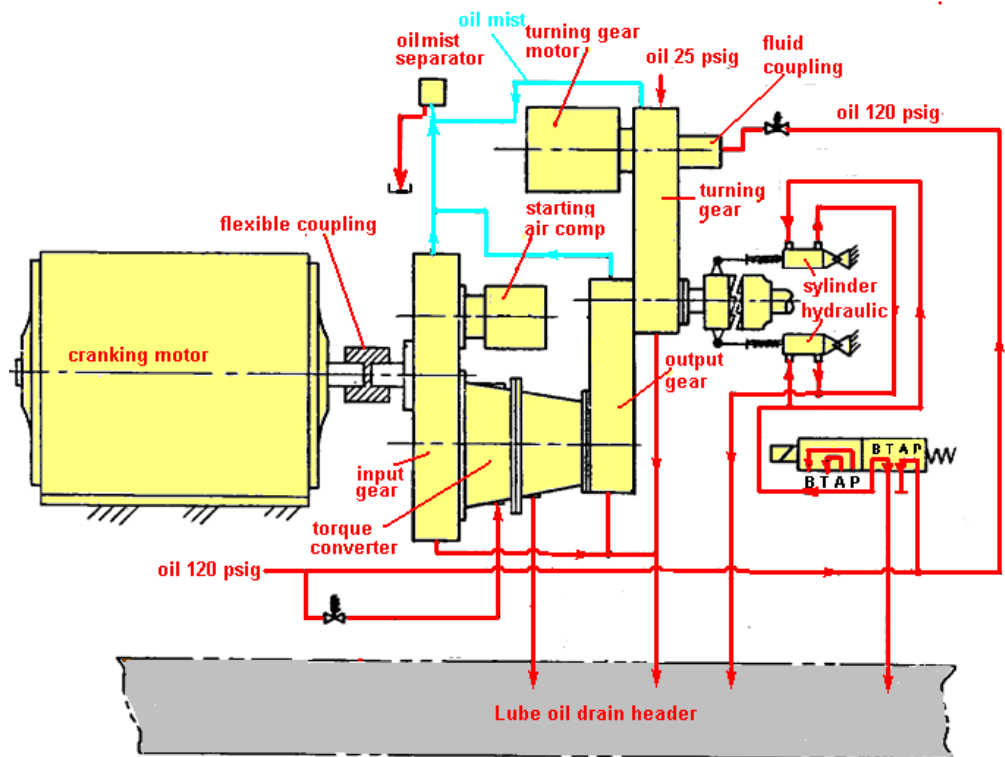
5.7.1 SISTEM PEMUTAR POROS

Sistem pemutar poros turbin gas terdiri dari alat pemutar poros diwaktu turbin gas standby (turning gear), pemutar poros untuk start (cranking motor) dan pemindah torsi (torque converter). Pemutar poros waktu turbin gas standby memutar poros secara periodik atau kontinue dengan putaran sangat lambat.

Pemutar ini digunakan terutama untuk menghindari terjadinya lendutan poros diwaktu habis beroperasi karena panas. Namun demikian pemutaran poros juga dilakukan menjelang beroperasi jika dikhawatirkan akan terjadi lendutan sewaktu rotor tidak berputar, karena itu untuk unit yang standby dianjurkan untuk selalu dioperasikan.

Pemutar poros untuk start bisa berupa motor listrik, motor hidrolik atau mesin diesel, tergantung dari besar kecilnya kapasitas turbin gas yang

bersangkutan. Untuk turbin gas besar dan digunakan untuk pembangkit listrik, generator listriknya bisa berfungsi pula sebagai motor start. Untuk turbin gas yang menggunakan mesin diesel atau motor listrik sebagai alat start dilengkapi dengan pemindah torsi, dimana mesin diesel atau motor listrik dengan putaran yang tinggi akan memindahkan torsi ke poros turbin gas dari putaran nol sampai putaran tertentu dimana nyala api didalam ruang bakar telah terjadi dan turbin gas telah mampu untuk berputar sendiri.



Gambar 5. 29 Sistem pemutar poros

Hubungan antara pemutar poros dan turbin gas dilakukan dengan clutch yang masuk dan terlepasnya dilakukan oleh silinder hidrolik. Silinder hydrolik bekerja atas tekanan minyak yang diberikan padanya oleh katup kendali yang mendapat perintah dari sistem kontrol, sesuai dengan urutan start & stop.

5.7.2 SISTEM PELUMAS.

Sistem pelumas turbin gas berfungsi untuk melumasi dan mendinginkan bearing karena panas yang timbul akibat gesekan yang terjadi dengan poros. Karena itu sistem pelumasan harus bisa mengalirkan pelumas dengan kontinue, bersih dan dengan suhu yang relative rendah.

Sistem pelumas turbin gas mempunyai peralatan peralatan yang terdiri dari Tangki pelumas, Pompa Utama yang digerakkan oleh poros turbin, Pompa Pembantu yang digerakkan oleh listrik AC, Pompa Darurat yang digerakkan oleh motor listrik DC, Katup Pengatur Tekanan, Pendingin, Saringan, Pengukur Tekanan, Pengukur Suhu dan Peralatan Proteksi.

Gambar 5.30 menunjukkan sebuah sistem pelumas dari sebuah turbin gas. Pada waktu start turbin gas, Auxiliary Oil Pump (Pompa Pembantu) dioperasikan untuk mengalirkan pelumas keseluruh sistem pelumas guna melumasi bantalan dan peralatan lainnya. Setelah putaran turbin gas mencapai putaran penuh, Auxiliary Oil Pump dimatikan, pelumas akan terus mengalir akibat telah beropersinya Pompa Utama (Shaft Driven LO Pump). Jika tekanan pelumas berkurang, maka AO Pump akan beropersi membantu menaikkan tekanan. Jika tekanan belum juga tertolong, maka Pompa Darurat (Emergency LO Pump) juga akan beropersi. Pompa darurat juga akan beropersi ketika AO Pump tidak bisa beropersi akibat tiadanya aliran listrik.

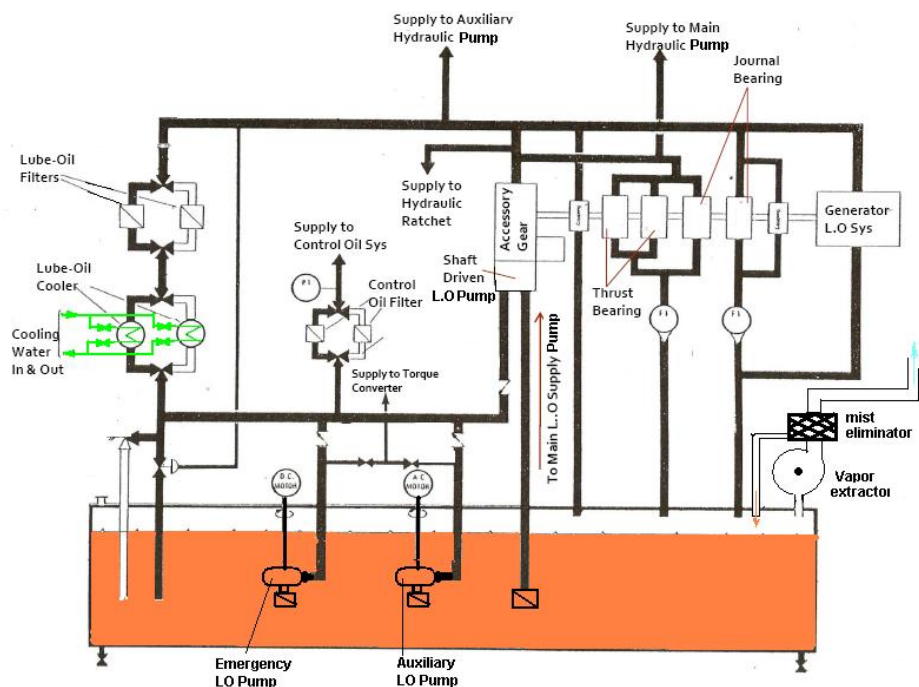
Untuk menjamin aliran pelumas kembali ke tangki dengan lancar serta menghindari kebocoran pelumas keluar bearing, tekanan tangki pelumas dibuat negatip dengan memasang vapor extractor. Vapor extractor juga berfungsi untuk membuang uap pelumas dari dalam tangki pelumas. Selanjutnya uap pelumas tersebut ditangkap dan dikembalikan lagi kedalam tangki oleh peralatan yang disebut sebagai mist eliminator.

Minyak pelumas harus memiliki kekentalan (viskositas) tertentu, dan ini ditentukan berdasarkan putaran poros, beban dan suhu pelumas. Tabel 5.3 memberikan petunjuk umum untuk memilih tingkat kekentalan pelumas

berdasar standard ISO. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa semakin tinggi putaran semakin rendah viskositas diperlukan, sebaliknya semakin tinggi suhu pelumas semakin tinggi viskositas diperlukan. Selanjutnya semakin tinggi beban atau semakin besar vibrasi atau adanya beban kejutan maka semakin tinggi viskositas diperlukan.

Tabel 5. 3 Penentuan viskositas minyak pelumas untuk bearing journal

Putaran (rpm)	Suhu minyak pada bearing			
	0 to 50	60	75	90
300 to 1,500	-	68	100 to 150	-
~1,800	32	32 to 46	68 to 100	100
~3,600	32	32	46 to 68	68 to 100
~10,000	32	32	32	32 to 46



Gambar 5. 30 Sistem pelumas

Cara lain untuk menentukan viskositas pelumas adalah dengan menggunakan kriteria viskositas minimum dan optimum terhadap suhu operasi. Umumnya viskositas untuk journal bearing berada pada 13 cst pada suhu operasinya. Viskositas optimum untuk suhu operasi adalah antara 22 s/d 35 Cst jika beroperasi dengan kecepatan yang moderat dan tanpa beban kejutan. Viskositas bisa berada pada 95Cst untuk bearing journal dengan kecepatan rendah dan beban berat atau beban kejutan. Suhu pelumas didalam bearing dapat ditentukan sebagai suhu rata rata antara suhu pelumas dan suhu metal bering.

Jika viskostas pelumas terlalu rendah maka panas akan terjadi akibat terlalu tipisnya lapisan pelumas antara dua logam yang bergesekan, sebaliknya jika viskositas pelumas terlalu tinggi, panas juga akan timbul akibat gesekan antara bagian bagian dalam pelumas itu sendiri. Viskositas yang terlalu tinggi juga bisa menimbulkan cavitasi didalam pelumas. Ini terjadi ketika pelumas mempunyai tekanan tinggi waktu menerima beban, kemudian tekanan menurun ketika beban terlepas. Cavitasi bisa menimbulkan luka pitting pada bearing

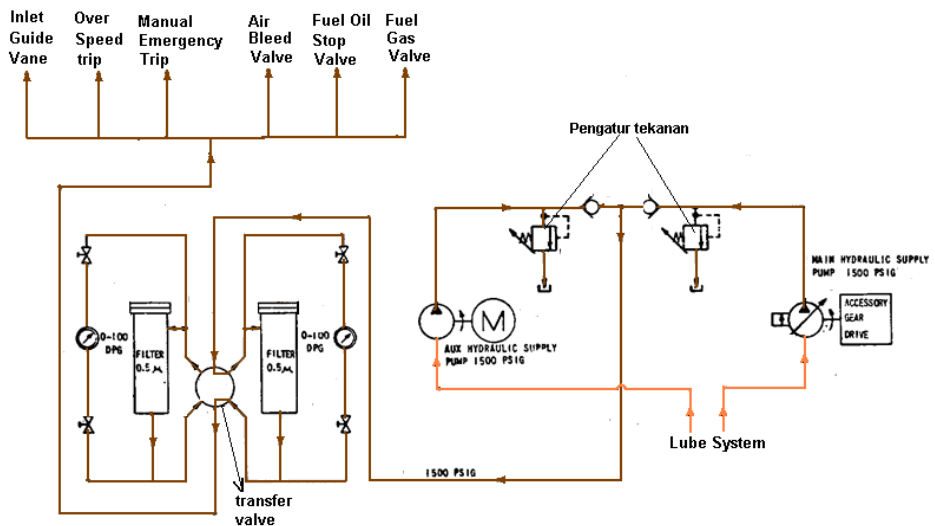
Kedalam minyak pelumas biasanya juga diberikan bahan tambahan seperti bahan anti korosi (rust & oxidation) dan anti pembusaan (anti foam) dan anti aus (anti wear).

5.7.3 SISTEM HIDROLIK

Pelumas yang sama yang digunakan didalam sistem mnyak pelumas, digunakan juga sebagai sarana penggerak hidrolik untuk menggerakkan peralatan peralatan hidrolik seperti, Main Stop Valve bahan bakar dan Inlet Guide Vane (Gambar 5.31). Minyak pelumas dari pompa pelumas utama (Shaft Driven Oil Pump) atau dari Auxiliary Oil Pump dinaikkan tekanannnya sampai dengan 1500 psi. Tekanan yang tinggi ini diperlukan agar mampu menggerakkan peralatan hidrolik yang berat. Dengan tekanan

yang tinggi berarti bisa dihemat ukuran piston dan silinder hidroliknya, karena itu bisa dihemat pula ukuran ruangan yang diperlukan.

Pada waktu start dimana poros turbin belum mempunyai kecepatan putaran yang cukup, tekanan hidrolik dibangun oleh Auxiliary Hydraulic Supply Pump, sedang apabila putaran poros turbin gas telah mencapai putaran penuh, tekanan hidrolik dibangun oleh Main Hydraulic Supply Pump. Minyak hidrolik harus diberikan ke masing masing peralatan hidrolik dalam keadaan sangat bersih, untuk menghindari kerusakan pada masing masing silinder hidroliknya. Untuk itu dipasang saringan minyak hidrolik tekanan tinggi dengan ukuran 5 mikron.

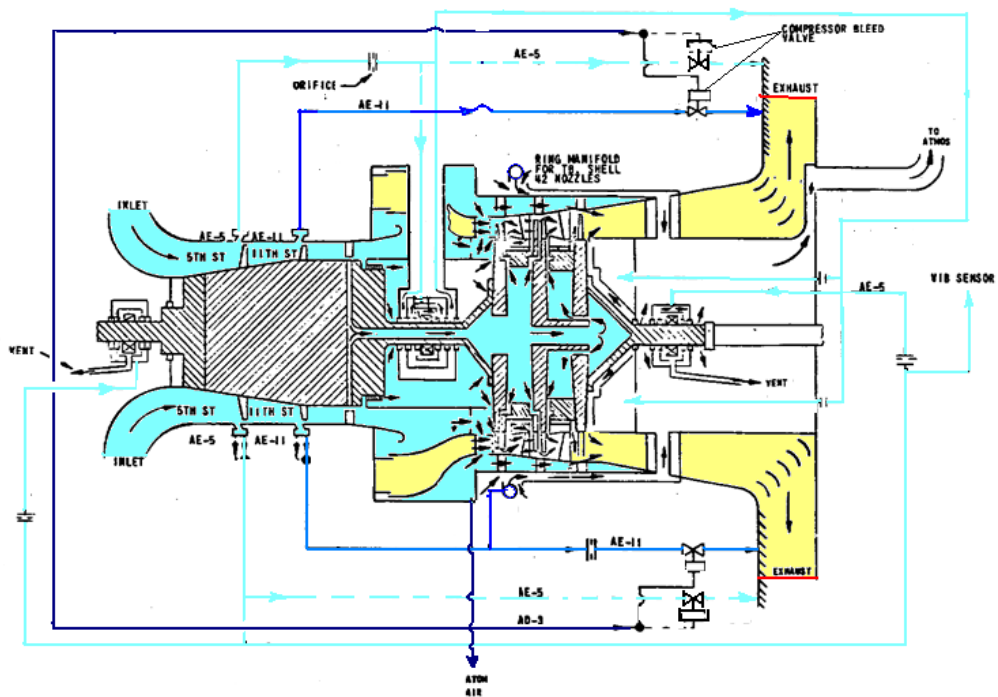


Gambar 5. 31 Sistem hidrolik

5.7.4 SISTEM UDARA PENDINGIN DAN PERAPAT (Gambar 5. 31)

Sistem udara pendingin digunakan untuk mengalirkan udara dari kompressor untuk ditujukan kelubang lubang pendingin sudu turbin. Udara dari sisi keluar kompressor sebagian dialirkan untuk mendinginkan sudu sudu tetap tingkat pertama, kedua dst, sebagian lagi dialirkan melalui rotor turbin untuk selanjutnya dialirkan untuk mendinginkan sudu sudu jalan tingkat pertama, tingkat kedua dst.

Pengambilan udara dari kompressor disesuaikan dengan tekanan yang ada pada masing masing tingkat sudu turbin. Udara dari extraction kompressor tingkat 11 digunakan untuk pendinginan ruangan yang ditempati poros dan bearing pada sisi belakang turbin yang dilingkungi oleh saluran gas panas keluar turbin. Udara dari extraction kompressor tingkat 5 digunakan untuk memberikan perapatan pada bearing agar minyak pelumas tidak keluar dari bearing tersebut. Udara dari extraction tingkat 5 ini juga digunakan untuk mendinginkan rotor pada sisi ujung belakang turbin.



Gambar 5. 32 Sistem Udara Pendingin dan perapat

5.7.5 SISTEM BAHAN BAKAR

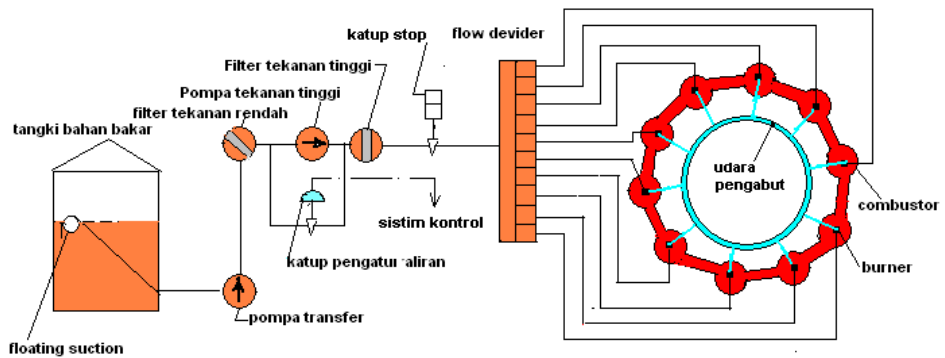
Sistem bahan bakar turbin gas terdiri dari tiga jenis yaitu sistem bahan bakar gas, sistem bahan bakar cair dan sistem bahan bakar campuran. Gambar 5.32 menunjukkan sebuah sistem bahan bakar cair, dimana minyak diambil dari tangki melalui floating suction (pipa hisap apung) untuk menghindari terhisapnya kotoran dari dalam tangki. Dari tangki minyak

ditransfer ke unit PLTG dengan pompa transfer, kemudian disaring didalam saringan tekanan rendah dan selanjutnya dipompa dengan pompa tekanan tinggi menuju flow divider melalui saringan tekanan tinggi. Flow divider adalah pembagi aliran sama untuk masing masing burner pada masing masing ruang bakar.

Jumlah bahan bakar yang dialirkan masuk kedalam ruang bakar diatur melalui sistem kontrol sesuai dengan kebutuhan dan daya listrik yang dibangkitkan. Sistem kontrol memberikan komando untuk menambah atau mengurangi jumlah aliran bahan bakar, dengan mengatur langkah katup pengatur aliran bahan bakar. Jika dikehendaki tambahan bahan bakar, maka katup pengatur diperintahkan untuk menutup, sehingga jumlah minyak yang melalui katup pengatur berkurang, dan yang menuju ruang bakar bertambah. Demikian sebaliknya jika dikehendaki aliran bahan bakar berkurang, maka katup pengatur diperintahkan untuk membuka, sehingga jumlah bahan bakar yang mengalir melalui katup pengatur bertambah besar dan yang masuk ruang bakar berkurang.

Dalam keadaan darurat atau ketika turbin gas dikehendaki untuk berhenti (stop), maka katup stop (stop valve) diperintahkan untuk menutup, dan karenanya aliran bahan bakar kedalam ruang bakar menjadi terhenti dan pembakaranpun berhenti.

Pada pembakaran dengan gas, gas alam dialirkan dari sumur sumur gas menuju keturbin gas. Sebelum masuk kedalam turbin gas, gas alam tersebut harus dihilangkan dulu kotoran kotorannya melalui separator dan filter. Juga dihilangkan unsur kondensat yang terbentuk selama perjalanan gas tersebut didalam pipa. Selanjutnya tekanan gas alam tersebut disesuaikan tekanannya dengan tekanan yang cocok dengan design turbin gas tersebut.



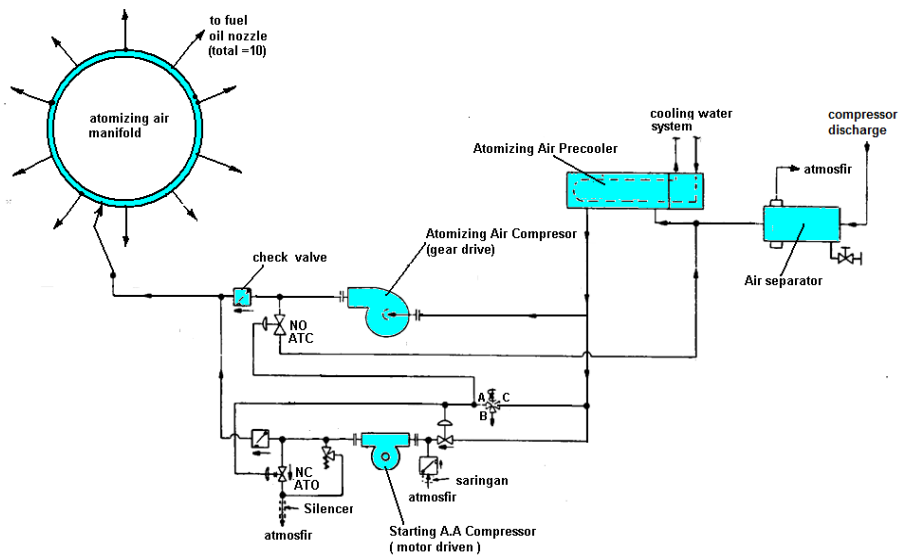
Gambar 5. 33 Sistem bahan bakar cair

5.7.6 SISTEM UDARA PENGABUT.

Untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna dari bahan bakar cair, maka bahan bakar cair harus dipecah pecah menjadi butir butir kecil (dikabutkan) dan dicampur dengan udara. Proses pengabutan dan percampuran dengan udara dapat lebih sempurna terjadi jika pengabutan dilakukan dengan udara bertekanan yang disebut sebagai udara pengabut.

Gambar 5.34 adalah sistem udara pengabut yang digunakan pada salah satu jenis Turbin Gas buatan General Electric. Pada waktu Turbin Gas mulai dioperasikan, udara pengabut diambil dari sisi keluar compressor turbin gas, dibuang kotoran padatnya didalam separator, didinginkan didalam Atomizing Precooler, dinaikkan tekanannya didalam Starting Atomizing Air Compressor dan diteruskan kedalam Atomizing Air Manifold untuk kemudian dibagi bagi ke masing masing nozzle bahan bakar. Ketika turbin gas telah mencapai putaran penuh, Starting Atomizing Air Compressor digantikan oleh Atomizing Air Compressor yang digerakkan oleh poros turbin gas melalui accessory gear (gear drive).

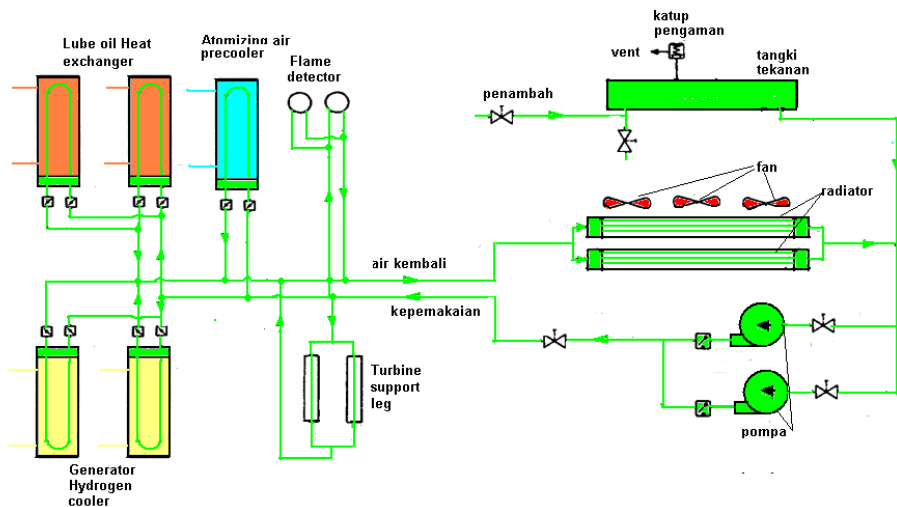
Tidak semua jenis turbin gas menggunakan udara pengabut, ada juga yang menggunakan pengabutan mekanis, yaitu dengan memberikan tekanan yang tinggi pada bahan bakar dan memberikan gerakan tangensial ketika bahan bakar keluar nozzle.



Gambar 5. 34 Sistem udara pengabut (atomizing air)

5.7.7 SISTEM AIR PENDINGIN.

Air merupakan media pendingin yang paling baik, karena itu air digunakan sebagai pendingin didalam turbin gas untuk mendinginkan minyak pelumas (lube oil), udara pengabut (atomizing air), gas hydrogen pendingin belitan generator, kaki penyangga turbin (turbine support leg) dan pendingin penduga nyala api ruang bakar (flame detector). Air pendingin secara continue dialirkan keperalatan peralatan tsb diatas dan disirkulasikan secara tertutup dengan menggunakan pompa. Air yang telah menjadi panas, secara continue didinginkan kembali didalam radiator dengan menggunakan kipas udara. Gambar 5.35 menunjukkan sebuah sistem air pendingin dimana air pendingin dari radiator dialirkan dengan pompa air pendingin menuju peralatan peralatan tersebut diatas, dan kembali keradiator. Untuk menjaga agar tidak ada udara yang masuk kedalam sistem, dipasang tangki persediaan dengan tekanan atau dengan ketinggian tertentu. Kedalam tangki ini dipasang saluran air penambah, untuk secara otomatis akan menambahkan jumlah air, jika terjadi kekurangan akibat kebocoran.



Gambar 5. 35 Sistem air pendingin

5.7.8 SISTEM KONTROL

Sistem control meliputi control untuk start (yang mengatur terjadinya penyalaan didalam ruang bakar, mengatur aliran bahan bakar untuk start, mengatur pembukaan Inlet Guide Vane, mengatur pemberhentian alat start dan mengatur penutupan katup extraction kompressor), control untuk akselerasi, control putaran, control untuk sinkronisasi, control pembebanan manual, dan control suhu maximum (pembebanan maximum). Pada waktu start, sistem control berfungsi untuk mengatur terjadinya penyalaan didalam ruang bakar, mengatur besarnya aliran bahan bakar, mengatur pembukaan Inlet Guide Vane, mengatur pemberhentian alat start dan mengatur penutupan katup extraction compressor.

Pertambahan kecepatan putaran dilakukan oleh control akselerasi dan setelah turbin mencapai putaran penuh, control putaran akan mengambil peran untuk mempertahankan putaran turbin agar tetap berada pada putaran nominalnya. Selanjutnya control untuk sinkronisasi akan melakukan penguatan generator dan memparalel generator dengan jaringan transmisi.

Setelah sinkron, otomatis generator akan dibebani minimum, dan selanjutnya dapat dibebani manual atau otomatis menuju beban maximum. Beban maximum PLTG ditentukan berdasarkan suhu pembakaran maximum

Pembebanan PLTG dapat dilakukan dengan memilih jenis pembebanannya, yaitu jenis beban dasar (base) atau beban puncak (peak), dimana beban puncak yang besarnya lebih tinggi dari beban dasar akan mengandung konsekuensi umur bagian ruang bakar dan turbin menjadi lebih pendek. Dengan beban dasar dimaksudkan bahwa PLTG dapat dioperasikan secara kontinue tanpa mengakibatkan pemendekan umur bagian bagian panasnya.



157

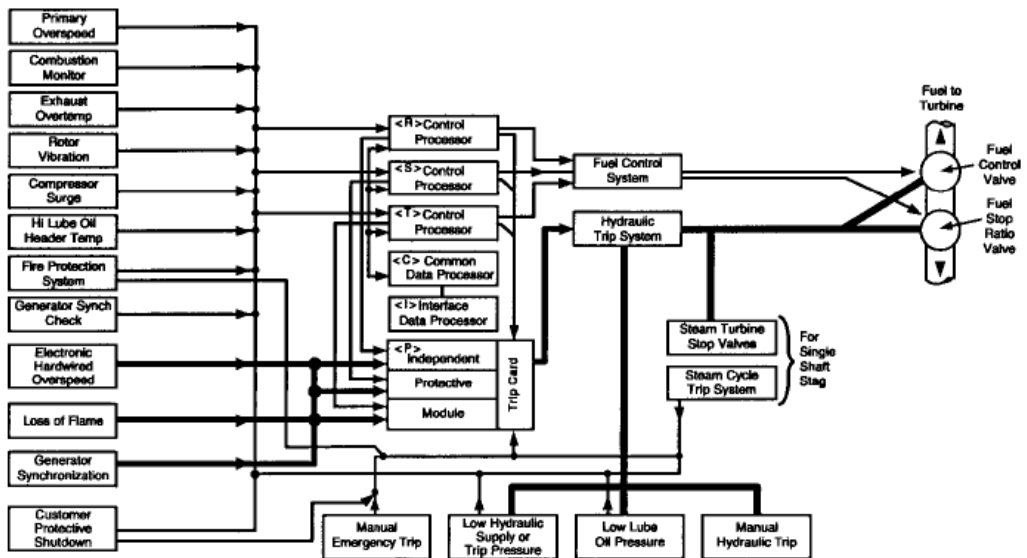
5.7.9 SISTEM PENGAMAN (PROTEKSI)

Sistem pengaman turbin gas berguna untuk mengamankan turbin gas dari kerusakan berat akibat tidak berfungsinya kelengkapan turbin. Sistem pengaman turbin terdiri dari:

- Pengaman tekanan pelumas rendah, untuk menghindari rusaknya bearing akibat gesekan kering oleh karena tidak adanya pelumasan.
- Pengaman suhu bearing tinggi. Gesekan yang terjadi pada bearing akan mengakibatkan suhu yang tinggi, dan suhu yang tinggi akan melumerkan metal bearing, karena itu kenaikan suhu harus dicegah sebelum metal bearing menjadi rusak
- Pengaman gaya axial tinggi. Penghisapan udara oleh kompressor dan dorongan gas panas pada sudu turbin akan menyebabkan gaya axial walaupun kedua gaya ini berlawanan dan dibuat relatif seimbang, kerusakan pada sudu turbin atau pengotoran pada sudu kompressor dapat mengakibatkan gaya yang timbul berlebih kearah tertentu. dan menjadikan sudu kompressor bergesekan.
- Pengaman getaran tinggi. Walaupun pembuatan rotor telah dilakukan secara teliti, namun pada tahap akhirnya tetap ditemukan adanya ketidak samaan berat antara satu sisi dengan sisi yang lain (arah radial) pada rotor. Ketidak samaan berat ini disebut sebagai unbalans (tidak seimbang). Pada rotor baru unbalans ini telah dibuat menjadi balans (seimbang), yang menghasilkan getaran yang kecil. Seiring dengan perjalanan waktu getaran turbin bisa menjadi besar dan melampaui batas yang ditentukan, karena itu turbin harus diberhentikan untuk menghindari kerusakan lebih lanjut.

- Pengaman suhu lebih. digunakan untuk mengamankan bagian bagian panas turbin gas dari kemungkinan kerusakan akibat terjadinya suhu gas panas yang melampaui batas.

Disamping itu turbin gas juga dilengkapi dengan tombol darurat untuk member-hentikan turbin gas dengan seketika jika diketahui terdapat hal hal yang membahayakan bagi berlangsungnya operasi.



Gambar 5. 37 Sistem kontrol dan proteksi

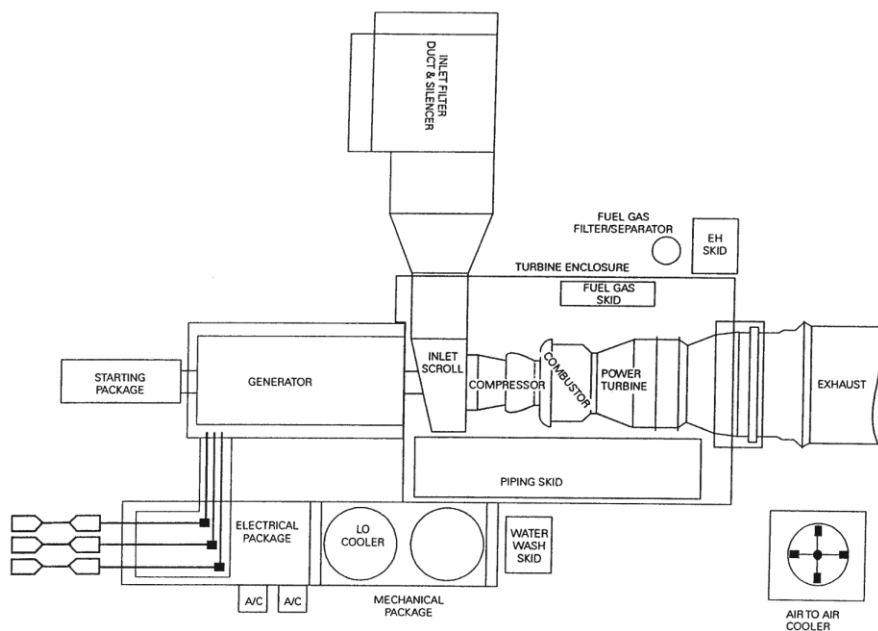
5.7.10 KELENGKAPAN LAINYA

Bangunan pelindung meliputi bangunan untuk melindungi mesin turbin gas, generator listrik, panel kontrol dan lain lain dari hujan dan pengaruh lingkungan lainnya, serta untuk mempermudah pemadaman api jika terjadi nyala api. Umumnya bangunan ini menempel bersama sama dengan turbin gas pada base plate yang sama, sehingga jika turbin gas ingin dipindahkan ketempat lain bangunan tersebut otomatis tidak perlu dilepas tersendiri. Tetapi bagi turbin gas yang digunakan untuk PLTGU bisa dibuat satu bangunan saja untuk beberapa turbin gas. Gambar 5.37 menunjukkan susunan sebuah PLTG dengan bangunan bangunan terkait (turbine

enclosure, generator encloser, elctrical package, mechanical package, starting package dan lain lain).

Sistem pencucian kompressor digunakan untuk membersihkan sudu sudu kompressor dari kotoran yang tidak bisa tersaring oleh filter udara masuk. Berupa kotoran debu, uap minyak atau kotoran dari asap industri. Pembersihan dilakukan dengan air ditambah zat kimia pembersih yang disemprotkan dimulut kompressor ketika turbin gas sedang beroperasi. Hisapan kompressor akan membawa butir butir air masuk kedalamnya dan membasuh sudu sudu kompressor. Kecepatan putaran sudu dan adanya bahan kimia pembersih menyebabkan kotoran yang menempel terlepas.

Sistem pemadam kebakaran, untuk melaksanakan pemadam kebakaran secara otomatis jika terdeteksi adanya asp product kebakaran atau adanya suhu yang berlebihan. Pemadaman dilakukan dengan gas CO₂ yang disediakan didalam botol botol gas tekanan tinggi.



Gambar 5. 38 Susunan PLTG Westinghouse W 251

5.8 PENGOPERSIAN PLTG

5.8.1 PERSIAPAN SEBELUM START

Sebelum PLTG dioperasikan maka harus dipersiapkan dulu peralatan peralatan bantu. Hal hal yang harus dipersiapkan adalah:

1. Bagian pemeliharaan telah menyerahkan bahwa PLTG telah siap untuk dioperasikan.
2. Periksa seluruh sistem bahwa memang PLTG siap untuk dioperasikan.
3. Masukkan sumber listrik untuk menjalankan sistem alat bantu.
4. Jalankan sistem pelumas.
5. Jalankan pemutar poros sampai waktu yang ditentukan.
6. Jalankan sistem air pendingin.

5.8.2 START PLTG

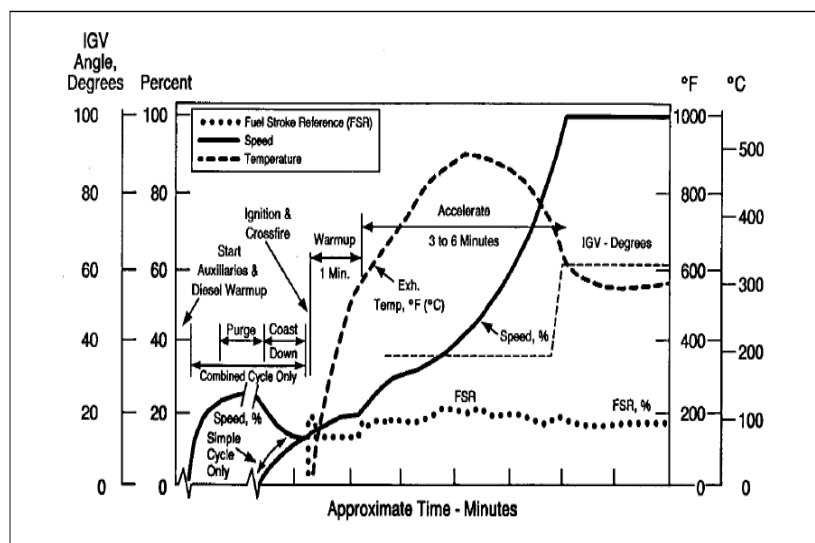
Pada mesin modern, start turbin gas / PLTG telah diprogram ke dalam sequencer yang akan mengendalikan segalanya (putaran, nyala api, suhu dll) sampai putaran penuh. Biasanya, ini hanya dimulai dengan menekan saklar dan mengamati instrumen² yang terpasang.

Urutan startup dari mesin PLTG, asalkan semua sistem alat alat bantu bisa berfungsi baik (pasokan bahan bakar, daya baterai / pelumas dll), pada dasarnya urutan startup dari mesin PLTG, sebagai berikut:

- Tekan tombol start
- Amati RPM meningkat
- Pada putaran 20 % katup bahan bakar akan terbuka dan busi menyala.
- Jika penyalaan bahan bakar berhasil maka putaran akan bertambah tinggi.

- Amati kenaikan temperatur gas buang jangan sampai melebihi batas yang ditentukan.
- Amati kenaikan putaran menuju putaran penuh.
- Pada putaran 65% alat start akan stop dan PLTG terus meningkatkan putarannya dengan kemampuannya sendiri.
- Amati terus suhu gas buang dan kenaikan putaran sampai putaran penuh tercapai.
- Pada putaran penuh amati apakah parameter parameter operasi menunjuk pada batas batas yang normal.

Pada waktu start berlangsung terdapat hubungan antara kenaikan putaran, kenaikan suhu dan pembukaan katup bahan bakar terhadap waktu yang ditentukan (Gambar 5. 39). Kurva semacam ini harus dibuat ketika unit PLTG dilakukan komissioning sehabis proses konstruksi selesai. Kurva semacam ini juga perlu dibuat sebelum dan sesudah dilaksanakannya overhaul untuk mengetahui keberhasilan overhaul itu.



Gambar 5. 39 typical Curva start up PLTG

5.8.3 MEMPARALLEL PLTG

Ada lima syarat yang harus dipenuhi sebelum generator PLTG dilakukan parallel (sinchron) dengan pembangkit lain yaitu:

1. Generator harus mengeluarkan tegangan yang sama dengan tegangan jaringan.
2. Generator harus mempunyai frekuensi yang sama dengan frekuensi jaringan
3. Generator harus mempunyai urutan fasa yang sama dengan urutan fasa jaringan
4. Generator harus mempunyai sudut fasa yang sama dengan sudut fasa jaringan
5. Generator harus mempunyai bentuk gelombang yang sama dengan bentuk gelombang jaringan

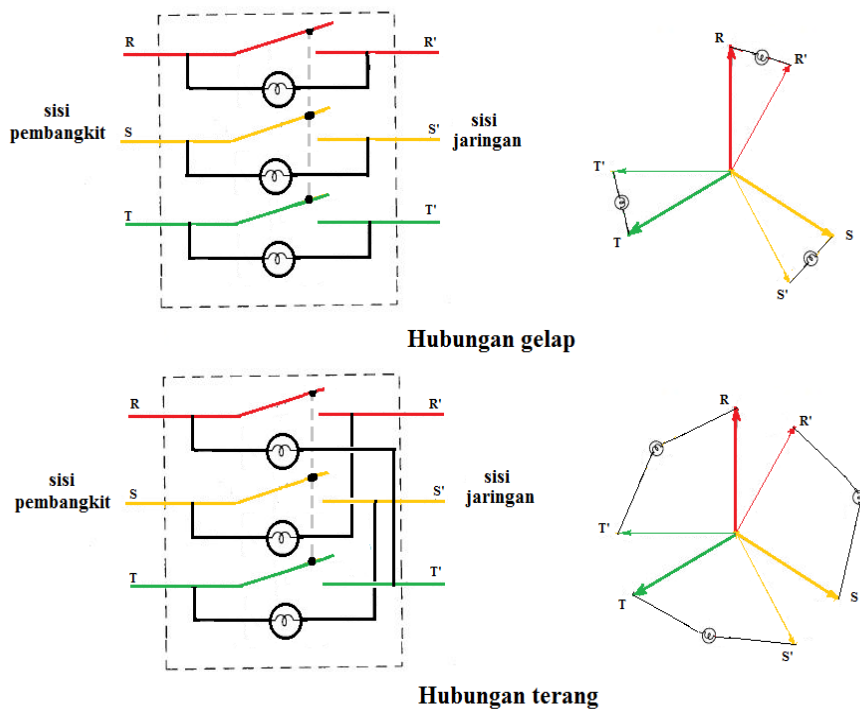
Bentuk gelombang dan urutan phase merupakan hal yang harus ditentukan pada waktu penyusunan kontrak, sementara untuk frekuensi, tegangan dan sudut fasa harus diamati setiap generator akan diparalel ke jaringan.

Ada tiga jenis peralatan yang digunakan untuk memparalel generator yaitu lampu sinchron, sinchroscope dan relay sinchrone.

a. Lampu sinchron

Ada dua jenis lampu sinchroon, yaitu yang disebut lampu sinchron dengan hubungan gelap dan lampu sinchron dengan hubungan terang. Untuk hubungan gelap lampu terhubung dengan masing masing jenis fasa yang sama pada generator maupun pada jaringan, sedang untuk hubungan terang lampu terhubung dengan jenis fasa yang berbeda antara generator dan jaringan. (Gambar. 5.40)

Tiga buah lampu dihubungkan diantara terminal trafo tegangan generator dan terminal trafo tegangan jaringan. Ketika frekuensi generator tidak sama dengan frekuensi jaringan, maka lampu akan menyala dan padam secara bergantian sesuai besarnya perbedaan frekuensi diantara keduanya. Ketika frekuensi dan sudut phasanya menjadi sama maka hidup dan matinya akan berhenti, dan ketika jenis phasa yang sama pada generator dan jaringan berimpit, maka lampu akan padam (hubungan gelap) atau sebaliknya menjadi sangat terang (hubungan terang), dan jika tegangan telah menjadi sama, saat inilah PMT generator dapat dimasukkan, dan dengan demikian generator menjadi parallel dengan jaringan.



Gambar 5. 40 Rangkaian listrik dari lampu sinchrone

Memasukkan PMT generator ketika lampu belum padam (pada hubungan gelap) atau belum menyala sangat terang pada hubungan terang, akan menyebabkan arus yang besar melalui PMT, dan dapat menyebabkan kerusakan pada PMT maupun pada generator.

b. Synchroscope

Gambar 5.40 adalah pasangan peralatan untuk memparalel generator. Dari atas kebawah adalah synchroscope, Voltmeter dan Frekuensi meter. Keadaan dalam gambar adalah kondisi sedang tidak digunakan. Jika peralatan tersebut dalam kondisi digunakan maka ketika generator dalam kondisi parallel, Frekuensi meter (baris I / jaringan dan baris II/generator) akan menunjuk sama, Voltmeter I akan menunjuk sama dengan voltmeter II, dan jarum sinchroscop akan menunjuk lurus keatas



Untuk memparalel generator maka pertama tama frekuensinya disamakan dengan melihat pada Frekuensi meter (biasanya 50 Hz), tegangan disamakan misalnya pada 220 V, kemudian diatur putaran mesin sehingga jarum sinchroscope berputar pelan searah jarum jam. Ketika jarum menunjuk lurus keatas saat itulah waktu yang tepat untuk memasukkan PMT generator.

Memasukkan PMT generator ketika jarum sinchroscope tidak menunjuk lurus keatas akan menyebabkan arus yang besar melalui PMT, dan dapat mnyebabkan kerusakan pada PMT maupun pada generator.

Gambar 5. 41 Peralatan Sinchron

c. Synchronizing relays

Dengan Sinchronizing relay tidak diperlukan lagi tangan manusia melakukan sinchronisasi generator. Sinchronisasi berlangsung secara otomatis. Sebagai pengganti manuia digunakan relay electromechanical atau

microprosesor digital yang dengannya proses menaikkan dan menurunkan putaran mesin, pemberian tegangan dan memasukkan PMT berjalan otomatis.

5.8.4 MEMBEBANI PLTG

Setelah Generator PLTG paralel dengan jaringan listrik, maka kepada PLTG tsb dapat dibebani sesuai kebutuhan, beban base beban peak atau beban dibawah base.

- ✓ **Beban Base**, dimaksudkan PLTG dibebani maksimum dengan jangka waktu yang lama yang tidak akan mengurangi kurun waktu pemeliharaan.
- ✓ **Beban peak**, dimaksudkan PLTG dibebani maksimum diatas Base, dengan catatan akan mengurangi kurun waktu pemeliharaan.
- ✓ **Beban dibawah base**, dengan beban ini PLTG mengikuti perubahan frekuensi sesuai dengan setting governornya.

5.8.5 MENYETOP PLTG

- Turunkan beban sampai beban minimum.
- Keluarkan PMT, sehingga PLTG terlepas dari jaringan.
- Stop PLTG, katup bahan bakar akan menutup, dan putaran PLTG akan menurun.
- Amati waktu yang diperlukan untuk mencapai putaran 0 rpm.
- Setelah putaran mencapai 0 rpm, jalankan pemutar poros.
- Matikan sistem air pendingin.
- Setelah 21 jam matikan turning gear dan sistem pelumas.
- Untuk unit yang standby maka sistempelumas dan turning gear harus dioperasikan terus.

5.9 FAKTOR FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PERFORMANCE PLTG

Turbin gas menggunakan udara atmosfir sebagai media kerjanya, karena itu segala sesuatu yang mempengaruhi kondisi dan sifat sifat udara atmosfir seperti suhu, tekanan, dan kelembaban akan berpengaruh terhadap unjuk kerja turbin gas. Yang dimaksud dengan unjuk kerja atau performance adalah besarnya daya mampu maksimum dan konsumsi penggunaan panas yang dapat ditunjukkan oleh turbin gas yang bersangkutan.

Oleh karena unjuk kerja turbin gas sangat dipengaruhi oleh kondisi udara atmosfir tersebut, maka unjuk kerja turbin gas harus ditunjukkan dalam kondisi standard yaitu yang disebut sebagai kondisi ISO (International Standard Organisation). Kondisi ISO adalah kondisi udara pada suhu 15°C (59°F) dan permukaan air laut atau sesuai dengan tekanan barometer 760 mmHg (= 11,969 psia = 1,033kg/cm² dan kelembaban relative = 60%.

Sebagai contoh performance sebuah turbin gas Westinghouse yang ditempatkan di Duri propinsi Riau dengan bahan bakar gas, mempunyai unjuk kerja pada kondisi ISO seperti berikut:

Daya mampu	:	120 MW.
Heat rate	:	9900 Btu/kwh (open cycle)
Rotation	:	3600 rpm.
Bahan bakar	:	gas.
Inlet loss	:	1,1”H₂O
Outlet loss	:	5,0”H₂O
Cos ϕ generator	:	0,9.

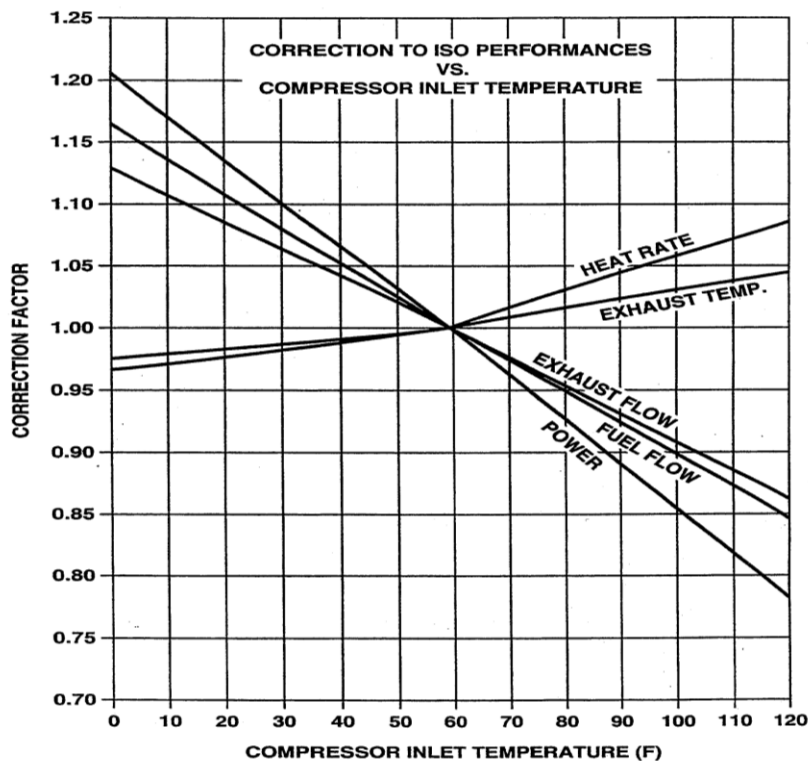
Untuk mengetahui berapa besar unjuk kerja turbin gas tsb pada kondisi setempat diperlukan faktor faktor koreksi yang digambarkan dalam bentuk grafik sebagaimana yang akan dijelaskan berikut ini.

5.9.1 Faktor suhu udara:

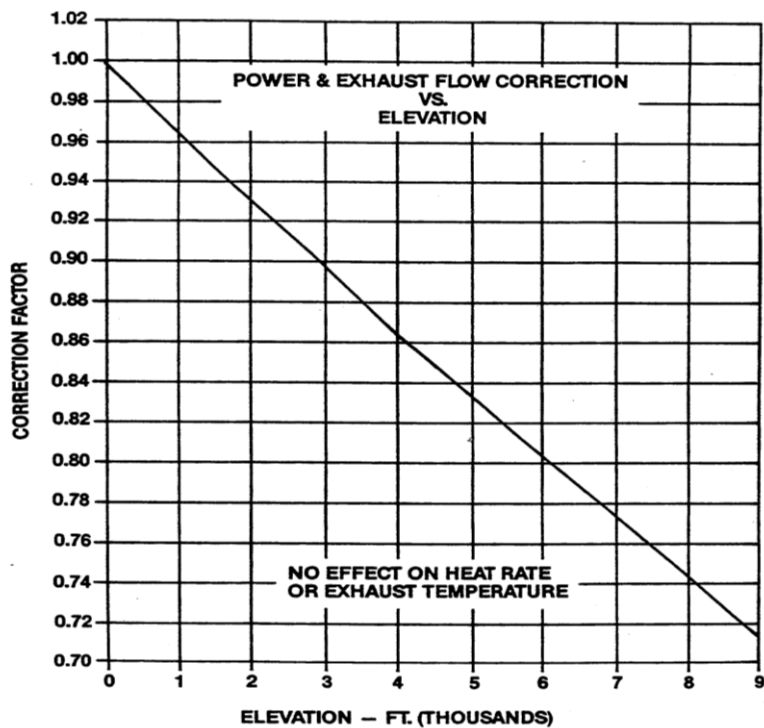
Suhu udara mempengaruhi kerapatan udara, makin tinggi suhunya semakin rendah kerapatannya. Kerapatan udara akan mempengaruhi jumlah massa udara yang terhisap masuk kedalam compressor, sehingga jumlah gas panas yang mendorong turbin juga berkurang. Akibatnya daya mampu turbin gas tersebut menjadi menurun (Gambar 5.42)

5.9.2 Faktor ketinggian tempat.

Altitude atau ketinggian tempat akan berpengaruh terhadap tekanan udara atmosfer. Berkurangnya tekanan udara masuk compressor juga akan menurunkan kerapatan udara tersebut sehingga jumlah berat udara yang masuk kedalam compressor akan berkurang. Turunnya tekanan masuk compressor juga akan menurunkan tekanan



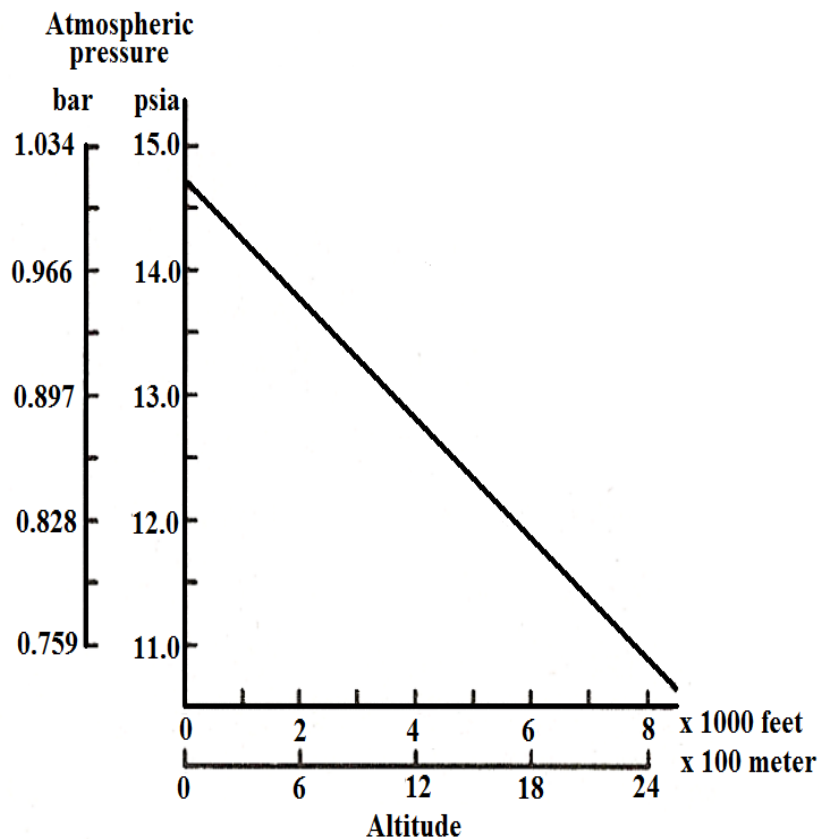
Gambar 5. 42 Faktor koreksi suhu udara atmosfer



Gambar 5. 43 Faktor koreksi ketinggian tempat

keluar kompressor, sehingga daya mampu turbin gas juga akan mengalami penurunan (Gambar 5.42).

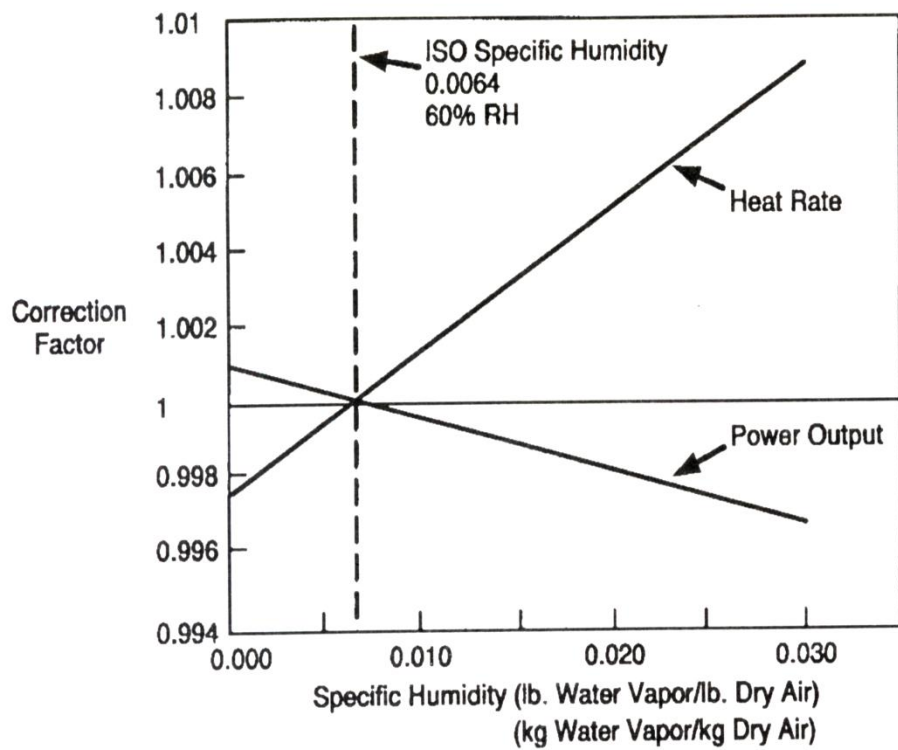
Ketinggian tempat biasanya ditunjukkan dengan penurunan tekanan barometer sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5.43, yaitu untuk setiap kenaikan altitude 1000 feet, tekan barometer turun $\pm 0,05$ psia.



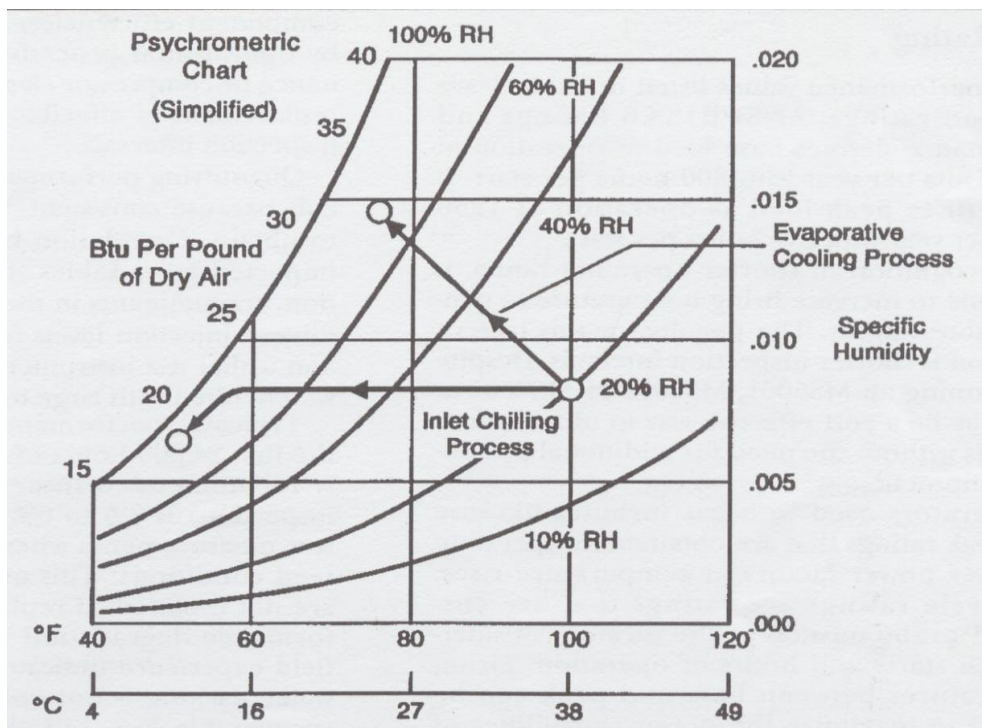
Gambar 5. 44 Faktor konversi tekanan barometer terhadap altitude

5.9.3 Faktor kelembaban udara.

Udara lembab adalah udara yang mengandung uap air. Semakin tinggi kelembaban berarti semakin tinggi kandungan uap air didalam udara. Kelembaban ini mempunyai pengaruh buruk terhadap heat rate maupun power output walaupun dalam prosentase yang kecil (Gambar 5.44). Sebaliknya pada kondisi udara dengan kelembaban yang rendah pemberian kabut air kedalamnya (menaikkan kelembaban) dapat menurunkan suhu udara tersebut dan karenanya daya mampu turbin gas dapat ditingkatkan (5.45)



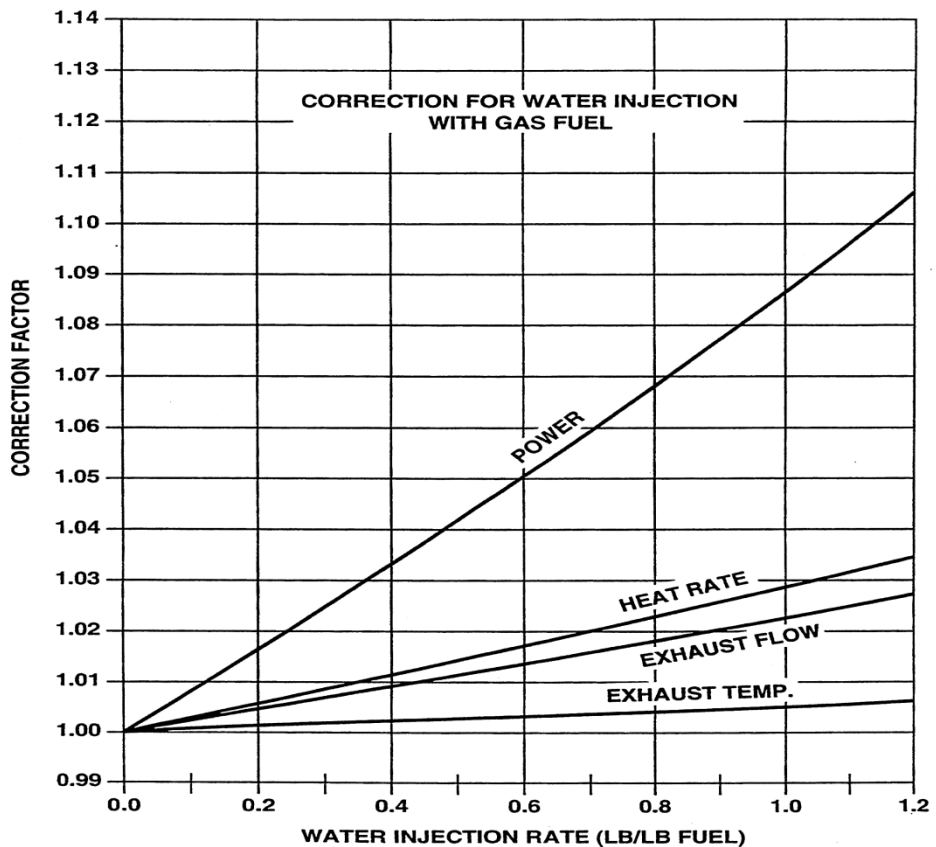
Gambar 5. 45 Faktor koreksi kelembaban udara



Gambar 5. 46 Pendinginan aliran udara masuk kompressor dengan chilling dan evaporative (injeksi kabut air).

5.9.4 Faktor injeksi air kedalam ruang bakar.

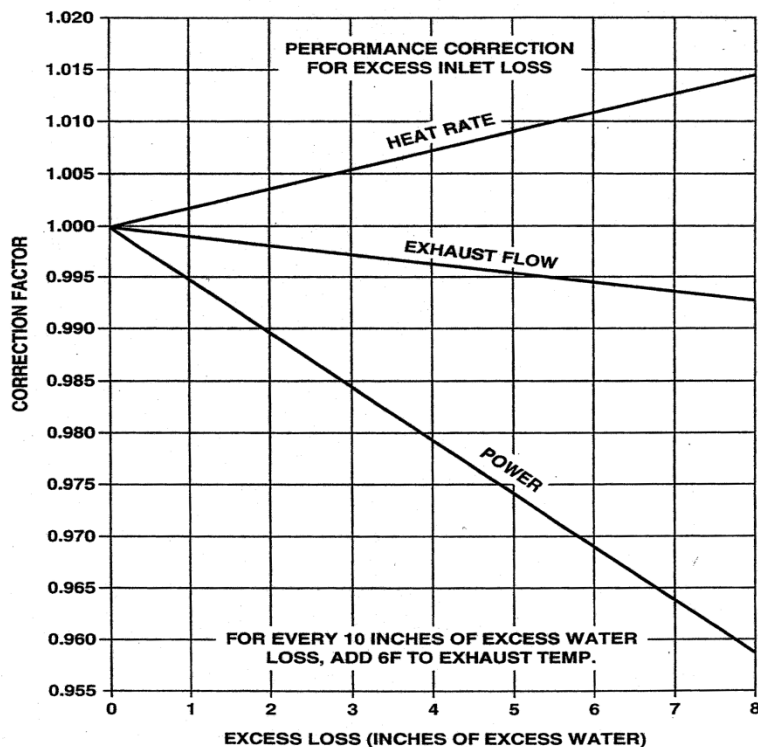
Injeksi air kedalam combustor diperlukan untuk menurunkan suhu pembakaran sehingga dapat mengurangi besarnya gas NO_x . Injeksi air akan menambah besarnya fluida yang menggerakkan turbin. Karena itu power output turbin menjadi semakin tinggi dengan bertambah besarnya injeksi air. Sedangkan heat ratenya mengalami peningkatan atau bertambah buruk karena sebagian panas dari bahan bakar digunakan untuk menguapkan air tsb. (Gambar 5.46).



Gambar 5. 47 Faktor koreksi terhadap injeksi air kedalam ruang bakar

5.9.5 Faktor hambatan pada saluran udara masuk kompressor.

Hambatan yang terjadi pada saluran udara masuk kompressor akan menurunkan tekanan udara disisi masuk kompressor, turunnya jumlah udara yang dihisap dan turunnya tekanan keluar kompressor. Akibat selanjutnya adalah turunnya output/power, dan bertambahnya heat rate (Gambar 5.47).



Gambar 5. 48 Faktor koreksi terhadap kerugian didalam

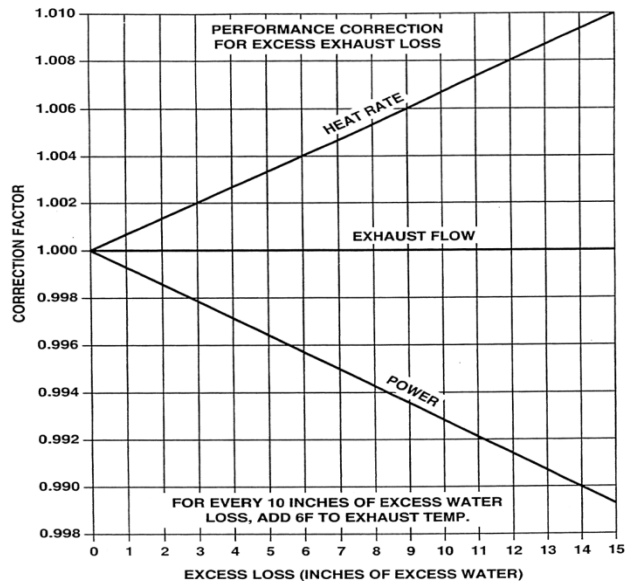
5.9.5 Faktor hambatan pada saluran gas keluar turbin

Hambatan yang terjadi pada laluan gas keluar turbin akan meningkatkan tekanan gas disisi keluar turbin dan menurunkan besarnya selisih entalpi antara gas panas masuk turbin dan gas panas keluar turbin. Turunnya selisih entalpi tsb atau sering disebut sebagai turunnya heat drop akan menurunkan daya mampu turbin gas (Gambar 5. 48). Hal semacam ini biasa terjadi pada turbin gas yang digunakan pada PLTGU dimana kotoran hasil pembakaran menempel pada pipa pipa HRSG (Heat Recovery Steam Generator) dan mempersempit saluran gas panas keluar turbin.

5.9.6 Faktor kekotoran kompressor.

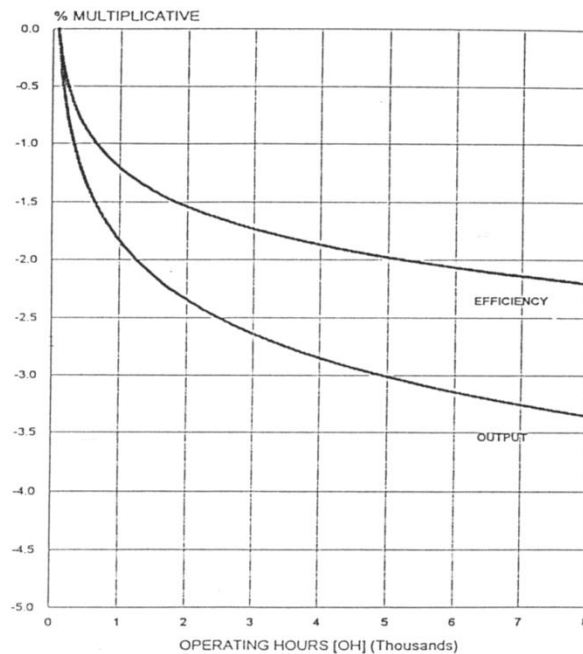
Udara atmosfir tidak bisa diharapkan bersih 100%. Udara akan selalu mengandung kotoran kotoran padat dalam ukuran yang sangat kecil. Kotoran kotoran limbah industri, asap kendaraan bermotor yang mengandung minyak

dan debu akan selalu ikut didalam udara. Kotoran kotoran dengan ukuran diatas 5 mikron akan dapat disaring didalam saringan yang ditempatkan didepan kompressor, tetapi kotoran kotoran yang lebih kecil akan lolos dan terbawa masuk kedalam kompressor. Kotoran



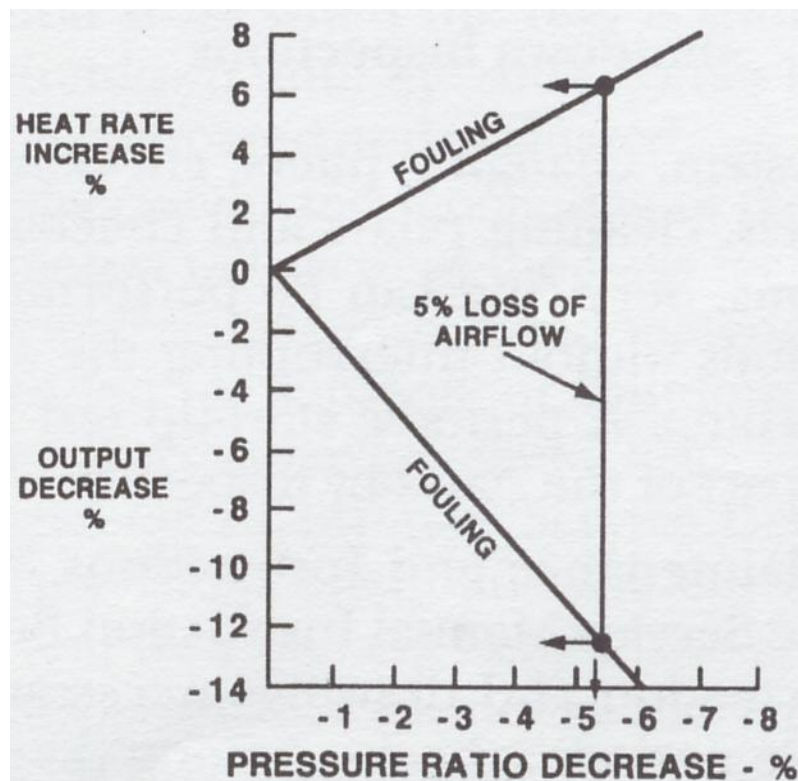
Gambar 5. 49 Koreksi terhadap kerugian didalam saluran

kotoran ini akan menempel pada sudu sudu kompressor dan menghambat jalannya udara untuk melewatinya.



Gambar 5. 50 Penurunan daya mampu dan efisiensi akibat bertambah kotornya compressor

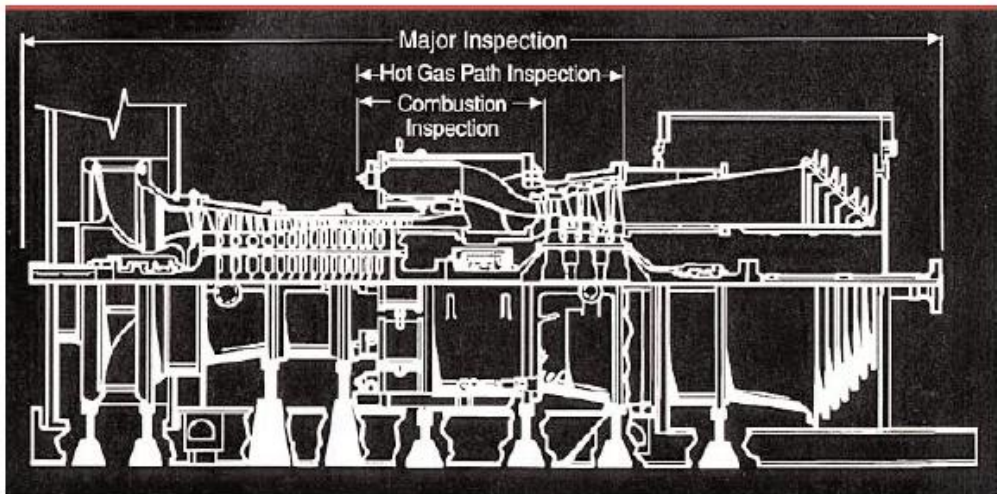
Gambar 5.50 menunjukkan turunnya daya mampu dan efisiensi turbin gas ABB GT 13E2 berdasarkan jam operasi setelah dilakukan pencucian compressor. Penurunan daya mampu dan efisiensi ini semata mata akibat bertambahnya kotoran didalam kompressor. Sedangkan Gambar 5.50 menunjukkan turunnya daya mampu dan naiknya Heat Rate berdasarkan turunnya perbandingan tekanan udara keluar dan masuk compressor. Dari gambar tersebut terlihat bahwa untuk penurunan perbandingan tekanan udara keluar dan masuk compressor sebesar 5,3% maka besarnya aliran udara akan turun sebesar 5%, daya mampu turun 12,2% dan Heat Rate akan naik sebesar 6,3%



Gambar 5. 51 Fakator penurunan daya mampu dan Heat Rate

5.10 PEMELIHARAAN TURBIN GAS

Pemeliharaan PLTG dibagi menjadi 2 golongan, yaitu pemeliharaan rutin dan Inspection / Overhaul. Pemeliharaan rutin terdiri dari pemeliharaan waktu operasi dan pemeliharaan waktu standby. Inspection/Overhaul adalah pemeliharaan yang memerlukan unit PLTG tidak beroperasi/keluar dari standby. Dilakukan setiap interval jam operasi tertentu, dengan urutan dari jenis yang paling ringan (Combustion Inspection), kemudian yang menengah (Hot Gas Path Inspection) dan yang terakhir adalah yang paling berat (Major Inspection). Gambar 5.51 menunjukkan jenis masing masing Inspection/Overhaul pada sebuah turbin gas GE Frame 9.



Gambar 5. 52 Jenis jenis overhaul

5.10.1 Pemeliharaan waktu operasi.

Pemeliharaan waktu operasi meliputi pengamatan parameter parameter operasi selama beroperasinya PLTG. Dimulai dengan membuat data operasi awal ketika PLTG dioperasikan pertama kali / unit masih baru atau setelah menjalani major overhaul. Data operasi awal ini kemudian digunakan sebagai reference untuk mengetahui jika PLTG terdapat kelainan. Data operasi harus diambil dengan interval waktu tertentu baik data waktu start maupun data ketika operasi normal. Data data tersebut meliputi:

Data turbin gas:

1. Putaran
2. Beban
3. Jumlah start dengan timbul pembakaran
4. Jumlah jam operasi
5. Tekanan atmosfir
6. Suhu: ambient, keluar kompressor, exhaust turbine, wheelspace turbine, pelumas pada header, metal bantalan, pelumas keluar bantalan,

7. Tekanan: keluar compressor, pelumas keluar pompa, pelumas pada header, air pendingin, bahan bakar, saringan saringan (bahan bakar, pelumas, saringan udara masuk compressor)
8. Vibrasi
9. Lamanya waktu start
10. Lamanya waktu stop

Data Generator

1. Tegangan keluar
2. Tegangan penguatan
3. Arus masing masing phasa
4. Arus penguatan
5. VAR
6. Suhu stator
7. Beban MW
8. Vibrasi

Jika ada parameter yang menunjukkan kelainan / diluar batas operasi yang ditentukan agar segera diambil tindakan untuk menghindari timbulnya kerusakan yang tidak diinginkan.

Pengamatan lebih lanjut terhadap data operasi harus dilakukan misalnya untuk:

- ✓ Hubungan antara beban dengan gas panas suhu keluar turbin.
- ✓ Penyebaran suhu gas panas keliling keluar turbin.
- ✓ Lamanya waktu start.
- ✓ Lamanya waktu stop.
- ✓ Tekanan pelumas
- ✓ Tekanan bahan bakar.
- ✓ Perubahan level vibrasi.

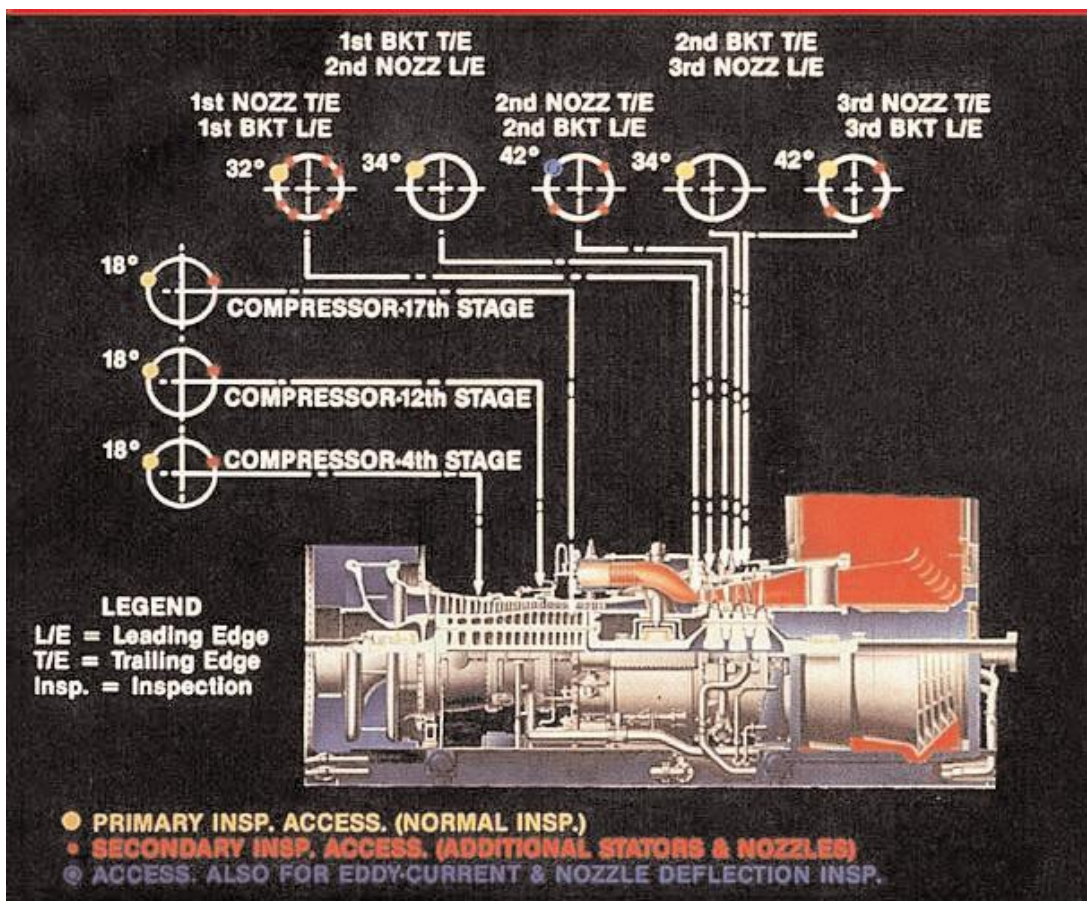
5.10.2 Pemeliharaan PLTG waktu standby.

Pemeliharaan waktu standby dilakukan terutama untuk PLTG yang difungsikan untuk tujuan mengatasi beban puncak atau untuk PLTG yang diperlukan ketika kondisi darurat. Karena itu harus dapat diyakinkan bahwa unit PLTG yang standby betul betul bisa start dan beroperasi dengan baik. Pemeliharaan dapat dilakukan pada kondisi standby, dengan demikian tidak akan mengurangi jam kesediaannya (availability hours).

Pemeliharaan PLTG waktu standby meliputi:

- Pemeriksaan kondisi battery, apakah masih memiliki amper jam yang cukup
- Perlindungan peralatan listrik dan kontrol dari kelembaban udara yang bisa merusak tahanan isolasi.
- Pemeriksaan dan pembersihan nosel bahan bakar.
- Secara periodik dilakukan percobaan start sampai dengan parallel.

Termasuk kedalam pemeliharaan standby adalah pemeriksaan boroscope, yaitu pemeriksaan bagian dalam turbin gas dengan menggunakan alat borscope, untuk mengetahui apakah ada kelainan pada bagian dalam kompressor dan turbin seperti retak, bengkok akibat panas atau benda asing. Sebaiknya pemeriksaan boroscope dilakukan oleh tenaga ahli yang sudah bersertifikat. Gambar 5.52 menunjukkan posisi posisi pemeriksaan boroscope untuk turbin gas GE.



Gambar 5. 53 Posisi lubang pemeriksaan boroscope

5.10.3 Combustion Inspection

Combustion inspection adalah pemeliharaan turbin gas pertama yang memerlukan unit berhenti / keluar dari stand by. Pemeriksaan dilakukan dengan melepas bagian bagian turbin gas yang paling rawan terhadap panas nyala api pembakaran, dan kerusakan bagian ini akan berakibat pada kerusakan bagian hilir aliran gas panas seperti sudu tetap dan sudu jalan turbin. Bagian bagian yang perlu mendapat pemeriksaan antara lain adalah nozel bahan bakar, combustion liner, transition piece (penghubung antara combustion liner dengan sudu tetap 1 turbin), dan sudu tetap tingkat 1 turbin. Pemeriksaan bagian turbin juga dilakukan dengan menggunakan boroscope. Pemeriksaan ditujukan kepada kelainan bentuk seperti luka karena benda

asing, bengkok, aus dan retak. Pemeriksaan dilakukan baik secara visual maupun dengan penetrant test.

Untuk memperpendek waktu inspection, maka part pengganti harus sudah disediakan terlebih dahulu, pelepasan part langsung disertai dengan penggantian dengan part baru atau part yang sudah diperbaiki. Pemeriksaan / inspection dan perbaikan (jika diperlukan) dilakukan kemudian setelah PLTG beroperasi kembali.

5.10.4 Hot Gas Path inspection

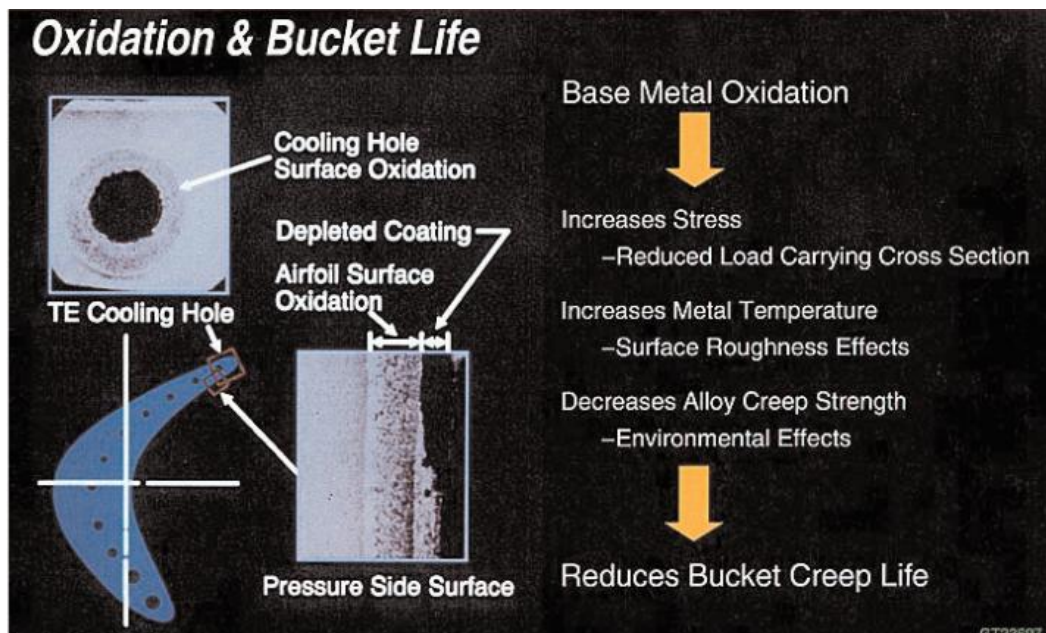
Pemeriksaan Laluan Gas Panas (Hot Gas Path Inspection) meliputi pemeriksaan terhadap bagian bagian yang ter masuk kedalam Combustion Inspection ditambah dengan pemeriksaan secara detail pada bagian bagian turbin baik yang diam (sudu tetap) maupun yang bergerak (sudu jalan). Untuk melaksanakan jenis pekerjaan ini, casing turbin harus dibuka dengan melepas baut baut pengikatnya. Casing bagian atas diangkat dan dibalik, untuk tujuan pemeriksaan.

Diluar pekerjaan Combustion Inspection yang sudah dikemukakan diatas, pekerjaan Hot Gas Inspection meliputi pemeriksaan terhadap:

- ✓ Sudu jalan tingkat 1, 2 dst terhadap luka benda asing, retak, erosi, oksidasi, berubah bentuk, mengelupasnya lapisan (coating).
- ✓ Sudu tetap tingkat 1,2 dst terhadap luka benda asing, retak, erosi, oksidasi, berubah bentuk, mengelupasnya lapisan (coating).
- ✓ Perapat (seal/labirint) terhadap luka gesekan dan clearance.
- ✓ Laluan gas panas setelah turbin terhadap pecah, retak dan lainnya.
- ✓ Kondisi thermocouple, jika perlu diganti.

Pemeriksaan terhadap sudu jalan maupun sudu tetap dilakukan dengan menggunakan cairan penetrant, yang akan menunjukkan lebih jelas terhadap adanya retak.

Coatings memegang peranan penting didalam melindungi beroperasinya sudu turbin pada suhu tinggi bahwa kekuatan metal sudu turbin tetap berada koridor design yang diharapkan. Terkelupasnya coating akan menyebabkan oksidasi dan akan memperpendek umur opoerasinya. Gambar 5.54 menunjukkan proses oksidasi dan penurunan umur sudu turbin (bucket creep life).



Gambar 5. 54 Proses oksidasi sudu turbin tingkat 1 GE

5.10.5 MAJOR INSPECTION.

Major Inspection adalah untuk memeriksa seluruh bagian dalam turbin gas, baik yang bergerak maupun yang diam, dari mulai sisi masuk compressor sampai dengan keluar turbin.

Pekerjaan pekerjaan yang dilaksanakan didalam major inspection meliputi semua pekerjaan yang terkait dengan Hot Gas Path Inspection, ditambah dengan:

- ✓ Pemeriksaan clearance radial + axial terhadap clearance awal.
- ✓ Pemeriksaan keretakan dan erosi pada bagian casing, shell dan frame / diffuser.
- ✓ Pemeriksaan terhadap kotoran, erosi dan bocoran pada sisi masuk dan laluan udara compressor.
- ✓ Pemeriksaa Inlet Guide Vane terhadap retak, aus dan corosi.
- ✓ Pemeriksaan clearance (celah) dan bekas gesekan antara rotor dan stator dilakukan baik pada bagian compressor maupun bagian turbin,
- ✓ Pemeriksaan terhadap retak, bengkok, corrosi, tumbukan benda asing. corrosi dilakukan terhadap sudu sudu compressor
- ✓ Sudu jalan turbin dilepas dan diperiksa terhadap mengelupasnya coating dan keretakan. Cakra pemegang sudu juga dioeriksa terhadap keretakan.
- ✓ Bearing diperiksa terhadap clearancenya dengan poros, juga terhadap keausan / keretakan.
- ✓ Laluan udara masuk compressor diperikas terhadap sambungan kendor pada silencer, korosi dan retak.
- ✓ Saluan gas bekas keluar turbin diperiksa terhadap keretakan / pecah pada silencer.
- ✓ Sambungan kopling antara turbin dan generator juga antara turbin dan alat bantu diperiksa alignmentnya.

5.10.6 FAKTOR FAKTOR YANG MEMPENGARUHI MASA PEMELIHARAAN

Bagian turbin gas terutama bagian yang terkena panas umurnya sangat dipenga-ruhi oleh intensitas suhu nyala api yang terjadi didalam ruang bakar, dan intensitas suhu nyala api dipengaruhi oleh jenis bahan bakar yang digunakan dan

tingginya pembebanan. Disamping itu umur peralatan turbin gas juga dipengaruhi oleh baban siklik yang terjadi, dan beban siklik ditentukan oleh jumlah start dan stop yang dilakukan dan jumlah trip (stop diluar stop normal) yang terjadi.

Tabel 5. 4 Faktor yang mempengaruhi umur peralatan / interval pemeliharaan

Jenis Faktor yang mempengaruhi	Nilai faktor
Faktor jam operasi	
• Bahan bakar gas	1
• Bahan bakar distilate	1,5
• Bahan bakar crude oil	2 atau 3
• Bahan bakar residu	3 atau 4
• Beban puncak	6
• Injeksi uap	1
• Injeksi air	1,9
• Jumlah kali start	20
Faktor start	
• Trip dari beban penuh	8
• Start cepat	2
• Start sangat cepat (emergency)	20

Turbin Gas buatan General Electric type MS6B dan MS7EA menentukan interval pemeriksaan bagian ruang bakar sebesar 8000 jam atau 400 kali start mana yang dicapai lebih dulu, bagian turbin / laluan gas panas sebesar 24000 jam operasi atau 1200 kali start, dan pemeriksaan seluruh bagian turbin pada jam operasi 48000 jam atau 2400 kali start. Hal tersebut jika turbin gas dioperasikan dengan bahan bakar gas. Jika diopersikan dengan bahan bakar minyak solar (distilate), maka interval pemeriksaan menjadi lebih sering, sebagaimana dapat dilihat pada tabel 5.4. dan contoh soal.

Dari tabel diatas dapat dihitung pada jam operasi berapa turbin gas harus dilakukan overhaul (inspection). Untuk jelasnya ikuti contoh soal berikut:

Contoh soal

Sebuah turbin gas dioperasikan dengan minyak solar (distillate), mempunyai jumlah start 100, jam operasi 12000 jam dan trip dari beban penuh 3 kali. Pada jam operasi berapa lagi turbin gas tersebut harus dilakukan overhaul bagian turbinnya?.

Jawaban:

Jam operasi equivalent: $1,5 \times 12000 + 100 \times 20 + 3 \times 8 \times 20 = 20\,460$ jam. Sisa jam operasi menjelang overhaul turbin = $24000 - 20460 = 3540$ jam atau kurang lebih = 5 bulan lagi.

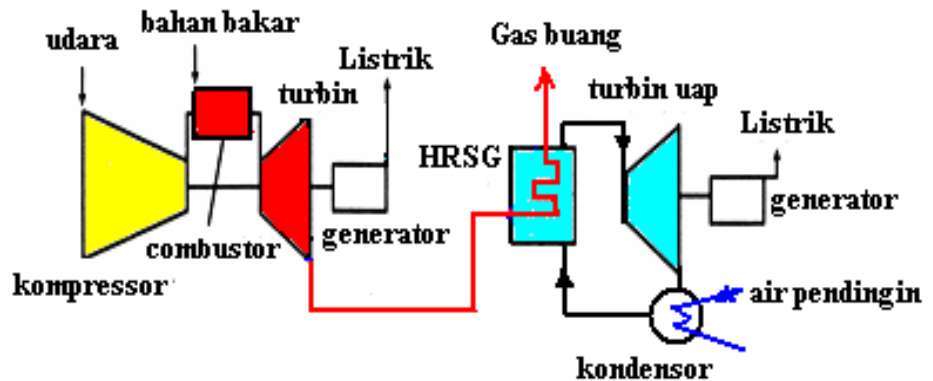
BAB VI

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS DAN UAP

6.1 UMUM

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) atau juga dikenal sebagai Combined Cycle Power Plant (Pembangkit Listrik dengan Siklus Gabungan) adalah merupakan gabungan antara PLTG dan PLTU (Gambar 6.1). Gas panas keluar turbin gas yang suhunya relatif tinggi (500°C) digunakan untuk memanaskan air dan memproduksi uap, dan uap tersebut digunakan untuk memutar turbin generator untuk menghasilkan listrik. Dengan demikian diperoleh efisiensi gabungan yang lebih tinggi dibanding efisiensi masing masing PLTU maupun PLTG.

Proses pemanasan air dan pembentukan uap terjadi didalam Heat Recovery Steam Generator (HRSG) sebagai pengganti boiler pada PLTU. HRSG berfungsi sebagai penukar kalor yang akan memindahkan panas yang terkandung didalam gas bekas ke air dan uap. Karena fungsinya sebagai penukar kalor maka HRSG harus dapat menangkap sebagian besar panas yang terkandung didalam gas bekas, karena itu diperlukan luas permukaan yang besar. Untuk memenuhi tujuan tersebut konstruksi HRSG terdiri dari sejumlah pipa yang dilengkapi dengan sirip sirip diseluruh panjang pipa.

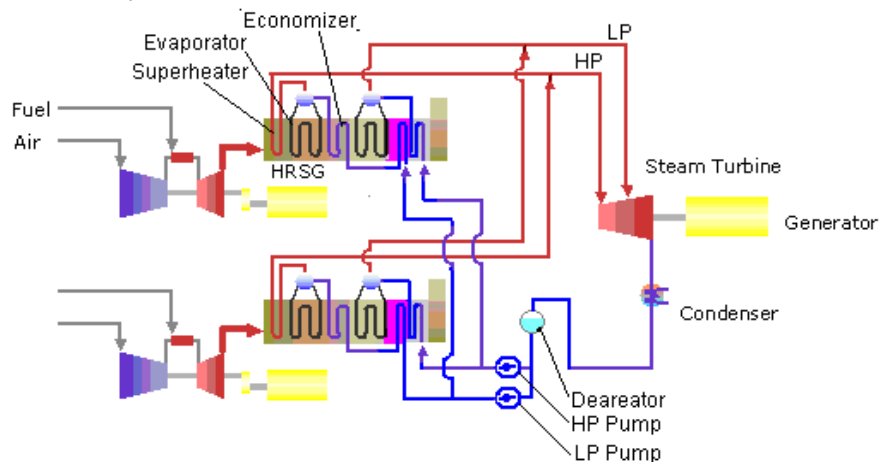


Gambar 6. 1 Susunan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap tekanan tunggal

6.2 KLASSIFIKASI PLTGU

Dari berbagai jenis konstruksi PLTGU, maka dapat dibedakan satu dan lainnya sebagai berikut:

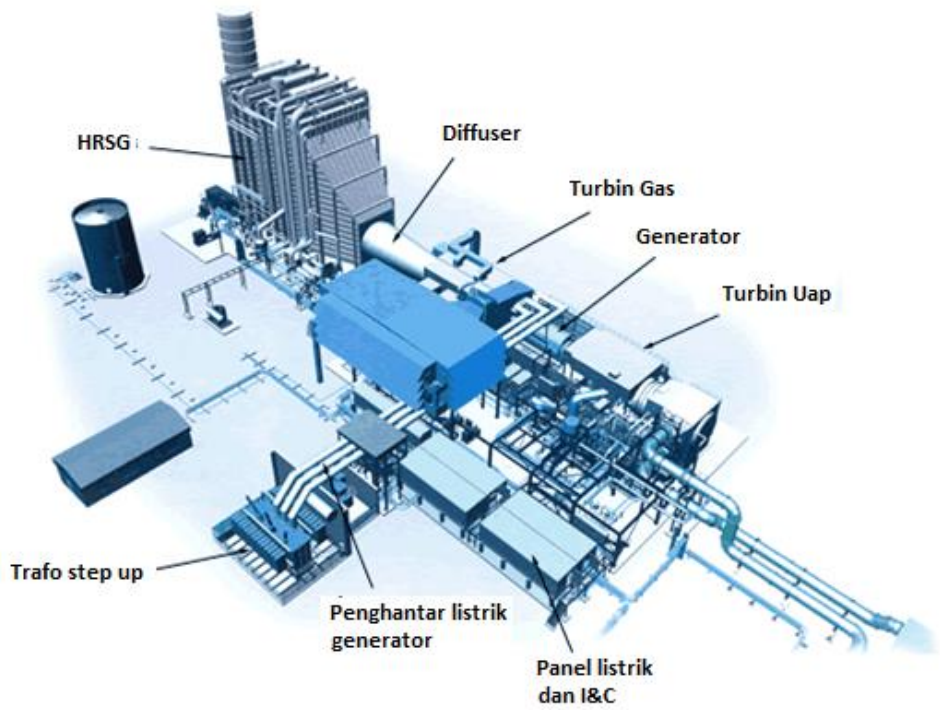
- Berdasar pola pembakarannya:
 - Fired combined cycle, terdapat tambahan pembakaran pada sisi gas masuk HRSG. Oleh karena kandungan oksigen keluar turbin gas masih relatif tinggi, tambahan pembakaran sebelum HRSG tidak memerlukan kipas udara lagi.
 - Unfired combined cycle, tanpa tambahan pembakaran pada sisi masuk HRSG.
- Berdasar pada tekanan uap:
 - Single pressure (tekanan tunggal) (Gambar. 6.1).
 - Double pressure (tekanan tinggi dan tekanan rendah Gambar 6.2).
 - Multiple pressure (tekanan lebih dari 2)



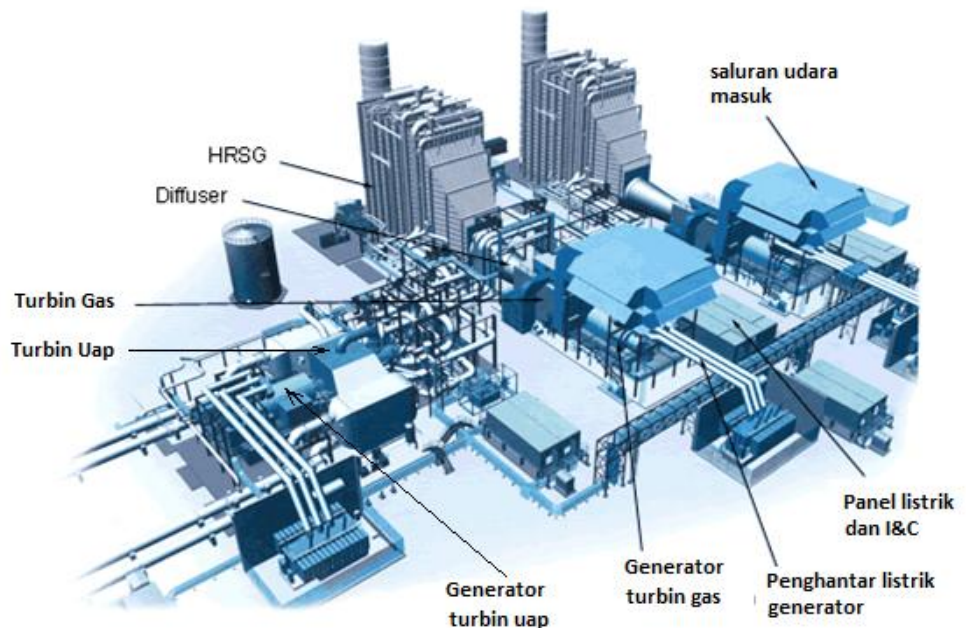
Gambar 6. 2 Susunan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap tekanan

– Berdasar pada susunan turbinnya:

- Single shaft (poros tunggal). Antara poros turbin gas dan poros turbin uap tersambung menjadi satu. (Gambar 6.3)
- Susunan 2-2-1 (2 Turbin Gas, 2 HRSG dan 1 Turbin Uap / Gambar 6.4). Dalam susunan ini masing masing turbin gas memiliki HRSG sendiri sendiri dan dari masing masing HRSG hasil uapnya kemudian digabungkan menjadi satu untuk menggerakkan satu turbin uap yang memutar satu generator. Dengan pola semacam ini juga bisa disusun dalam komposisi 3.3.1
- Susunan 2-1-1 (2 Turbin Gas, 1 HRSG, 1 Turbin Uap). Disini gas panas dari masing masing turbin gas dimasukkan kedalam satu HRSG dan uap dari HRSG tersebut digunakan untuk menggerakkan satu turbin uap.



Gambar 6. 3 Susunan PLTGU poros tunggal



Gambar 6. 4 Susunan PLTGU 2.2.1

6.3 KEUNTUNGAN DAN KERUGIAN

Dibanding jenis pembangkit yang lain, PLTGU mempunyai beberapa keuntungan dan kerugian. Adapun keuntungannya antara lain adalah sbb:

- Efisiensi lebih baik dari jenis pembangkit yang lain. Dibanding PLTU yang mempunyai efisiensi 40 % dan PLTG 30%, PLTGU bisa memiliki efisiensi sampai 60%.
- Biaya investasi lebih murah. Dibanding PLTU biaya investasinya lebih murah.
- Masa pembangunan yang lebih pendek. Dibanding PLTU dan PLTA, PLTGU memerlukan waktu pembangunan yang lebih pendek.
- Lebih mudah mengikuti fluktuasi beban. Dibanding dengan PLTU Batubara yang pembakaran bahan bakarnya lambat, dan PLTN yang مخصوص untuk beban dasar, PLTGU lebih mudah untuk mengikuti fluktuasi beban.

- Tidak memakan banyak tempat. Untuk kapasitas yang sama, PLTGU memerlukan lahan yang lebih sedikit dibanding PLTU.

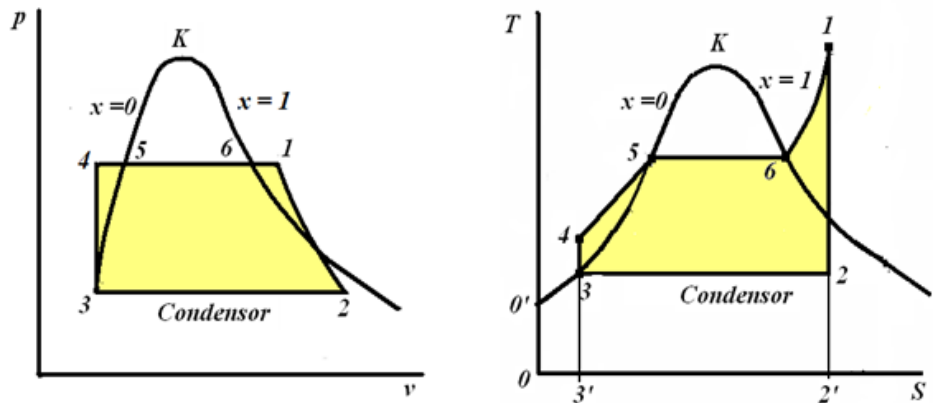
Adapun kerugiannya antara lain adalah sebagai berikut :

- Jenis bahan bakar terbatas pada jenis bahan bakar gas dan cair saja yang harganya relatif lebih mahal.
- Bahan bakar cair memerlukan treatment terlebih dahulu untuk menghindari korosi suhu tinggi pada bagian turbin gasnya.
- Umur turbin gas dan HRSG nya lebih pendek dibanding umur PLTU.

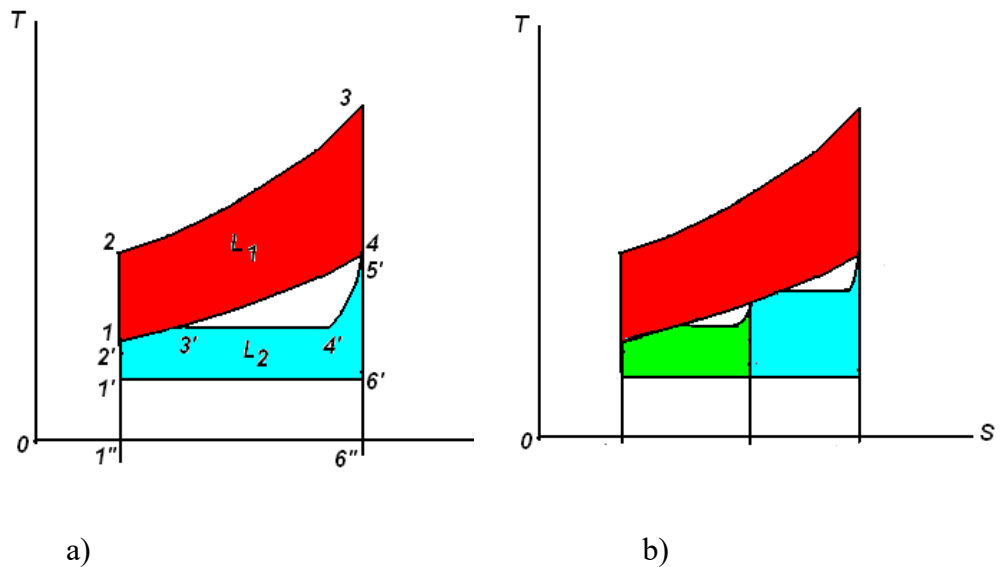
6.3 SIKLUS KOMBINASI.

Didalam PLTGU berlangsung dua siklus sekaligus, yaitu siklus udara dan gas panas yang berlangsung didalam turbin gas dan siklus air dan uap yang berlangsung pada sisi turbin uap. Siklus udara dan gas panas dikenal sebagai siklus Brayton (Gambar 6.2) dan siklus air - uap dikenal sebagai siklus Rankine (Gambar. 6.5). Gabungan antara keduanya disebut sebagai Siklus Kombinasi (Combined Cycle) dan digambarkan dengan diagram T-S seperti terlihat pada Gambar 2.6

Gambar 6.6 menunjukkan sebuah siklus gabungan dengan tekanan uap tunggal. Besar-nya panas yang diberikan oleh pembakaran bahan bakar adalah sesuai luas $1''-2-3-6''-1$ dan panas keluar turbin gas sesuai luas $1''-1-4-6''-1$, dan kerja yang diperoleh didalam turbin gas adalah sesuai luas $1-2-3-4-1$. Panas yang keluar turbin gas, dimanfaatkan untuk pemanasan air dan pembentukan uap, dan besarnya panas yang bisa diserap oleh air dan uap adalah sesuai luas $1''-2'-3'-4'-5'-6''-1''$. Panas yang dibuang didalam siklus air uap adalah sebesar luas $1''-1'-6'-6''-1''$, sehingga besarnya kerja yang diperoleh didalam siklus air uap adalah sebesar luas $1'-2'-3'-4'-5'-6'-1'$.



Gambar 6. 5 Siklus Rankine



Gambar 6. 6 Siklus gabungan:

- a) dengan tekanan uap tunggal.
- b) dengan tekanan uap ganda

Dari Gambar 6.6 terlihat bahwa tidak semua panas yang dilepas turbin gas dapat diserap oleh air dan uap didalam HRSG, karena sifat alami air dan uap itu sendiri. Panas yang tidak bisa diserap tersebut adalah sebesar luasan 3'-4-5'-4'-3'. Untuk memperkecil jumlah panas yang tidak bisa diserap tersebut, maka siklus air uap dibuat menjadi dua tingkat tekanan yaitu tingkat rendah

dan tingkat tinggi sebagaimana ditunjukkan didalam Gambar 6.6. Untuk lebih memperkecil lagi besarnya panas yang tidak bisa diserap, maka tingkat tekanan air dan uap dibuat lebih dari dua tingkat atau disebut juga sebagai multiple pressure. Dengan Gambar 6.6 ini nampak jelas bahwa siklus gabungan yang berlaku bagi sebuah PLTGU mempunyai efisiensi yang lebih baik dibanding PLTG maupun PLTU.

Besar energi panas yang dapat diserahkan oleh gas panas keluar turbin gas adalah sama besar dengan energi panas yang dapat diserap oleh air sampai menjadi uap didalam HRSG. Energi panas dari gas panas keluar turbin gas yang diserahkan kepada air sampai menjadi uap didalam HRSG adalah sebesar enthalpi gas masuk HRSG (h_{g4}) dikurangi enthalpi gas keluar HRSG ($h_{g1'}$), sedang besar energi panas yang dapat diserap oleh air sampai menjadi uap didalam HRSG adalah sebesar enthalpi uap keluar HRSG ($h_{u5'}$) dikurangi enthalpi air masuk HRSG ($h_{a2'}$) atau dapat ditulis:

$$Q_{\text{gas}} = Q_{\text{uap}}$$

$$G_g (h_{g4} - h_{g1'}) = G_u (h_{u5'} - h_{a2'})$$

6.4 BAGIAN BAGIAN UTAMA PLTGU

PLTGU terdiri dari dua bagian utama yaitu bagian PLTG dan bagian PLTU. Secara rinci bagian bagian utama PLTGU adalah:

- Turbin gas (sudah dibahas).
- Diverter Damper (untuk membelokkan arah aliran gas panas).
- HRSG (Heat Recovery Steam Generator) sebagai pengganti boiler pada PLTU.
- Turbin Uap & kelengkapannya (sudah dibahas pada Pembangkit thermal 1)
- Condenser & kelengkapannya (sudah sudah dibahas pada Pembangkit thermal 1)

- Pompa air pengisi HRSG.

Oleh karena bagian bagian tersebut telah dibahas sebelumnya, maka tidak akan dibahas lagi kecuali untuk yang menyangkut perbedaan perbedaannya saja. Tabel 6.1 menunjukkan perbedaan perbedaan antara PLTU subkritis yang ada di Indonesia pada umumnya dengan bagian PLTU pada PLTGU.

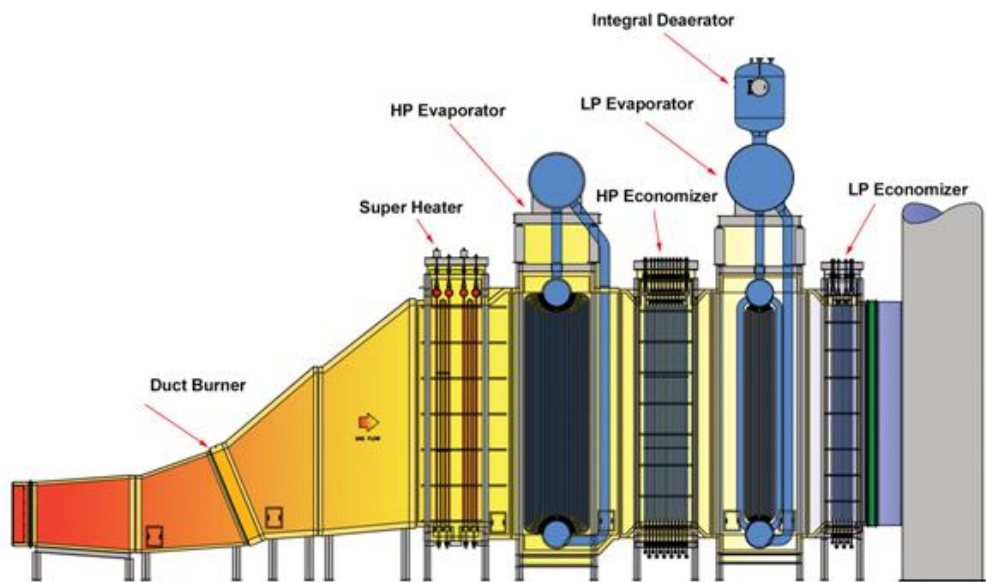
HRSG (Heat Recovery Steam Generator)

Sesuai namanya adalah untuk menyerap panas yang terkandung didalam gas bekas PLTG. Gas bekas PLTG mengalir memotong sisi luar pipa pipa HRSG. Bagian dalam pipa pipa tsb berisi air atau uap. Karena itu panas gas bekas akan menyebabkan air didalam pipa suhunya bertambah tinggi, berubah fasa menjadi uap dan akhirnya dipanaskan lanjut menjadi uap panas lanjut. Uap yang dihasilkan didalam HRSG kemudian digunakan untuk memutar turbin dan generator guna menghasilkan listrik. Sesuai dengan konfigurasi PLTGU nya, maka HRSG disusun dengan tekanan tunggal, tekanan ganda atau tekanan lebih dari 2. Gambar 6.7 menunjukkan sebuah HRSG aliran horizontal dengan tekanan ganda, masing masing tekanan tinggi dan tekanan rendah.

Tabel 6. 1 Perbedaan PLTU subkritis dengan bagian PLTU pada PLTGU

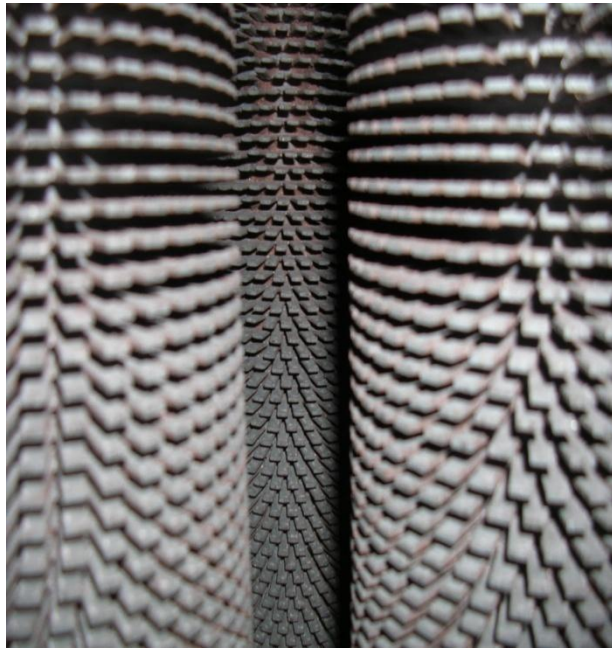
	PLTU	PLTGU
Pembangkit Uap	Boiler	HRSG
Sirkulasi air	Sirkulasi alam	Sirkulasi alam atau paksa
Tekanan	Constant pressure (tekanan tetap)	Sliding pressure (tekanan tergantung dari beban PLTG).
Jenis tekanan	Tekanan tunggal + reheat	Tekanan ganda, tiga tekanan + non reheat
Pemanan awal air pengisi boiler	LP heater, deaerator, HP Heater	Deaerator
Pembakaran	Didalam ruang bakar boiler	Didalam ruang bakar turbin gas
Jenis pipa evaporator	Pipa pipa dinding air (Waterwall tubes)	Fin tubes (pipa pipa bersirip)
Perpindahan panas sisi gas panas	Radiasi & konveksi	konveksi

Proses perpindahan panas yang terjadi didalam HRSG, berlangsung secara konveksi dan konduksi. Konveksi terjadi didalam laluan gas panas dari turbin gas, antara gas panas dan dinding pipa bagian luar. Konduksi (menjalar) terjadi pada dinding pipa dari dinding pipa bagian luar menuju dinding pipa bagian dalam.



Gambar 6. 7 HRSG horizontal dengan bagian bagiannya (CB Energy)

Selanjutnya konveksi juga terjadi antara dinding pipa bagian dalam dengan air atau uap. Oleh karena masa jenis gas bekas disatu sisi jauh lebih kecil dibanding masa jenis air dilain sisi, maka diperlukan luas bidang permukaan pada sisi gas panas lebih besar dibanding pada sisi air. Untuk memenuhi hal tersebut bagian luar pipa / sisi gas bekas dibuat dengan banyak sirip sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 6.8

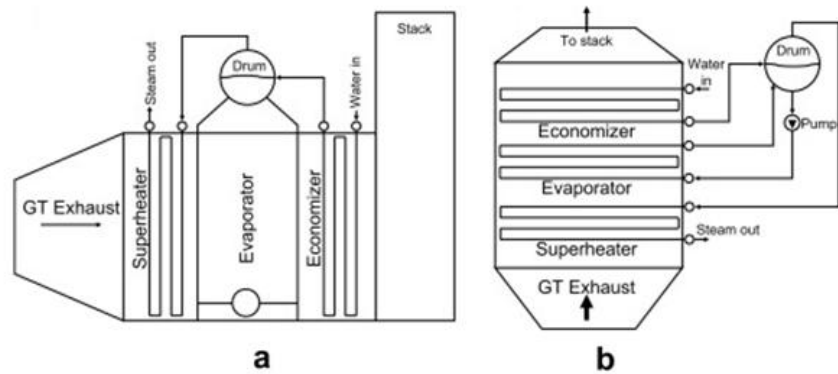


Gambar 6. 8 Permukaan pipa HRSG sisi gas panas

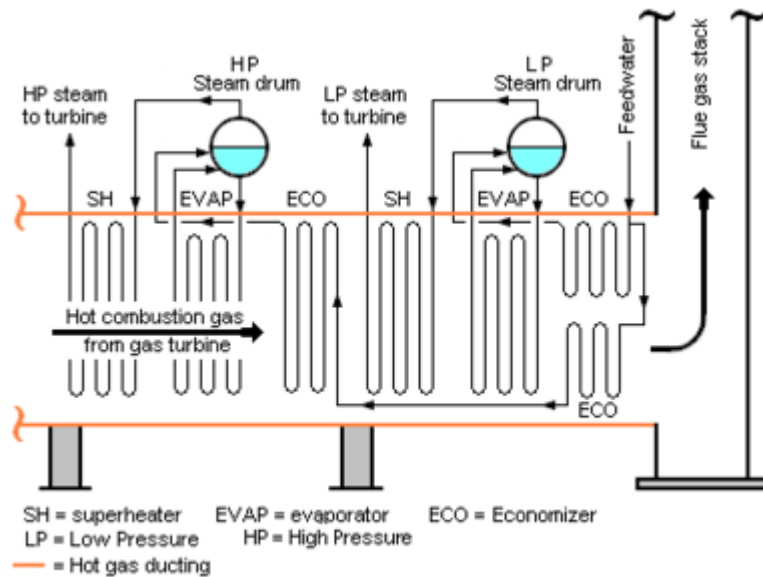
Dari segi aliran gas panas yang mengalir didalam HRSG dibedakan HRSG dengan aliran gas horizontal (dengan susunan pipa pipa vertical) dan HRSG dengan aliran gas vertical (dengan susunan pipa pipa horisontal). Pada HRSG dengan aliran gas horizontal, biasanya sirkulasi air yang ada didalam evaporatornya (dengan pipa pipa tegak lurus) merupakan sirkulasi alam, sedang pada HRSG dengan aliran gas vertical sirkulasi air yang ada didalam evaporatornya (dengan susunan pipa pipa horizontal) adalah sirkulasi paksa (dengan menggunakan pompa). Dari kedua jenis HRSG tersebut, aliran gas panas membentuk perpotongan tegak lurus terhadap aliran air didalam pipa pipa economizer, aliran air / uap didalam pipa pipa evaporator dan aliran uap didalam pipa pipan superheater.

Dalam beberapa hal oleh karena kebutuhan untuk memproduksi uap adalah besar sementara kandungan oxygen didalam gas bekas keluar PLTG masih banyak, maka dilakukan tambahan pembakaran didepan pipa pipa

HRSG atau yang disebut sebagai duct burner. HRSG semacam ini disebut sebagai Fired HRSH.



Gambar 6. 9 Susunan pipa pipa HRSG dengan a) aliran gas horizontal dan b) aliran gas vertical (www. Science direct. com. 05June 2013)



Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

Gambar 6. 10 Susunan pipa pipa HRSG aliran gas horizontal tingkat tekanan ganda (en.citizendium.org. 05 June 2013)

HRSG

Sebagaimana yang telah dijelaskan di atas bahwa HRSG biasanya terdiri dari kumpulan pipa-pipa pemanas yang berfungsi sebagai economizer, evaporator, dan superheater, ditambah dengan drum uap dan pompa sirkulasi.

Ekonomiser merupakan alat penukar kalor untuk memanaskan awal air pengisi ketel sebelum masuk ke evaporator. Ekonomiser diletakkan pada bagian terakhir dari aliran gas panas dimana suhunya sudah rendah. Oleh karena bahan bakar turbin gas pada dasarnya merupakan bahan bakar gas yang bersih dari unsur-unsur korosi, maka suhu gas panas keluar ekonomiser dapat dibuat rendah. Karena itu dalam beberapa hal, suhu gas panas keluar economizer dimanfaatkan pula untuk memanaskan air yang akan masuk deaerator. Bagian ini dikenal dengan sebutan deaerator preheater.

Evaporator merupakan alat penukar kalor yang didalamnya terjadi proses perpindahan fasa dari air menjadi uap. Gelembung-gelembung uap dan air bergerak bersama-sama dari bawah ke atas dan menuju drum.

Drum uap merupakan bejana tekan silindris yang terletak di bagian atas HRSG. Di bagian dalam drum, terdapat peralatan mekanis (seperti cyclone dan screen pemisah) untuk menangkap air yang terbawa oleh uap untuk dikembalikan lagi ke evaporator melalui down comer.

Uap yang keluar dari drum menuju superheater merupakan uap kering setelah bagian airnya dipisahkan. Uap basah akan membawa kotoran-kotoran padat yang akan membentuk kerak di bagian dalam pipa superheater, dan akan mengakibatkan temperatur logam pipa naik, kehilangan kekuatan dan akhirnya pipa tersebut menjadi pecah.

Superheater merupakan alat penukar kalor pada HRSG yang meningkatkan kualitas uap jenuh dari drum menjadi uap panas lanjut (superheated steam). Untuk mengendalikan suhu uap keluar superheater, superheater dilengkapi dengan kontrol temperatur uap dengan menginjeksikan air dari deaerator kedalam superheater inlet header.

Diverter Damper

Diverter damper berguna untuk mengarahkan aliran gas panas keluar turbin gas menuju atmosfer ketika PLTG beroperasi sendiri, atau mengarahkan aliran gas panas ke HRSG ketika beroperasi kombinasi dengan turbin uap. Diverter damper dilengkapi dengan penggerak hidrolis, dimana gerakannya telah ditentukan untuk posisi membuka penuh atau menutup penuh saja, tidak ada posisi mengambang. Posisi menutup dimaksudkan bahwa damper menutup saluran menuju HRSG, dan membuka saluran menuju atmosfer. Sebaliknya disebut posisi membuka ketika damper membuka saluran menuju HRSG dan menutup saluran menuju atmosfer.

Sistem udara perapat (seal air) digunakan untuk mencegah bocornya gas panas melalui celah celah antara permukaan permukaan yang saling berimpit. Sistem udara perapat memberikan udara perapat baik ketika diverter dampernya membuka penuh atau menutup penuh. Jadi udara perapat mencegah gas panas lolos ke atmosfer ketika beroperasi combined, dan mencegah gas panas lolos ke HRSG ketika PLTG beroperasi sendiri tanpa combined. Untuk mengalirkan udara perapat digunakan kipas udara dilengkapi dengan katup pengatur untuk mengatur tekanan perapatan pada permukaan permukaan yang berimpit antara damper dan dinding saluran. Katup pengatur udara perapat akan membuka atau menutup ketika damper bergerak dan melewati posisi sudut 30 dan 60 derajat dari aliran gas panas.

Baik diverter dampernya sendiri maupun udara perapatnya dapat dioperasikan secara remote dari ruang kontrol atau secara manual dari lokal.



Gambar 6. 11 Diverter Damper

■ PROFIL PENULIS ■

IR. Habib Rochani., MM

Pakar pembangkit tenaga listrik nasional



IR. Habib Rochani., MM

Lahir pada tahun 1947, beliau adalah lulusan Strata 2 dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dan kini dikenal luas sebagai salah satu pakar pembangkit tenaga listrik nasional.

Karier profesionalnya di PT PLN (Persero) merentang panjang dengan berbagai posisi strategis di hampir seluruh pembangkit termal. Beliau mengawali karier sebagai Shift Operation Foreman of Steam Power Plant (1971–1975), memimpin para operator di PLTU Tanjung Priuk (2x50 MW & 2x25 MW), Jakarta. Pada tahun 1975–1978, beliau dipercaya menjadi Mechanical Maintenance Supervisor di PLTU yang sama serta di Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) 3x25 MW, dengan tanggung jawab penuh menjaga keandalan mesin pembangkit.

Selanjutnya, pada 1978–1983, beliau menjabat sebagai Manager of Operation and Maintenance untuk PLTG & Transmission Line Pulogadung, Jakarta. Puncak dedikasinya di PLN diembannya sebagai General Manager of Muara Karang Steam and Combined Cycle Power Plant, di mana beliau memimpin organisasi besar yang mengelola PLTU (3x100 MW + 2x200 MW), PLTGU Muara Karang (2x500 MW), dan PLTGU Muara Tawar (700 MW).

Setelah purna tugas, dedikasi beliau di sektor ketenagalistrikan terus berlanjut. Sejak tahun 2001 hingga saat ini, beliau mengabdikan sebagai dosen di Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi, Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi PLN (ITPLN) Jakarta. Selain itu, sejak tahun 2015, beliau juga aktif sebagai Power Plant Employees Competency Assessor and Maintenance Technical in Charge di PT ELESKA HAKIT.

Selama berkarier di dunia akademis dan asesmen, beliau tidak hanya mencetak mahasiswa yang unggul, tetapi juga menghasilkan banyak profesional praktis yang kompeten. Beliau berkontribusi besar melahirkan tenaga ahli level 2 hingga tingkat yang lebih tinggi dalam strata Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNI) di bidang pembangkitan energi listrik.

Melalui buku ini, penulis berharap dapat membagikan pengalaman dan pengetahuan panjangnya untuk terus berkontribusi bagi negara, khususnya dalam pengembangan keilmuan di sektor ketenagalistrikan.