

**EVALUASI SISTEM KOMBINASI ANTARA GAS DAN UAP UNTUK  
MENGHITUNG BESARNYA DAYA LISTRIK YANG DIBANGKITKAN  
OLEH TURBIN GAS DAN UAP PADA PT. ENERGI SENKANG**



**105820060810**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LISTRIK  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR**

**2014**

**EVALUASI SISTEM KOMBINASI ANTARA GAS DAN UAP UNTUK  
MENGHITUNG BESARNYA DAYA LISTRIK YANG DIBANGKITKAN  
OLEH TURBIN GAS DAN UAP PADA PT. ENERGI SENGKANG**



**SUARDI**  
**10582006081**

**AHMAD YAMIN**  
**105820061210**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LISTRIK  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR**

**2014**



**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR**  
**FAKULTAS TEKNIK**

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**LEMBAR PENGESAHAN**

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat – syarat Ujian guna memperoleh gelar sarjana (ST). Program Studi Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **STUDI SISTEM KOMBINASI ANTARA GAS DAN UAP UNTUK MENGHITUNG BESARNYA DAYA LISTRIK YANG DIBANGKITKAN OLEH TURBIN GAS DAN UAP PADA PT. ENERGI SENKANG**

Nama : **1. AHMAD YAMIN**

**2. SUARDI**

Stambuk : **1. 105 82 00612 10**

**2. 105 82 00608 10**

Makassar, Oktober 2014

Telah diperiksa dan disetujui

Oleh Dosen Pembimbing:

Pembimbing I

Dr. Ir. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M. Eng

Pembimbing II

Ir. ABD. HAFID, MT

Mengetahui:  
Ketua Jurusan

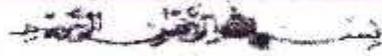
Umar Katu, ST., MT  
NBM. 990 410



# UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

## FAKULTAS TEKNIK

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221



### PENGESAHAN

Skripsi atas nama Ahmad Yani dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 0612 10 dan Suardi dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 0608 10, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 085/05/A.4-II/XII/36/2014, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Rabu Tanggal 03 Desember 2014

Makassar, 01 Rabiul Awwal 1436 H  
23 Desember 2014 M

#### Panitia Ujian :

##### 1. Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Dr. H. Irwan Akib, M.Pd.

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. -Ing. Ir. Wahyu H. Pirah, MSME

##### 2. Penguji

a. Ketua Rizal A Duyo, ST., MT.

b. Sekretaris Adriani, ST., MT.

##### 3. Anggota

1. Dr. Ir. Indra Jaya Mansur, MT.

2. Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc.

3. Umar Katu, ST., MT.

Mengetahui :

Pembimbing I

Dr. H. Zulfairi Basri Hasanuddin, M.Eng.

Pembimbing II

Ir. Abd. Hapid, MT.

Ketua Program Studi  
Teknik Elektro

Umar Katu, ST., MT.

NIM. 390410

## ABSTRAK

Suatu instalasi kombinasi (combine cycle) adalah sebuah proses tenaga uap dimana bagian depannya dihubungkan dengan instalasi turbin gas, sehingga terbentuk suatu instalasi kombinasi turbin-gas dan turbin uap, dimana gas bekas yang keluar dari turbin gas yang masih memiliki enthalpy dan temperatur yang cukup tinggi dimanfaatkan sebagai udara pembakar pada ketel uap untuk mengubah air menjadi uap sebagai penggerak turbin uap. Instalasi seperti ini merupakan system gabungan (Combine Cycle) yang mampu meningkatkan efisiensi thermos sampai sekitar 42%.

Akhir-akhir ini instalasi kombinasi ini makin banyak digunakan sebab untuk daya yang sama dan tertentu, harga instalasi dan biaya pelayanan lebih murah. Selain efisiensi thermis yang lebih baik juga merupakan suatu upaya untuk menghemat penggunaan energi minyak dan gas bumi dengan pemanfaatan kembali gas buang yang masih bertemperatur tinggi dan mengandung energi yang cukup besar.

Namun demikian dalam perencanaan sebuah instalasi Gabungan gas-uap tentunya faktor teknologi pemanfaatan dari energi gas buang menjadi hal penting mengingat energi tersebut terbatas oleh standarisasi dari unit turbin gas. Proses pemanfaatan kalor gas buang dalam ketel gas buang (waste heat boiler) atau disebut HRSG ( Heat Recorvery Steam Generator) yang optimal tentunya menjadi parameter peningkatan efisiensi dari uap yang dipengaruhi oleh beberapa faktor dapat menjadi pilihan untuk peningkatan efisiensi gabungan ini.

Makassar, 10 November 2014

## KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena Rahmat dan HidayahNya sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini, dan dapat kami selesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan akademik yang harus ditempuh dalam rangka penyelesaian program studi pada Jurusan Elektro Fakultas teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir adalah: “evaluasi sistem kombinasi antara gas dan uap untuk menghitung besarnya daya listrik yang dibangkitkan oleh turbin gas dan uap pada PT. ENERGI SENGKANG”

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan-kekurangan, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan baik itu ditinjau dari segi teknis penulisan maupun dari perhitungan-perhitungan. Oleh karena itu penulis menerima dengan ikhlas dan senang hati segala koreksi serta perbaikan guna penyempurnaan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat.

Skripsi ini dapat terwujud berkat adanya bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Hamzah Al Imran, ST, MT. sebagai Dekan fakultas teknik universitas muhammadiyah Makassar

2. Bapak Umar Katu, ST,MT., sebagai ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Bapak Dr. Ir. H. Zulfajri Basri hasanuddin, M.Eng, selaku pembimbing I dan Bapak Ir. Abd. Hafid, M.T., selaku pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya dalam membimbing kami.
4. Bapak dan ibu Dosen serta staf pegawai pada fakultas teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani penulis selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
5. Ayahanda Nonci dan ibunda Kamisah yang tercinta, penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya atas segala limpahan kasih sayang, doa dan pengorbanan baik dalam bentuk materi maupun motivasi dalam menyelesaikan studi kami.
6. Saudara-saudaraku serta rekan-rekan mahasiswa Fakultas Teknik terkhusus angkatan 2010 yang dengan keakraban dan persaudaraan banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga semua pihak tersebut di atas mendapat pahala yang berlipat ganda di sisi Allah SWT dan skripsi yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi penulis, rekan-rekan, masyarakat serta bangsa dan negara. Amin.

Makassar, November 2014

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
NOMENKLATUR.....	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Tujuan Penulisan.....	3
C. Batasan Masalah.....	3
D. Metode Penulisan.....	3
E. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TEORI DASAR.....	5
A. Dasar Turbin Gas.....	6
1. Termodinamika Turbin Gas.....	6
2. Bahan Bakar.....	8
3. Kompresor.....	9
4. Ruang Bakar.....	11
5. Turbin.....	13
6. Sistem Udara.....	14

7. Udara Pembakaran.....	15
B. Dasar Turbin Uap.....	15
1. Siklus Rankine.....	16
2. Ketel Uap.....	17
3. Turbin Uap.....	19
a. Daya Yang Dihasilkan Gas.....	19
4. Kondensor.....	21
a. Kondensor Kontak Langsung.....	22
b. Kondensor Permukaan.....	22
5. Pompa.....	23
a. Kapasitas Pompa Gas.....	24
6. Generator.....	24
a. Stator.....	26
b. Rotor.....	26
c. Exciter.....	26
C. Proses pembangkitan energi listrik.....	28
D. Proses penggabungan (combine cycle).....	30
1. Prinsip Kerja Gas.....	30
2. Peralatan Utama.....	31
3. Proses Penggabungan.....	32
E. Efisiensi termal.....	35
BAB II METODOLOGI PENELITIAN.....	36

A. Jenis Penelitian.....	36
B. Lokasi dan Waktu penelitian.....	36
C. Perangkat Penelitian.....	36
D. Flow Chart.....	37
<b>BAB IV ANALISA DAN PERHITUNGAN.....</b>	<b>38</b>
A. Perhitungan turbin gas.....	38
1. Laju aliran massa bahan bakar.....	38
2. Laju aliran massa udara.....	38
3. Perbandingan berat udara bahan bakar.....	39
4. Menentukan kerja kompresor.....	39
5. Menentukan kerja turbin.....	41
6. Kerja netto keluaran generator.....	43
7. Efisiensi termal siklus.....	43
B. Perhitungan turbin uap.....	44
1. Sifat-sifat uap panas lanjut keluar ketel gas buang.....	44
2. Sifat-sifat uap panas lanjut masuk turbin.....	44
3. Sifat-sifat uap panas jenuh keluar turbin.....	45
4. Kualitas uap masuk kondensor.....	45
5. Keluaran kerja turbin.....	46
6. Kondisi uap masuk kondensor.....	46
7. Kondisi cairan jenuh keluar kondensor.....	47
8. Kondisi Cairan jenuh keluar pompa.....	48

9. Kerja pompa.....	47
10. Kalor yang dibutuhkan / dilepaskan.....	48
11. Menghitung kerja netto keluaran generator.....	49
12. Menghitung efisiensi thermal.....	50
C. Perhitungan siklus gabungan (combine cycle).....	50
1. Kapasitas Total Instalasi Gabungan.....	50
2. Efisiensi Thermal.....	51
D. Data Sistem Gabungan PLTGU Sengkang.....	51
E. Generator.....	52
a. Jumlah Kutub Generator.....	53
BAB V PENUTUP.....	55
A. Kesimpulan.....	55
B. Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN – LAMPIRAN	

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Sistem Turbin gas yang bekerja berdasarkan Siklus Bryton.....	5
2.2 Diagram P – V Dan T – S Siklus Bryton.....	6
2.3 Siklus Turbin Gas dalam Diagram T – S.....	7
2.4 Jenis Kompresor Pada Turbin Gas.....	11
2.5 Gambar Ruang Bakar.....	13
2.6 Contoh Susunan pad Turbin Gas.....	14
2.7 Skema Turbin Uap Sederhana.....	15
2.8 Diagram Siklus Rankine.....	16
2.9 Ketel Uap.....	19
2.10 Turbin Uap.....	21
2.11 Kondensor Kontak langsung.....	22
2.12 Kondensor Permukaan.....	23
2.13 Pompa.....	24
2.14 Gambar Stator dan Rotor mesin arus serarah.....	27
2.15 Insulasi Gabungan Gas-Uap Sederhana (combine cycle).....	31
2.16 Instalasi Gabungan Gas-Uap Sederhana.....	32
2.17 Diagram T – S Siklus Gabungan.....	34

## TURBIN GAS

Simbol	Keterangan	Satuan
$P_{gt}$	Daya Turbin Gas	kW
$Q_{gt}$	Pemasukan Kalor pada turbin gas	kJ/s
$Q_{sf}$	Pemasukan Kalor pada pembakaran tambahan	kJ/s
LHV	Low Heating Value	kJ/kg
$\eta_c$	Efisiensi Thermal	%
$Q_f$	Suplai kalor pada ruang bakar	kJ/s
$m_f$	Laju aliran massa bahan bakar	kg/s
$m_g$	Laju aliran massa gas buang	kg/s
$m_a$	Laju aliran massa udara	kg/s
FAR	Perbandingan bahan bakar dan udara	kg.bb/kg.ud
$W_{Ta}$	Kerja actual turbin	kJ/kg
$C_{pg}$	$P_{nas}$ Gas Pemabakaran	kJ/kg.K
$T_3$	Temperatur masuk turbin	K
$T_4$	Temperatur keluar turbin	K
$P_T$	Daya Turbin	kW
$P_{Net}$	Daya generator	kW
$P_{Ca}$	Kerja daya kompresor	kW

$Q_{in}$	Supplay kalor pada ruang bakar turbin gas	kW
$w_t$	Kerja actual turbin	kJ/kg
$W_{Ts}$	Kerja turbin uap	kJ/kg
$\eta_t$	Efisiensi thermal turbin	%
$W_{net}$	Kerja keluaran generator	kJ/kg
$W_p$	Kerja pompa	kJ/kg
$P_{ST}$	Daya turbin uap	kW
$m_s$	Uap masuk turbin	kg/s
$Q_{in}$	Uap masuk	kJ/s
$P_{tot}$	Daya total	kW
$p$	Jumlah kutub	Pasang
$n_g$	Putaran	rpm
$f$	Frekuensi	Hz

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Dalam era Globalisasi saat ini kebutuhan akan sumber energi terus-menerus mengalami peningkatan. Meningkatnya kebutuhan akan energi tidak saja disebabkan oleh adanya peningkatan jumlah manusia tetapi juga karena kemajuan perindustrian dan perekonomian yang dituntut meningkat.

Tenaga listrik merupakan landasan bagi kehidupan modern yang cukup menjadi syarat bagi suatu masyarakat untuk mempunyai taraf kehidupan yang layak dan perkembangan industri yang maju.

Tiap dasawarsa kebutuhan suatu negara akan tenaga listrik semakin bertambah, kebutuhan tenaga listrik ini merupakan fenomena yang harus di sika-pii ditindaklanjuti oleh pemerintah Indonesia dewasa ini.

Salah satu bentuk nyata kepedulian pemerintah untuk mengantisipasi kebutuhan masyarakat akan tenaga listrik adalah dengan membangun pusat - pusat pembangkit listrik yang menggunakan sumber alam yang fiuida kerjanya, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel(PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU).

Dalam merealisasikan hal tersebut, pemerintah telah memberikan kesempatan dan peluang secara meluas terhadap tumbuhnya sektor - sektor industri diberbagai bidang dan pemanfaatan sumber daya yang ada diseluruh kawasan Indonesia. Iklim yang kondusif serta pembangunan sarana dan prasarana

(infrastruktur) pendukung dapat menjadi acuan bagi para investor untuk menanamkan dan mengembangkan modalnya di sektor industri di seluruh wilayah Indonesia.

Proyek lapangan Gas dan Tenaga terpadu di Sengkang, tepatnya di Desa Gilireng Kampung Baru Kabupaten Wajo terdapat lapangan pengeboran sumur Gas yang diresmikan pada tanggal 24 Agustus 1996, oleh pemerintah yang merupakan salah satu bentuk realisasi dari pembangunan sektor industri yang berteknologi tinggi.

Perusahaan Multinasional ini menghasilkan sumber gas alam kemudian digunakan sebagai bahan bakar untuk Pembangkit Listrik Swasta dibawah naungan PT. Energi Sengkang yang berlokasi di Desa Patila Kecamatan Pammana.

PT. Energi Sengkang merupakan Perusahaan Swasta pertama yang mengelola Pembangkit Listrik di Sulawesi - Selatan berkapasitas 135 MW, dengan terdapat Interkoneksi bersama-sama dengan Pembangkit Listrik yang sudah ada, maka menyuplai kebutuhan listrik di seluruh wilayah (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU).

Guna mendukung pengoperasian yang andal, PT. Energi Sengkang bekerjasama dengan PT. Alstom Power - ESI Surabaya dengan masa kontrak 5 tahun sejak September 1997 dalam hal Operasional dan Maintenance.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap ( PLTGU ) yang berteknologi modern, efisien dan mampu memberikan manfaat bagi pembangunan perekonomian di Indonesia, khususnya di wilayah Sulawesi - Selatan.

## **B. Tujuan Penulisan**

Adapun yang menjadi tujuan penulisan dari tugas akhir kami adalah :

- Mengetahui proses kerja dari Sistem Gabungan (Combine Cycle) antara Gas dan Uap pada PT Energi Sengkang.
- Mengetahui besarnya Daya dan Energi yang dibangkitkan oleh Turbin Gas dan Uap (PLTGU).
- Mengetahui kapasitas total dari sistem siklus gabungan (Combine Cycle) pada PLTGU-Sengkang, sesuai dengan data yang ada.

## **C. Barasan Masalah**

Dalam penulisan tugas akhir ini kami membahas masalah yang dibahas, yaitu :

- Menyangkut proses kerja dari sistem penggabungan (Combine Cycle) antara Gas dan Uap
- Menghitung besarnya daya listrik yang dibangkitkan oleh Turbin Gas dan Uap pada PLTGU Sengkang.

## **D. Metode Penulisan**

Metode yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

- Field Research yaitu penulis melakukan penelitian secara langsung terhadap obyek penelitian di PT. Energi Sengkang (PLTGU) guna memperoleh data-lata yang langsung yang akan digunakan pada penulisan tugas akhir ini.

- Library Research yaitu penulis mengumpulkan data - data dengan membaca dan mempelajari berbagai literatur - literatur yang ada dan sesuai dengan masalah yang di teliti.
- Interview yaitu penulis melakukan tanya jawab secara langsung kepada pihak-pihak yang terkait yang memahami permasalahan yang diteliti.

### **E. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan yang ada dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Bab I PENDAHULUAN, dalam bab ini akan menjelaskan secara umum tentang latar belakang penulisan, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

Bab II TINJAUAN PUSTAKA, dalam bab ini akan Membahas secara umum tentang peralatan - peralatan yang ada di Pembangkitan Listrik Tenaga Gas-Uap dan mengetahui proses sistem gabungan (Combine Cycle) antara gas dan uap serta.

Bab III metodologi penelitian, dalam bab ini membahas tentang waktu dan tempat serta tahapan penelitian yang dilakukan.

Pada Bab IV analisa dan perhitungan, merupakan Inti dari penulisan tugas akhir ini, yaitu menganalisa besarnya daya listrik yang dibangkitkan sesuai data yang ada pada PLTGU sengkang serta menganalisa daya masing-masing turbin pada PLTGU sengkang.

Bab V penutup, bab ini adalah penutup dari tugas akhir ini yang terdiri atas nupulan dan saran

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Dasar Turbin Gas

Turbin Gas adalah turbin dengan gas fluida kerjanya. Sebenarnya turbin gas hanyalah merupakan komponen dari suatu sistem turbin gas. sistem turbin gas yang paling sederhana adalah terdiri dari 3 komponen utama yaitu kompresor, ruang bakar turbin dengan susunan sebagai berikut:



Gambar 2.1 Sistem turbin gas yang bekerja berdasarkan siklus Bryton

Udara yang masuk kedalam kompresor dimana yang berfungsi mengisap dan menaikkan tekanan udara sehingga temperturnya akan naik, kemudian udara bertekanan dan bertemperatur tinggi itu masuk kedalam ruang bakar. Didalam ruang bakar disemprotkan bahan bakar kedalam arus udara tersebut, sehingga terjadi proses pembakaran. Proses pembakaran berlangsung pada tekanan (constant sehingga boleh dikatakan ruang bakar adalah berfungsi untuk menaikkan temperatur udara.

Gas hasil pembakaran dengan enthalpy yang tinggi' inilah yang menjadi fluida kerjanya yang kemudian berfungsi untuk memutar sudu-sudu pada turbin.

Temperature udara yang diisap oleh kompresor mempunyai pengaruh yang terhadap daya guna yang menghasilkan turbin gas, sebab kapasitas atau udara yang mengalir masuk berubah.

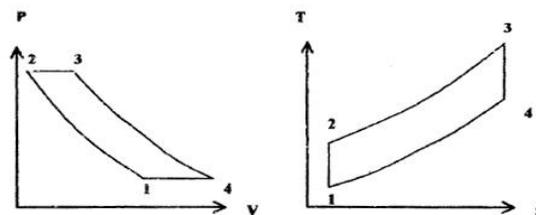
## 1. Termodinamika Turbin Gas

### a. Siklus Bryton Ideal

Turbin Gas bekerja berdasarkan siklus Bryton, dimana terdapat hubungan antara  $P - V$  dan  $T - S$ . Skema instalasi dari turbin gas tersebut dapat dilukiskan dengan Siklus Bryton Ideal.

Udara Luar diisap oleh kompresor dan dimampatkan hingga tekanan dan temperaturnya naik. Dalam ruang bakar terjadi proses pencampuran bahan bakar dengan udara yang bertemperatur dan bertekanan tinggi yang berasal dari kompresor dan terjadi proses pembakaran. Gas hasil pembakaran diekspansikan untuk memutar turbin kemudian dikeluarkan ke udara atau dimanfaatkan kembali untuk memanaskan ketel pada siklus kombinasi.

Dibawah ini akan dijelaskan tentang proses kerja dari Pembangkit Listrik Tenaga Gas dalam diagram  $P - V$  dan  $T - S$  dalam Siklus Bryton.



Gambar 2.2 Diagram  $P-V$  dan  $T-S$  pada siklus Bryton udara standar.

Proses yang terjadi pada siklus tersebut adalah :

- 1-2 : Proses kompresi isentropik didalam kompresor.
- 2-3 : Proses pemasukan kalor pada tekanan konstan didalam ruang bakar.
- 3-4 : Proses ekspansi adiabatik pada turbin.
- 4-1 : Proses pelepasan kalor pada tekanan konstan.

b. Siklus Bryton Aktual

Seperti kita ketahui bahwa siklus dari turbin gas sebenarnya menyimpang dari siklus ideal. Hal ini disebabkan karena adanya kerugian pada komponen kompresor dan dari turbin sehingga proses kompresi dan ekspansi tidak terjadi secara isentropik. Siklus sebenarnya dari turbin gas diperlihatkan sebagai berikut:



Gambar 2.3 Diagram T - S untuk siklus sebenarnya

Gambar diagram T-S dari siklus Bryton diperlihatkan proses-proses yang terdiri atas:

- 1-2 Proses kompresor isentropik (udara yang diisap oleh kompresor).

2-3 Penambahan energi pada tekanan konstant dimana udara dan bahan bakar bertemu sehingga terjadi proses pembakaran.

3-4 Pengembangan isotropik udara dari udara gas panas sehingga menimbulkan tenaga putaran mekanis pada turbin. Proses pembuangan gas panas hasil proses pembakaran pada tekanan konstan.

## 2. Bahan Bakar

Dalam menentukan bahan bakar yang akan digunakan haruslah dipertimbangkan beberapa faktor untuk mencapai efisiensi yang tinggi. Factor-faktor yang menentukan adalah :

- Nilai kalomya (Heat Value). Kebersihan.
- Tingkat korosivitasnya.
- Kandungan deposit.
- Ketersediaan akan bahan bakar.

Gas alam adalah bahan bakar fosil gas yang bertekanan reservoir yang dapat berkisar 350 hingga 700 bar yang terdiri dari  $\text{CO}_2$  dan  $\text{B}^{\circ}\text{O}$ . Gas dan minyak adalah anggota utama dari keluarga hidrokarbon, keduanya diyakini sebagai hasil dari pembusukan tanaman dan bagian tubuh dari binatang yang tertimbun selama jutaan tahun didalam perut bumi, kemudian diikuti oleh peningkatan temperatur dan tekanan sehingga material tadi berkumpul sebagai lapisan-lapisan timbunan hasil akumulasi.

Gas dan minyak biasanya ditemukan bersama-sama. Gas alam merupakan hidrokarbon teringan, terdapat dibagian atas dari suatu timbunan minyak, kadangkala keduanya bercampur dalam suatu larutan. Gas yang

dihasilkan bersama dengan minyak, baik dalam bentuk gas bebas ataupun dalam bentuk larutan, disebut Associated Gas.

Gas alam seperti udara, merupakan campuran dari beragam gas. Umumnya metana ( $\text{CH}_4$ ), komponen lainnya termasuk etana ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), Propane ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), butana ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) petana ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), karbondioksida dan - -  
n kadangkala campuran tersebut mengandung sejumlah kecil senyawa tak murni seperti merkuri dari hidrogen ( $\text{H}_2\text{S}$ ), beberapa diantara kandungan tersebut sangat korosif dan harus dibuang sebelum gas dicairkan.

Pembakaran gas alam mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan pembakaran minyak dan batu bara karena paling mudah terbakar dan bercampur dengan udara dengan baik, serta dapat diangkut dengan mudah dan murah melalui saluran pipa dan gas.

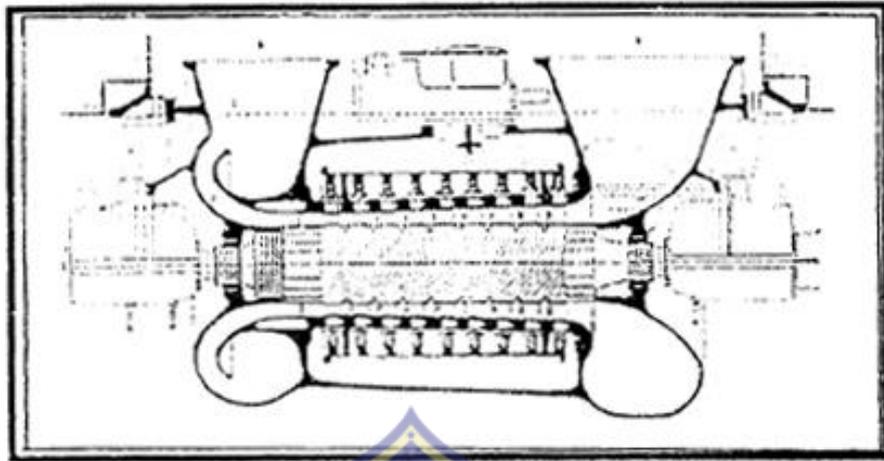
Gas alam tidak seperti minyak yang harus ditampung dalam sebuah tangki waktu diambil dari dalam perut bumi, setelah keluar reservoirnya, gas akan cepat menghembur ke udara, karena lebih ringan dari udara jika masih dalam bentuk gas, kecuali di tampung dalam jalur pipa atau dicairkan untuk disimpan.

### 3. Kompresor

Kompresor yang banyak digunakan dalam turbin gas adalah jenis aksial karena kompresor aksial ini mempunyai efisiensi yang lebih tinggi. Kenaikan berlangsung dalam setiap tingkat, diperoleh setiap tingkat perbandingan tekanan sekitar 1.2 sehingga digunakan banyak tingkat, untuk kenaikan tekanan yang lebih tinggi. Setiap tingkat-tingkat sudu menerima

udara dan tingkat sebelumnya dan mempercepat atau memperlambat aliran udara tersebut sesuai fungsinya.

Setiap tingkat sudu memberikan aliran udara dengan kecepatan yang sama pada saat masuknya akan tetapi tekanannya berubah. Pada tingkat pertama kenaikan tekanannya hanya sedikit, tetapi setelah sampai pada tingkat-tingkat terakhir tekanannya naik dengan cepat, Volume udara juga berubah. Tekanan udara yang naik membuat udara bertambah padat, maka untuk menjaga dan mempertahankan agar tekanan dan kecepatan udara tersebut tidak berubah, rumah kompresor diameternya dibuat makin lama makin menyempit pada bagian keluarannya, namun tidak menutup kemungkinan terjadinya kehilangan-kehilangan tekanan dalam kompresor akibat gesekan yang akan mengurangi kemampuan kompresor. Gesekan akan naik akibat permukaan sudu-sudu yang tidak licin. Sebagai akibat korosi pada sudu-sudu akan meningkatkan kehilangan tekanan selama proses kompresi. Kompresor aksial dapat direncanakan menurut jenis imp/us atau jenis reaksi. Kompresor aksial jenis imp/us dimana difusi hanya terjadi dalam stator, kompresor aksial jenis reaksi difusi terjadi baik dalam stator maupun dalam rotornya.



Gambar 2.4 3enis kompresor pada turbin gas

#### 4. Ruang Bakar (Combustion Chambers)

Tujuan utama dari ruang bakar adalah untuk memberikan atau menjamin terjadinya reaksi kimia antara bahan bakar dan udara yang berasal dari kompresor yang kemudian berekspansi dalam turbin untuk menghasilkan kerja pada poros.

Konstruksi dari ruang bakar sedikit banyak dijelaskan fungsinya. Ruang bakar terdiri dari dua buah pipa konsentrik yang mempunyai tutup pada bagian depannya. Kedua pipa tersebut inner linier dan out tinier. Pada bagian belakang ruang bakar dibentuk sedemikian rupa sehingga dapat mengarahkan gas panas hasil pembakaran ke arah bagian turbin.

Aliran udara dalam ruang bakar dengan mesin torak yang disebut (reciprocating engine). Pada sistem turbin gas, udara yang masuk ke dalam ruang bakar tidak seluruhnya terbakar dalam proses pembakaran, hanya sekitar - 30 % udara yang digunakan untuk pembakaran pada beban penuh (full load),

sedang sisanya akibat panas dari api pembakaran akan mengembang melalui sudu-sudu turbin.

Udara yang digunakan untuk pembakaran itulah yang disebut udara liner yang jumlahnya diatur oleh banyaknya dan besarnya lubang-lubang dari ruang bakar tempat dimana udara tersebut dapat masuk ke daerah pembakaran.

Sebagian besar udara pembakaran terletak disekitar tabung injektor sebelum digunakan untuk proses pembakaran, sebagian dari udara primer rarahkan melalui lubang-lubang disekeliling ruang bakar untuk membentuk gulungan udara yang berfungsi untuk melindungi dinding ruang bakar dari sentuhan api.

Lebih jauh disebelah ruang bakar, dimasukkan aliran udara yang biasa disebut udara sekunder. Aliran udara ini akan bercampur secara sempurna dengan gas panas hasil pembakaran, dengan demikian mencegah adanya aliran sangat panas untuk tidak memasuki daerah turbin.

Udara sekunder biasa juga disebut dengan cooling air (udara dingin), ini disebabkan tanpa adanya aliran udara tersebut maka ruang bakar akan menjadi suatu bola api yang besar.

Disebabkan adanya batas kemampuan logam untuk menahan panas, adalah tidak mungkin untuk mengoperasikan turbin pada temperatur yang gat tinggi, jadi disamping berekspansi memutai sudu-sudu turbin, udara under juga berfungsi untuk mendinginkan gas panas hasil pembakaran sampai pada temperatur yang diijinkan untuk mengoperasikan mesin tersebut ( iambar dari mesin ruang bakar tersebut dapat dilihat dibawah ini:



Gambar 2.5 Gambar Ruang Bakar (Combustion Chambers)

## 5. Turbin

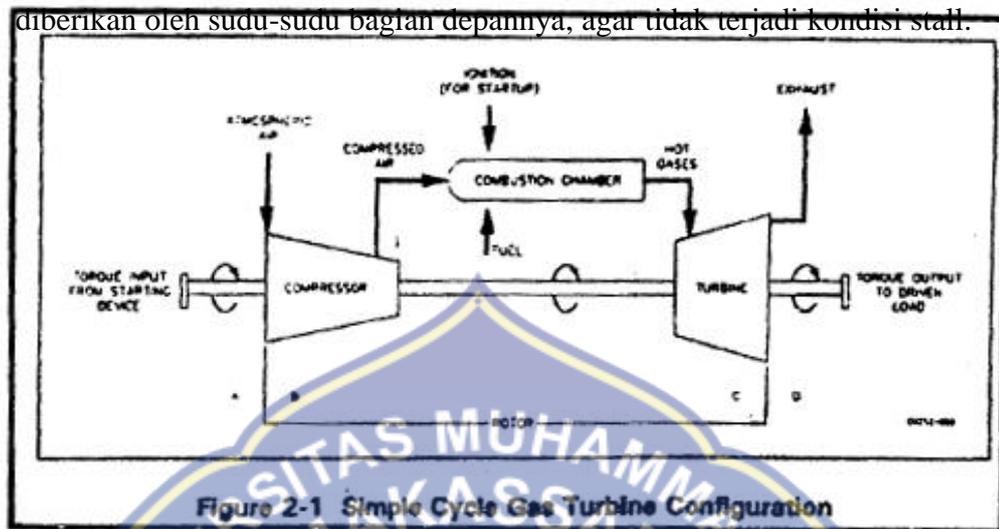
Turbin adalah berfungsi merubah gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar menjadi tenaga putaran mekanis. Turbin terdiri dari beberapa deretan sudu-sudu yang berputar (rotor) dan sudu-sudu yang tidak berputar (stator).

Ada dua cara untuk memanfaatkan kecepatan aliran udara agar memutar turbin, yaitu impuls dengan cara mendorong atau dengan reaksi karena gaya reaksi aliran udara panas meninggalkan sudu-sudu rotor. Pada cara impuls kecepatan udara membentur sudu-sudu rotor dan rotor bergerak dan mulai berputar, sedang udara kemudian berekspansi pada sudu-sudu rotor dan pada waktu meninggalkan sudu rotor menyebabkan terjadinya gaya reaksi yang menghasilkan tenaga yang menambah putaran rotor.

Secara mekanis turbin dibuat untuk beroperasi pada putaran tinggi, selama proses ekspansi menuju putaran tinggi harus ada cara agar sudu-sudu

bagian belakang mampu atau dapat mengimbangi dalam menerima aliran yang

diberikan oleh sudu-sudu bagian depannya, agar tidak terjadi kondisi stall.



Gambar 2.6 Contoh susunan pada turbin gas

## 6. Sistem Udara

Udara adalah campuran dari beberapa molekul seperti oksigen, nitrogen dan karbondioksida yang merupakan 3 bagian terbesar dari molekul - molekul gas yang membentuk udara.

Molekul mempunyai massa dan energi, massa yang menyebabkan adanya berat molekul, sedang energi menyebabkan molekul - molekul dapat bergerak. Gerakan molekul - molekul ini dapat diukur sebagai jumlah energi yang di lepas, sedang kecepatan molekul - molekul diukur sebagai temperatur.

Energi yang diberikan molekul - molekul pada saat membentur permukaan dinding sebuah ruangan dapat diukur sebagai tekanan. bila molekul yang ada di dalam ruangan kecepatannya lebih besar maka tekanan akan menjadi besar pula bila volume ruangan diperkecil, artinya udara di kompresi.

Rancangan mesin turbin gas memakai prinsip menambah energi pada udara dengan memperkecil volume. Jadi energi dapat ditambahkan kedalam udara dengan cara :

1. Menambahkan tekanan udara melalui cara kompresi (pemampatan).
2. Menambah volume sambil memanaskan udara agar tekanan dapat dipertahankan tetap konstant.

### 7. Udara Pembakaran

Sistem udara ini dimulai sejak terjadinya putaran mesin yang mengisap udara dari udara luar, Udara dikompresikan kemudian diarahkan kedalam ruang bakar (Combustion Chamber). Dimana fuel diinjeksikan atau disemprotkan kedalam ruang bakar bercampur dengan udara, pembakaran membentuk campuran yang mudah terbakar. Campuran yang mudah terbakar ini kemudian di bakar.

### B. Dasar Turbin Uap

Skema dari turbin uap dapat dilihat pada gambar dibawah ini:

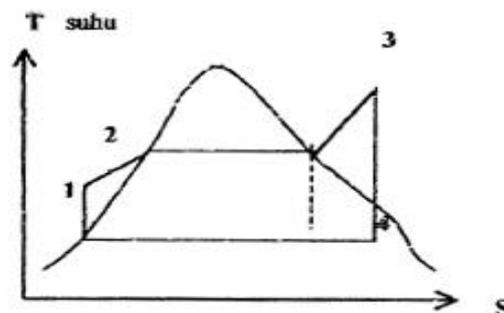


Gambar 2.7 Skema turbin uap sederhana

Sistem uap terdiri dari beberapa komponen utama yaitu : Ketel (Heat Recovery Steam Generator), turbin yang menggerakkan beban, kondensor dan pompa air ketel. Jadi turbin hanyalah merupakan salah satu komponen dari suatu sistem tenaga. Uap yang berfungsi merubah air menjadi uap. Kondisi yang dihasilkan pada umumnya berkisar 325 kg/s dan  $650^{\circ}\text{C}$  untuk unit modern yang *tmgp*. Uap yang dihasilkan oleh ketel masuk kedalam turbin dimana energi uap yang diubah menjadi kerja mekanis di dalam turbin tekanan dan temperatur uap setelah itu uap meninggalkan turbin dan masuk kedalam kondensor. Kondensor adalah sebuah alat yang berfungsi mengembunkan uap dengan jalan mendinginkannya. Air pengembunan yang terjadi didalam kondensor dinamai air **kondensat**. Maka dengan pertolongan pompa, air kondensat ini dialirkan kembali kedalam ketel uap.

### 1. Siklus Rankine

Proses kerja dari turbin uap ini dapat dijelaskan dalam Siklus Rankine atau Siklus Tenaga uap yang mana merupakan siklus teoritis paling sederhana yang mempergunakan uap sebagai medium kerja sebagaimana dipergunakan pada sebuah pusat listrik Tenaga uap.



Gambar 2.8 Diagram siklus Rankine

Pada gambar diatas dijelaskan pada daerah titik 1-2 adalah proses pemanasan air uap. pada titik 2-3 proses uap masuk ke turbin pada proses 3-4 proses dimana uap terbuang masuk ke kondensor.

## 2. Ketel Uap (Waste Heat Boiler)

Ketel gas buang (Waste Heat Boiler) atau ketel pemulih kalor (Heat - TV Steam Generator, HRSG) biasanya terdiri dari komponen-komponen berupa bagian ekonomiser, evaporator dan superheter. Ketel uap ini sangat j»ng dilengkapi dengan reheater mengingat keterbatasan energi yang isupplai dari gas buang turbin gas ini, disamping itu tidak dibutulkannya pembakaran yang bertemperatur tinggi.

Namun menurut jenis sumber kalornya maka ketel gas buang ini terdiri dari:

- a. Ketel gas buang tanpa pembakaran tambahan, yaitu apabila hanya gas buang terdiri dari turbin gas yang berfungsi sebagai sumber kalor untuk proses uap.
- b. Ketel gas buang dengan pembakaran tambahan terbatas (limited supplementary firing), yaitu apabila sumber kalor berasal dari gas buang turbin gas ditambah dengan gas pembakaran terbatas sebelum masuk ketel.
- c. Ketel gas buang dengan pembakaran tambahan maksimum (maximum supplementary firing), dimana gas buang dari turbin gas yang bertemperatur tinggi digunakan sebagai udara pembakar dari bahan bakar sebagai sumber energi.

Menurut klasifikasinya maka jenis ketel ini merupakan ketel pipa air, dimana pada ketel ini air terdapat dalam pipa-pipa sedang gas pemanas beredar mengitari pipa-pipa itu. Jadi bidang ketel ini terdapat pada bidang luar pipa atau dalam hal ini air dalam bejana mendapatkan perlakuan panas. Ketel-ketel pipa air selalu digunakan pada instalasi-instalasi stasioner dengan kapasitas yang besar, sebagai pembangkit tenaga maupun sebagai alat pemanas.

a. Keuntungan ketel pipa air

Dengan membandingkan ketel-ketel pipa air dengan ketel-ketel pipa api, didapat keuntungan sebagai berikut:

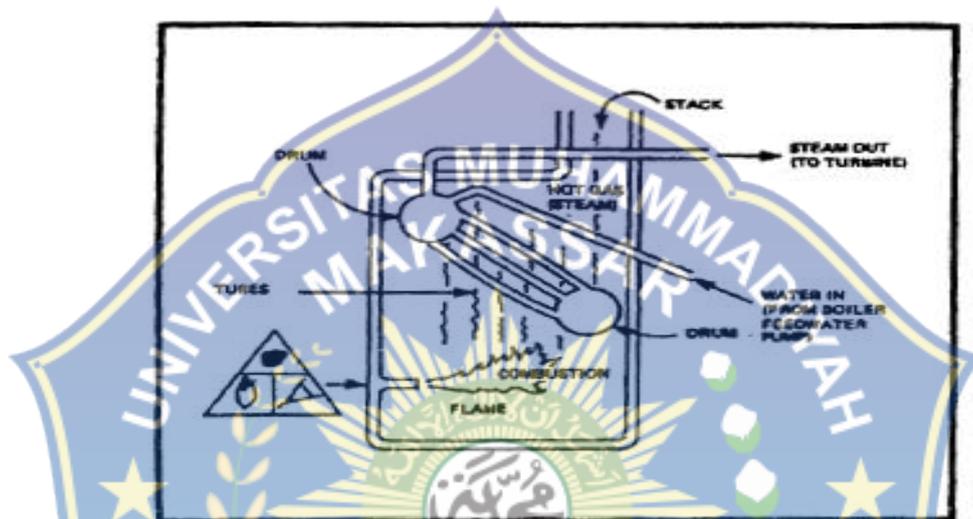
1. Lebih ringan.
2. Dapat bekerja pada tekanan dan temperatur tinggi.
3. Produksi dapat dilaksanakan lebih besar.
4. Hemat dalam ruangan,
5. Lebih aman terhadap bahaya peledakan.

b. Kekurangan ketel pipa air.

1. Air pengisi ketel harus sangat bersih.
2. Menggunakan lebih banyak alat pengaman otomatis.
3. Merawat dan memperbaiki ketel lebih sukar.

Ketel gas buang ini biasanya merupakan ketel sirkulasi alamiah (natural circulation) dan perpindahan kalor dalam pipa-pipanya berlangsung secara konveksi alamiah. Sementara jenis alirannya

merupakan aliran yang berlawanan (Counter Flow). Gambar dari ketel uap dapat dilihat di bawah ini:



Gambar 2.9 Ketel Uap

### 3. Turbin Uap

#### a. Daya yang dihasilkan

Turbin uap mempunyai daya yang telah tertentu. Daya yang dihasilkan turbin diperoleh dari selisih enthalpy (panas jatuh) dan berkapasitas uap (massa aliran uap persatuan waktu) yang masuk kedalam turbin dan pada saat transformasi energi didalam turbin terjadi kerugian, hingga daya yang dihasilkan turbin dihitung dari :

$$P_{st} = m_s(W_T - W_P) \text{ kW}$$

Dimana :

$m_s$  = Kapasitas Uap (massa uap masuk dalam turbin persatuan waktu) kg/s.

$W_T$  = Kerja turbin uap (kJ/kg)

$W_P = \text{Kerja pompa (kJ/kg)}$

1. Menurut prinsip kerjanya

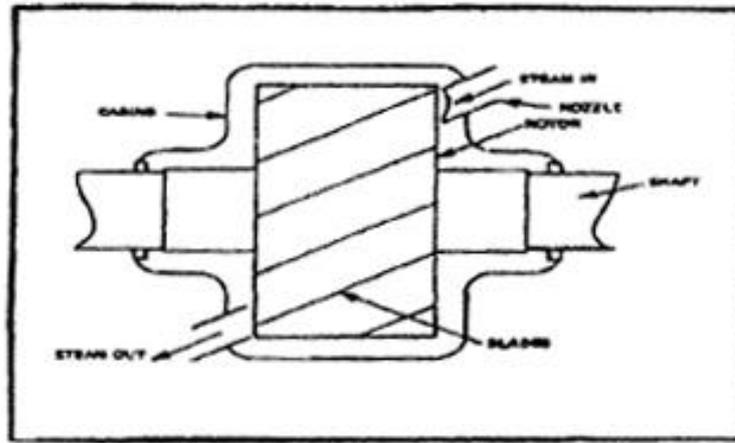
- a) Turbin Impuls adalah turbin dimana proses ekspansi (penurunan tekanan) dari fluida kerja hanya terjadi di dalam busur sudu tetap saja.
- b) Turbin reaksi adalah turbin dimana proses ekspansi dari fluida kerja terjadi baik didalam busur sudu tetap maupun sudu gerak.

2. Berdasarkan proses penurunan tekanan uap

- a) Turbin kondensasi, bila tekanan keluar turbin biasanya kurang dari satu atmosfer dan dimasukkan ke dalam kondensor.
- b) Turbin tekanan lawan, bila tekanan sisi keluar turbin uap lebih besar.
- c) Turbin ekstraksi, dalam turbin jenis ini sebagian uap dalam turbin diekstraksi (dipilih) untuk proses - proses pemanasan lain, proses industri dan lain - lain.

3. Berdasarkan Jumlah tingkat Penurunan Tekanan.

- a) Turbin tunggal (single stage) dengan satu tingkat kecepatan atau lebih. Cocok untuk daya kecil, misalnya sebagai penggerak kompresor, blower dan lain - lain.
- b) Turbin bertingkat (multi stage), disini sudu - sudu turbin bertingkat sesuai kebutuhan biasanya cocok untuk daya yang besar. Gambar dari turbin uap dapat dilihat di bawah ini:



Gambar 2.10 turbin uap

#### 4. Kondensor

Kondensor adalah merupakan suatu alat penukar panas (heat exchanger) dengan proses perpindahan panas terjadi dari suatu fluida kerja yang bertemperatur tinggi pada fluida kerja yang mempunyai temperatur lebih rendah dimana terjadi perubahan fasa dari fluida kerja yang bertemperatur tinggi tersebut pada kondisi tekanan dan temperatur hampir konstant (dari fasa uap ke fasa cair).

Pemakaian kondensor pada sistem pembangkit tenaga uap adalah untuk menurunkan tekanan keluar turbin sampai tekanan tertentu yang akan memberikan keluaran kerja turbin akan bertambah besar selama proses ekspansi serta efisiensi sistem pembangkit tenaga yang lebih baik. Kondensat yang dihasilkan perlu dipompakan lagi dari tekanan yang rendah ketekanan masuk ketel, kerja yang diperlukan untuk menekan suatu cairan adalah sangat kecil dibandingkan dengan kerja yang digunakan untuk ekspansi suatu gas (kukus), sehingga akan memberikan suatu keuntungan netto yang sangat berarti.

Kita dapat membedakan kondensor ini atas dua jenis berdasarkan cara perpindahan panas yang terjadi:

a. Kondensor kontak langsung ( Direct Contac Condenser)

Pada kondensor kontak langsung, air berkontak secara langsung dengan uap untuk menyerap panas dari uap yang keluar dari turbin uap sehingga terkondensasi.

Kondensat dan air pendingin akan bercampur menjadi satu pada sisi keluar dari kondensor.

Air kondesat ini dapat digunakan kembali sebagai air pengisi ketel harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu sampai memenuhi syarat – syarat yang diperlukan bagi air pengisi ketel.

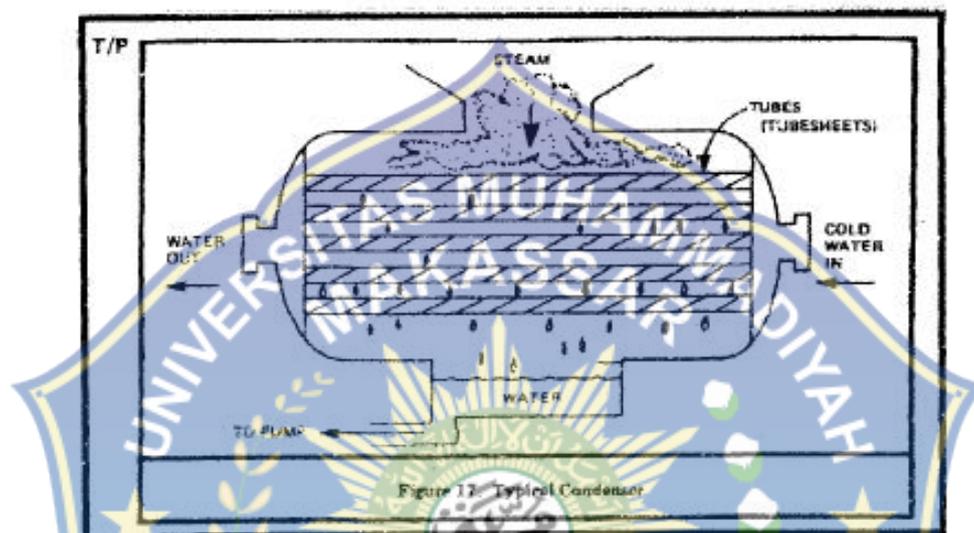


Gambar 2.11 Kondensor kontak langsung

b. Kondensor permukaan (surface condenser)

Pada jenis kondensor ini air pendingin tidak langsung berkontak dengan uap. Air ini masuk ke dalam kondensor melalui pipa – pipa pendingin sedangkan uap yang akan dikondensasikan menyelubungi bagian luar dari pipa - pipa yang berisi air. Panas dari uap ini akan diserap

oleh air pendingin melalui pipa - pipa pendingin yang selanjutnya akan diserap oleh air pendingin sehingga kondensat yang dihasilkan tidak perlu dilakukan pengolahan lagi untuk dipakai sebagai air umpan ketel.



Gambar 2.12 Kondenser Permukaan

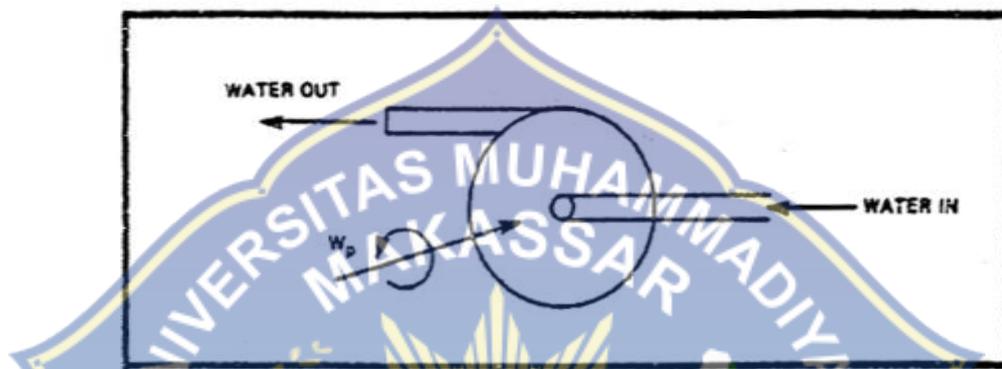
## 5. Pompa

Pompa yang bahannya sebagian Brans, mempunyai rumah yang terbuat dari besi cor, impeller, rumah cincin (easing ring). Pada pompa yang sebagian terbuat dari baja tahan karat, rumah pompa dibuat dari bahan yang sesuai untuk keperluan, sementara impeller, cincin impeller, terbuat dari baja yang tahan korosi yang sesuai dengan cairan yang akan di pompakan. Pada pompa serba baja tahan karat, bagian - bagian yang berhubungan langsung dengan cairan terbuat dari baja tahan korosi yang sesuai.

### a. Kapasitas Pompa

Bila air dari kondensator tadi dingin dan ingin dikembalikan kedalam ketel pabrik atau ke tangki-tangki air maka pompa yang digiinkan adalah pompa sentrifugal yang mana banyak dipakai pada industri-industri besar.

Bentuk dari pompa dapat dilihat dibawah ini:



Gambar 2.13 pompa

## 6. Generator

Tiap-tiap mesin berputar yang bertujuan mengubah daya mekanik menjadi daya listrik dinamakan " Generator".

Generator arus searah berfungsi merubah energi mekanis dari penggerak mulanya menjadi energi listrik yang diberikan ke beban, sedangkan motor arus searah berfungsi mengubah energi listrik yang diterima menjadi energi mekanis berupa kecepatan putar poros yang nantinya dipergunakan untuk memutar peralatan-peralatan produksi di pabrik maupun di industri.

Di dalam generator, umumnya tegangan dibangkitkan pada belitan atau sejumlah belitan yang ditempatkan pada bagian yang diam yang disebut stator,

sedangkan medan magnetnya ditempatkan pada bagian yang berputar yang disebut rotor.

Frekuensi daya listriknya selalu seirama (sinkron) dengan kecepatan penggerak mesinnya, oleh karena itu mesin ini di sebut mesin sinkron.

Frekuensi dapat dihitung dengan mengasumsi pada persamaan dibawah ini:

$$f = \frac{P \cdot n}{120} \text{ Hz}$$

Dimana:

f = Frekuensi (Hz)

n = Jumlah putaran (rpm)

P = Jumlah kutub

Pada umumnya generator sinkron adalah generator sinkron 3 fasa yang memiliki banyak keuntungan karena hubungan sistem 3 fasa mempunyai kelebihan dalam pembangkitan, penyaluran dan mempunyai daya keluar yang besar. Untuk membuat sistem 3 fasa diperlukan 3 set lilitan stator yang masing-masing diletakkan dengan perbedaan fasa  $120^\circ$  listrik.

Kerja atau daya yang dihasilkan dari keluaran generator dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

Untuk generator yang digerakkan oleh turbin Gas :

$$P_{\text{net}} = P_{\text{ta}} - P_{\text{ca}} K_w$$

Untuk generator yang digerakkan oleh turbin Uap :

$$P_{\text{ST}} = m_s \cdot W_{\text{net}} K_w$$

a. Stator

Stator adalah bagian generator yang diam, terbuat dari plat-plat besi yang berlapis-lapis dan diklem sehingga berbentuk inti stator. Pada inti stator dibuat alur-alur dan dalam alur - alur ini diletakkan kumparan. Pada kumparan stator inilah dibangkitkan gaya gerak listrik yang diperlukan.

Biasanya pada mesin putaran rendah pendingin cukup diperoleh dengan udara sekeliling, tetapi pada mesin berputaran tinggi karena suhu yang berbentuk cukup tinggi, maka celah antara rotor dan stator tidak dapat menyalurkan panas yang timbul secara alamiah, sehingga perlu didinginkan dengan gas hydrogen yang bertekanan.

b. Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar dan generator, biasanya dibagi dalam dua kelas tergantung dari kecepatan yaitu :

- Rotor silinder yang dipakai pada generator kecepatan tinggi.
- Rotor kutub menonjol digunakan pada generator berkecepatan rendah

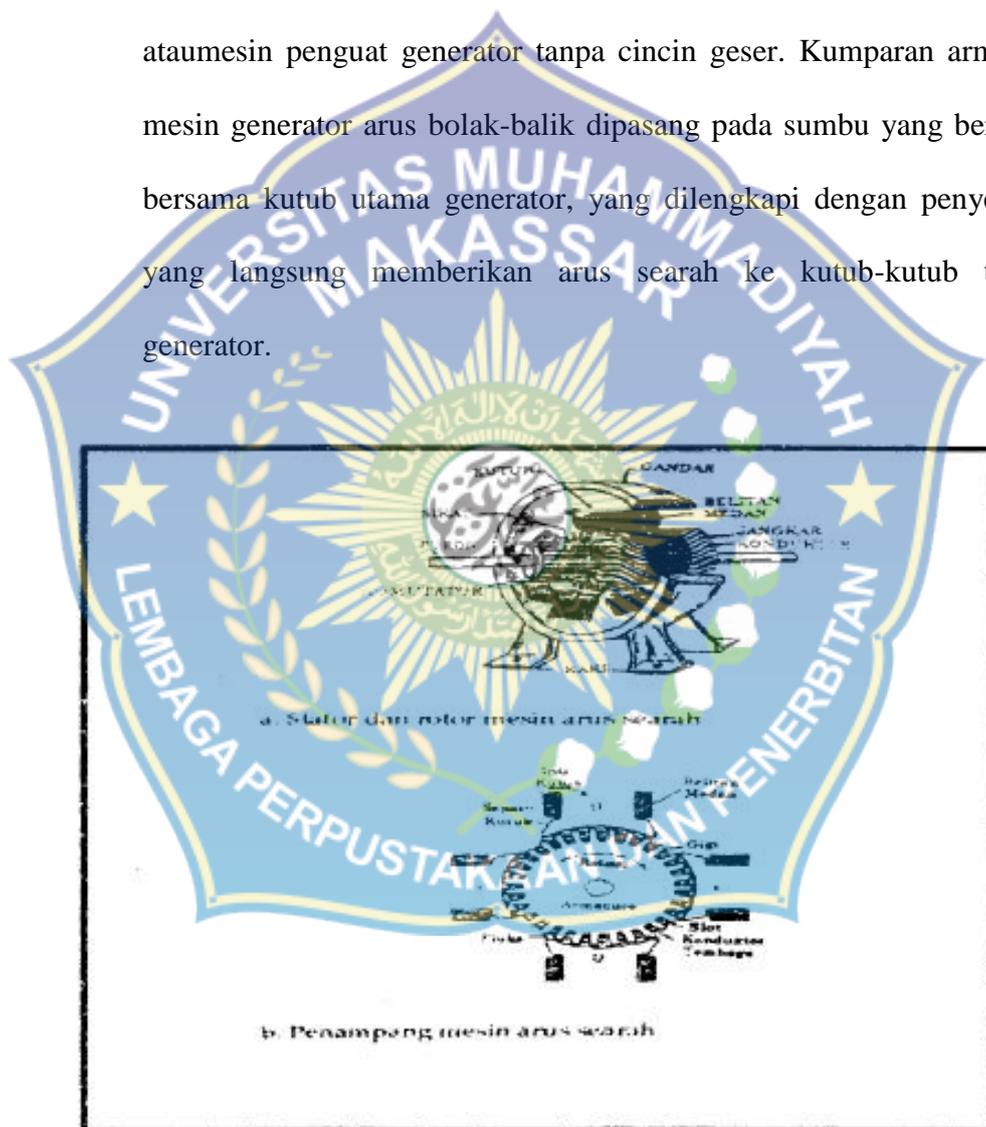
c. Exciter

Penguat exciter dimaksudkan untuk mendapatkan medan magnet pada rotor. Besar kecilnya medan magnet pada rotor akan berbanding lurus dengan besar kecilnya tegangan yang diinduksikan pada stator. Oleh karena itu fungsi penguat sangat penting pada pengaturan tegangan. Sistem penguat yang umum di pakai saat ini adalah :

- Penguat dengan DC generator : tegangan searah yang dihasilkan generator DC dikirimkan ke kumparan medan penguat generator melalui sikat-sikat dan slip ring. Karena adanya slip ring dan sikat-

sikat ini maka diperlukan perawatan yang rumit sehingga penguat dengan cara ini jarang digunakan.

- Penguatan sendiri : yaitu sistem penguat dengan menggunakan kontak geser sehingga perawatannya lebih mudah.
- Penguatan dengan menggunakan Brushless exciter generator atau mesin penguat generator tanpa cincin geser. Kumparan armature mesin generator arus bolak-balik dipasang pada sumbu yang berputar bersama kutub utama generator, yang dilengkapi dengan penyearah, yang langsung memberikan arus searah ke kutub-kutub utama generator.



Gambar 2.14 gambar stator dan rotor mesin arus searah dan penampung mesin arus searah

Suatu kelistrikan yang besar selalu terdiri atas beberapa generator yang bekerja secara paralel. Hubungan paralel generator dengan jaringan

atau sistem dapat dilaksanakan pada sistem tegangan tingginya atau pada terminal generator itu sendiri dan yang paling mudah adalah pemasangan paralel melalui terminal generator.

Menyatukan beberapa generator mempunyai beberapa keuntungan antara lain:

- Tersedianya daya yang cukup besar guna memenuhi kebutuhan listrik.
- Pengoperasian dapat digabungkan sehingga hanya sedikit memerlukan tenaga operator.
- Sangat ekonomis dalam penyaluran daya karena untuk beban rendah dapat dioperasikan beberapa generator saja.

Bahan bakar, minyak pelumas, suku cadang dan peralatan-peralatan maintenance dapat disentralisasikan.

### **C. Proses Pembangkitan Energi Listrik PLTGU - Sengkang**

Udara yang masuk dikompresor di kompresi kemudian dialirkan ke ruang Berdasarkan data sistem pembangkit PLTGU Sengkang yang berkapasitas total 135 MW, PLTGU ini merupakan gabungan antara Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU), PLTGU ini terdiri dari 2 unit turbin gas yang masing-masing berkapasitas 45550 Kw atau 45 MW dan 1 unit turbin uap yang berkapasitas 45200 Kw atau 45 MW. Jika dipergunakan sistem Combine cycle (gabungan) antara PLTG dan PLTU maka efisiensi yang dihasilkan adalah sebesar 135 MW.

Suatu sistem kelistrikan yang besar ini terdiri atas beberapa generator yang bekerja atau berhubungan secara paralel atau saling ber-interkoneksi dengan pembangkit - pembangkit yang lain yang ada di Sulawesi- Selatan.

Sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Cias ini terdiri dari sebuah kompresor, ruang pembakaran, turbin gas dan generator listrik.

pembakaran bersamaan dengan bahan bakar yang disulut. Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar gas alam. Gas alam ini diperoleh dari proyek Perusahaan Gas Aiam terpadu yang ada di Desa Gilireng Kampung Baru wajo yang disalurkan melalui pipa besar ke Pembangkit listrik Energi Sengkang.

Gas terkembang dan memiliki suhu dan tekanan yang tinggi ini dimasukkan ke dalam turbin gas hingga turbin berputar yang pada gilirannya menggerakkan generator.

Turbin gas bekerjanya atas dasar prinsip siklus tenaga gas, Bryton atau Joule yang merupakan suatu proses standar siklus udara pada Turbin Gas.

Kedua jenis gas turbin ini merupakan gas turbin yang ramah lingkungan tanpa menimbulkan polusi udara, gas buang (exhaust) dari unit pembangkit ini masing-masing dihubungkan pada ketel uap (HRSG) untuk dimanfaatkan pada proses penguapan, rnengingat gas buang ini rnasih memiliki enthalpy yang tinggi yang temperaturnya masih berkisar  $531\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kedua unit turbin gas (gas buangnya) dihubungkan dengan masing-masing ketel yang terdiri dari ekonomiser, evaporator dan superheter. Uap kering yang keluar dari masing-masing ketel disatukan sehingga laju aliran

massa uap yang kemudian diekspansikan ke dalam turbin uap menjadi 2 kali lipat. Pembangkit tenaga uap ini berkapasitas sebesar 45200 kW (45 MW).

Sumber air untuk turbin uap ini diambil dari sungai Cenrana'e dengan proses penjernihan dan pengolahan yang berteknologi tinggi sehingga sama sekali tidak menghasilkan limbah sebelum dialirkan kembali ke sungai.

#### **D. PROSES PENGGABUNGAN (COMBINE CYCLE)**

##### **1. Prinsip Kerja**

Sistem utama PLTG terdiri dari kompresor, ruang bakar, turbin dan generator. Udara luar ditekan dengan kompresor yang umumnya dikopel/diputar langsung dengan turbin gas untuk memperoleh jumlah oksigen guna keperluan pembakaran. Udara yang telah dikompresikan tersebut selanjutnya dipergunakan untuk membakar bahan bakar dalam ruang bakar (Combustion- Chamber). Gas hasil pembakaran diekspansikan melalui sudu turbin gas sehingga menghasilkan momen putar pada poros turbin gas, Momen tersebut dipergunakan untuk memutar kompresor dan generator. Gas buang setelah berekspansi dalam turbin terbuang keluar dengan temperatur yang masih cukup tinggi (450 - 550 ° C).

Dap kering (Super Heat) yang dihasilkan dari ketel gas buang selanjutnya dipergunakan untuk memutar turbin uap. Setelah diekspansikan dalam turbin uap, uap kering menjadi uap jenuh (basah) agar uap terbuang,

uap tersebut dikondensasikan dalam kondensor yang didinginkan dengan air pendingin, untuk dipompakan kembali kedalam ketel gas buang.

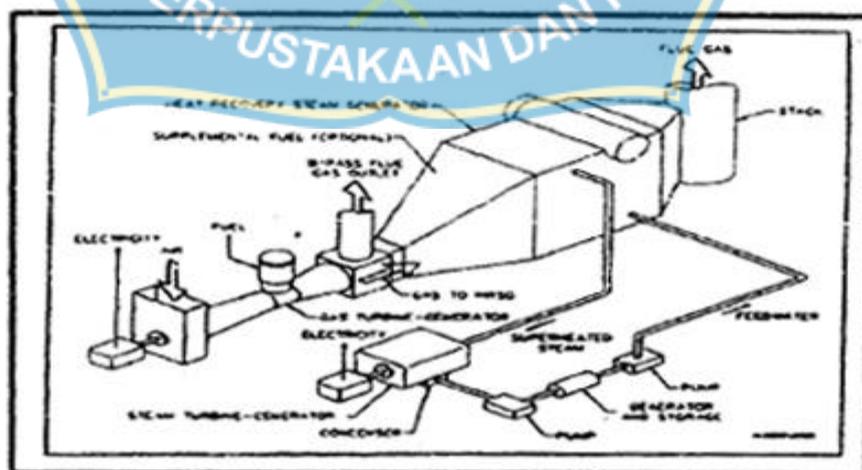
## 2. Peralatan Utama

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU), merupakan pembangkit listrik kombinasi antara Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Tenaga Uap (PLTG dan PLTU) dengan memanfaatkan kembali gas buang PLTG untuk membangkitkan uap guna keperluan PLTU.

Tujuan pengkombinasian tersebut adalah untuk menaikkan efisiensi termal karena energi panas yang terkandung dalam gas buang PLTG tersebut dipergunakan untuk membangkitkan tenaga listrik melalui PLTU.

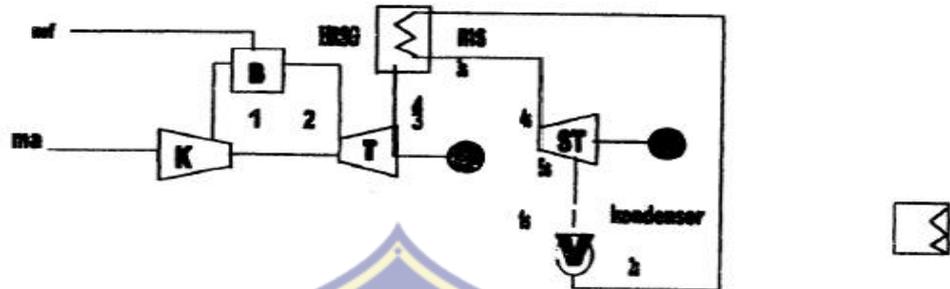
Secara ringkas suatu instalasi utama PLTGU terdiri dari :

- Turbin Gas (PLTG).
- Ketel Gas Buang (Heat Recovery Steam Generator, HRSG).
- Turbin Uap.
- Peralatan kelengkapan lainnya (balance of plant)



Gambar 2.15 instalasi gabungan gas – uap sederhana (combine cycle)

### 3. Proses Penggabungan (Combine Cycle)



Gambar 2.16 Instalasi Gabungan Gas - Uap sederhana (combine cycle)

Gambar diatas memperlihatkan contoh instalasi gabungan sederhana mana satu unit turbin gas yang digabungkan dengan satu unit turbin uap.

Proses Penggabungan (Combine Cycle) adalah proses penggabungan antara Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

Gas buang (exhaust) dari unit pembangkit tenaga gas ini masing-masing dihubungkan pada ketel / boiler atau Heat Recovery Steam Generator (HRSG) untuk dimanfaatkan pada proses penguapan mengikat gas buang ini masih memiliki enthalpy yang tinggi yang temperaturnya berkisar 531 °C

Energi gas buang hasil pembakaran bahan bakar tersebut yang dimanfaatkan untuk memanaskan dan menguapkan air dalam ketel (HRSG) sehingga menghasilkan uap kering (super heat) yang selanjutnya dipakai untuk memutar turbin dan membangkitkan listrik lagi.

Instalasi Gabungan (Combine Cycle) antara turbin gas dan uap dengan menghubungkan dua unit ketel dan turbin uap pada saluran gas buang dari 2 unit turbin gas, memiliki fleksibilitas yang tinggi guna memenuhi kebutuhan beban yang bervariasi setiap hari.

Antara ketel dan saluran gas buang terdapat bay pass stack yang berfungsi untuk saluran buang jika turbin gas akan dioperasikan secara terbuka (open cycle). Untuk kebutuhan beban (45 MW), maka tentunya 1 unit instalasi turbin gas = 45,2 MW) dapat dioperasikan sendiri secara terbuka sehingga gas buang luar, melalui bay pass stack, sementara untuk beban dasar dibawah daya tersebut ini dapat dilakukan dengan mengurangi laju aliran masa udara masuk kompressor.

Pada kebutuhan untuk beban sedang yang tinggi (misalnya 135 MW) atau di atas beban maksimum dari 2 turbin gas (sekitar 90 MW) maka tentunya sistem harus dioperasikan secara gabungan (Combine Cycle) dengan menghubungkan langsung saluran gas buang dengan ketel untuk produksi uap .

Untuk memperoleh fleksibilitas pengoperasian dan keandalan yang baik maka konfigurasi PLTGU umumnya terdiri dari 2 turbin gas + 2 ketel uap (HRSG) + 1 Turbin Uap atau 3 Turbin Gas + 3 Ketel Uap (HRSG) + 1 Turbin Uap.

Konfigurasi sistem gabungan tersebut memiliki keuntungan bila salah satu turbin gas tidak beroperasi karena pemeliharaan atau gangguan

maka sistem tersebut masih dapat beroperasi dengan beban iebih rendah (partial load).

Uap bekas yang telah berekspansi di dalam turbin kemudian dikondensasikan dengan memanfaatkan air sungai sebagai media pendingin dan selanjutnya dipompakan kembali sebagai air pengisi ke masing-masing ketel.

Di bawah ini akan dijelaskan tentang proses pengkombinasian (Combine Cycle) dalam diagram T – S



Gambar 2.17 Diagram T - S siklus gabungan (combine cycle)

Gambar diagram T - S dari siklus gabungan diperlihatkan dimana pada titik 1-2 merupakan proses pengisapan dan pemampatan udara atmosfer oleh kompresor, titik 2-3 merupakan proses pembakaran dimana udara yang bertekanan bertemperatur cukup tinggi dimasukkan kedalam ruang bakar untuk selanjutnya mengalami proses pembakaran sehingga menghasilkan gas dengan .emperatur dan tekanan yang sangat tinggi, titik 3-4 adalah langkah ekspansi dimana gas pembakaran berekspansi untuk menggerakkan turbin, titik 4-5 adalah proses pengeluaran kalor atau gas

buang yang sekaligus merupakan proses penyerapan kalor oleh fluida air menuju ke fase uap dari titik 2s-3s-4s, titik 4s-5s merupakan langkah ekspansi uap menggerakkan turbin pada instalasi uap, titik 5s-1s adalah proses pelepasan kalor dalam kondensor, Sementara 1s-2s merupakan proses pemompaan fluida air untuk selanjutnya masuk ke dalam ketel.

### E. Efisiensi Termal

Berdasarkan proses kerja dari sistem kombinasi diatas maka efisiensi thermal dari siklus gabungan dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{th} = \frac{P_{gt} + P_{st}}{Q_{gt}} \times 100\%$$

Dimana:

$\eta_{th}$  = Efisiensi Thermal.

$P_{gt}$  = daya yang dihasilkan oleh Turbin Gas (kW).

$P_{st}$  = Daya yang dihasilkan oleh Turbin Uap (kW).

$Q_{gt}$  = Pemasukan kalor pada Turbin Gas (kJ/s).

Sementara jika system menggunakan pembakaran tambahan (supplementary firing) maka efisiensi thermal dapat diketahui dari persamaan:

$$\eta_{th} = \frac{P_{gt} + P_{st}}{Q_{gt} + Q_{sf}} \times 100\%$$

Dimana :

$Q_{sf}$  = Pemasukan kalor pada pembakaran tambahan (kJ/s).

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **A. Jenis Penelitian**

jenis penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan tujuan untuk titling besarnya daya yang dibangkitkan antara gabungan turbin gas dan uap pembangkit PT. Energi sengkang.

#### **B. Lokasi dan Waktu Penelitian**

Penelitian dilaksanakan: PT. Energi sengkang pada area pembangkit. penelitian ini dilaksanakan selama 6 (enam) bulan dari bulan Juni sampai dengan Desember 2014. Untuk pengambilan data dimulai tanggal 1 sampai dengan 30 September 2014.

#### **C. Perangkat penelitian**

Penelitian ini menggunakan alat bantu berupa seperangkat komputer (laptop atau PC) lengkap dengan software pendukung seperti microsoft office dan lain lain. penelitian ini juga menggunakan bantuan pengambilan data melalui internet dan media lainnya.

## D. Flowchart

### D. Flowchart



KET :

- Pada kebutuhan beban di bawah 90 MW maka sistem pengoperasian yang dilakukan adalah cara pertama yaitu pengoperasian turbin gas.
- Pada kebutuhan beban di atas 90 MW maka sistem pengoperasian dilakukan dengan cara pertama yaitu penggabungan turbin gas dan turbin uap.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Perhitungan Turbin Gas

##### 1. Laju Aliran Massa Bahan bakar

Laju aliran massa bahan bakar yang disuplay pada ruang bakar dari unit turbin gas dapat dihitung sesuai data yang ada dengan menggunakan persamaan dari kalor hasil pembakaran:  $Q_f - m_f \cdot LHV$  kJ/s.

Dimana:

Suplai kalor pada bahan bakar ( $Q_f$ ) = 140100 kJ/s.

Low heating value (LHV) = 47968 kJ/S. maka:

$$\text{laju aliran massa bahan bakar (} m_f \text{)} = \frac{Q_f}{LHV} = \text{kg/s}$$

$$m_f = \frac{140100}{47968}$$

$$m_f = 2,92 \text{ kg/s}$$

##### 2. Laju Aliran Massa Udara

Laju aliran massa udara dapat dihitung dari persamaan:

$$m_g = m_a + m_f \text{ kg/s}$$

dimana.

laju aliran massa gas buang ( $m_g$ ) = 166 kg/s maka:

laju aliran massa udara ( $m_a$ ) =  $m_g - m_f$

$$m_a = 166 - 2,92$$

$$m_a = 163,08 \text{ kg/s}$$

### 3. Perbandingan Berat Udara Bahan Bakar

Dari hasil perhitungan diatas maka dapat diketahui perbandingan antara bahan bakar - udara (FAR) pada proses pembakaran dalam ruang bakar yaitu dengan persamaan:

$$\text{Perbandingan bahan bakar - udara (FAR)} = \frac{mf}{ma} \text{ kg.bb/kg.ud}$$

$$(\text{FAR}) = \frac{2,92}{163,08}$$

$$\text{FAR} = 0,018 \text{ kg.bb/kg.ud}$$

Dimana perbandingan berat bahan bakar-udara dapat berkisar antara 0,02-5.10<sup>-3</sup>

Atau perbandingan antara udara - bahan bakar (APR) yaitu:

$$\text{APR} = \frac{ma}{mf} = \text{kg.} \frac{\text{bb}}{\text{kg}} \cdot \text{ud}$$

$$= \frac{163,08}{2,92}$$

$$= 55,85 \text{ kg.bb/kg.ud}$$

### 4. Menentukan Kerja Kompresor

- a. Menentukan Isentropik Keluar Kompresor

Temperatur keluar kompresor dapat dihitung dengan meninjau persamaan:

$$T_{2s} = \left[ \frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{k-1}{k}}$$

Data dengan perbandingan tekanan yang telah ditetapkan (P2/P1) = 14 dimana range untuk perbandingan tekanan adalah 10-18, sehingga:

$$T_{2s} = 301,5(14)^{1,4-1}$$

$$= 640,84 \text{ K}$$

Untuk udara,  $k = 1,4$  (asumsi udara masuk kompresor merupakan gas ideal),  
maka pada temperatur  $T_2 = 640,84$  K diperoleh  $C_{pa} = 1,06$  kJ/kg K.

b. Kerja Isentropik Kompresor

Kerja isentropik dari compressor dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} W_c &= C_{pa}(T_{2s} - T_1) \text{ kJ/kg} \\ &= 1,06(640,84 - 301,5) \\ &= 359,7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

c. Temperatur Aktual Keluar Kompresor

Berdasarkan siklus bryton aktual, efisiensi kompresor adalah :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{(w_c)}{(w_{ca})} \\ &= \frac{(T_{2s} - T_1)}{(T_2 - T_1)} \end{aligned}$$

Dengan mengasumsi bahwa efisiensi isentropic dari kompresor adalah 0,88 ,  
maka temperatur aktual keluar kompresor dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_c} \\ &= 3,01 + \frac{640,84 - 301,5}{0,88} \\ &= 696,09 \text{ K} \end{aligned}$$

Pada temperature actual keluar compressor dapat diketahui harga  $C_{pa} = 1,08$  kJ/kg.K.

d. Kerja aktual Kompresor.

Kerja aktual kompresor dapat dihitung dengan persamaan;

$$\begin{aligned}
 W_{ca} &= C_{pa} (T_2 - T_1) \text{ kJ/kg} \\
 &= 1,08 (696,09 - 301,5) \\
 &= 426,157 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Sehingga dengan daya yang digunakan untuk menggerakkan kompressor dapat dihitung dengan persamaan :

$$\begin{aligned}
 P_c &= m_a \times W_{ca} \text{ kW} \\
 &= 163,08 \times 426,157 \\
 &= 69497,7 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

## 5. Menentukan Kerja turbin

- a. Temperatur isentropik keluar Turbin Gas

Berdasarkan siklus bryton aktual, efisiensi turbin adalah :

$$\eta_T = \frac{(T_3 - T_4)}{(T_3 - T_{4s})}$$

Dari persamaan diatas dapat dihitung temperatur isentropik keluar turbin gas dengan efisiensi isentropik turbin diketahui sebesar 0,86 dengan temperatur aktual keluar turbin sebesar 531 °C atau 804 K.

$$\begin{aligned}
 T_{4s} &= T_3 - \frac{(T_3 - T_4)}{\eta_T} \\
 &= 1373 - \frac{1373 - 804}{0,86} \\
 &= 711,4 \text{ K}
 \end{aligned}$$

- b. Kerja Isentropik Turbin

Berdasarkan persamaan yang ada dalam teori, yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, maka kerja turbin isentropik adalah:

$$\begin{aligned}
 W_{ta} &= C_{pg}(T_3 - T_{4S}) \text{ kJ/kg} \\
 &= 1,214(1373 - 711,4) \\
 &= 803,21 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

c. Kerja Aktual Turbin

Untuk menentukan kerja actual turbin gas dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_T &= C_{pg}(T_3 - T_4) \text{ kJ/kg} \\
 &= 1,214(1373 - 804) \\
 &= 690,8 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

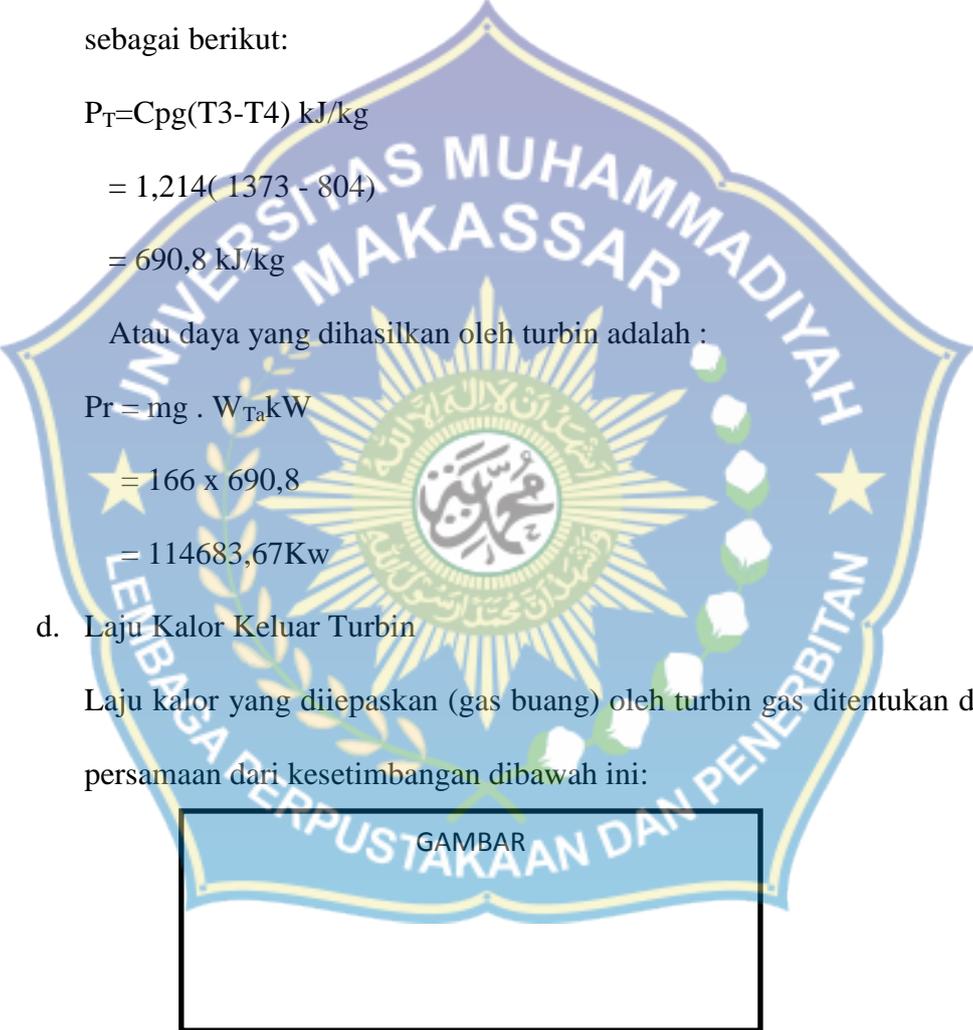
Atau daya yang dihasilkan oleh turbin adalah :

$$\begin{aligned}
 P_r &= m \dot{g} \cdot W_{Ta} \text{ kW} \\
 &= 166 \times 690,8 \\
 &= 114683,67 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

d. Laju Kalor Keluar Turbin

Laju kalor yang dipelepas (gas buang) oleh turbin gas ditentukan dengan persamaan dari kesetimbangan dibawah ini:

GAMBAR



$$q_{out} = q_3 - P_T \text{ kW}$$

dimana:

$$q_3 = q_2 + q_{f,kW}$$

$$= (m_a \cdot C_{p,ud} \cdot T_2) + (m_f \cdot LHV)$$

$$= (163,08 \times 1,08 \times 696,09) + (2,92 \times 47968)$$

$$= 262699,68 \text{ kW}$$

Sehingga laju kalor yang dilepaskan oleh sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

$$q_{out} = q_3 - P_T \text{ kW}$$

$$= 262699,68 - 114683,67$$

$$= 148016 \text{ kW}$$

#### 6. Kerja Netto Keluaran Generator

Kerja Netto yang merupakan daya yang berguna yang digunakan untuk menggerakkan generator dapat diketahui dengan persamaan :

$$P_{net} = P_T - P_{cakW}$$

$$= 114683,67 - 69479,7$$

$$= 45204,67 \text{ kW}$$

#### 7. Efisiensi Thermal Siklus

Untuk menentukan efisiensi thermal dari siklus turbin gas maka dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$\eta_{th} = \frac{P_{net}}{Q_{in}} \times 100\%$$

Dimana;

$$P_{\text{net}} = 45204,67 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{in}} = qf = 140100 \text{ kW}$$

Maka efisiensi thermal siklus

$$\eta_{\text{th}} = \frac{45204}{140100} \times 100\%$$

$$= 32,26 \%$$

## B. Perhitungan Turbin Uap

### 1. Sifat - sifat Uap panas Lanjut Keluar Ketel Gas Buang

Sifat dan Uap Panas lanjut ini ditentukan oleh tekanan dan temperatur yang diizinkan sesuai dengan tabel data yang ada di lampiran:

$$P_3 = 4,32 \text{ Mpa}$$

$$P_4 = 503^\circ\text{C}$$

Maka didapatkan dari tabel data yaitu :

$$h_3 = 3448,56 \text{ kJ/kg}$$

$$S_3 = 7,0601 \text{ kJ/kg}$$

### 2. Sifat - Sifat Uap Panas Lanjut Masuk Turbin

Sifat Uap dipanaskan lanjut keluar ketel gas buangan mengalami kenaikan tekanan dan temperatur pada kondisi masuk turbin yaitu:

$$P_4 = 4,15 \text{ Mpa}$$

$$T_4 = 500^\circ\text{C}$$

Dari tabel uap A.1.3.maka didapatkan :

$$h_4 = 3443759 \text{ kJ/kg}$$

$$S_4 = 7,0721 \text{ kJ/kg. K}$$

### 3. Sifat - Sifat Uap panas Jenuh Keluar Turbin

Sifat-sifat dari uap panas jenuh keluar turbin atau kondisi uap jenuh masuk kondensor ini juga biasa sesuai dengan tekanan dan temperatur masuk kondensor:

$$P_5 = 12,4 \text{ kPa}$$

$$T_5 = 50,1^\circ\text{C}$$

Dari tabel uap A. 1.2 maka diperoleh :

$$h_{f5s} = 208,2 \text{ a/kg}$$

$$h_{fg5s} = 2383,34 \text{ IoV/kg}$$

$$S_{f5s} = 0,6999 \text{ kJ/kg}$$

$$S_{fg5s} = 7,3822 \text{ kJ/kg K}$$

### 4. Kualitas Uap Masuk Kondensor

Untuk menghitung kualitas uap dipergunakan sama pada tingkat keadaan uap dipanaskan lanjut sebelum masuk turbin.

$$\text{Dimana : } S_4 = S_{5s}$$

$$S_{5s} = S_{f5s} + X_{5s} (S_{fg5s})$$

Dengan memasukkan nilai diatas maka diperoleh kualitas uap pada kondisi masuk kondensor

$$\begin{aligned} X_{5s} &= \frac{S_{5s} - S_{f5s}}{S_{fg5s}} \\ &= \frac{7,0721 - 0,6999}{7,3822} \\ &= 0,86 \end{aligned}$$

Kualitas uap masuk kondensor adalah 86 %.

Entalpi Uap dapat diketahui dengan persamaan :

$$\begin{aligned} h_{5s} &= h_{f5s} + X_{5s}(h_{fg5s}) \\ &= 208,20 + 0,86 (2383,34) \\ &= 2257,87 \text{ (0/kg)} \end{aligned}$$

### 5. Keluaran Kerja Turbin

Kerja turbin dapat dihitung dengan persamaan :

$$\begin{aligned} W_{Ts} &= h_4 - h_{5s} \text{ kJ/kg} \\ &= 3443,59 - 2257,87 \\ &= 1185,72 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

dari data diatas, keluaran kerja turbin sebenarnya dapat dihitung dengan persamaan:

$$W_T = W_{Ts} \cdot \eta_T \text{ kJ/kg}$$

Dimana ;  $\eta_T = 0,86$  selanjutnya diperoleh :

$$\begin{aligned} W_T &= 1185,72 \times 0,86 \\ &= 1019,72 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Atau daya yang dihasilkan oleh turbin adalah :

$$\begin{aligned} P_T &= m_s \cdot W_T \text{ kW} \\ &= 45,2 \times 1019,72 \\ &= 46091,3 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 6. Koudisi Uap Masuk Kondensor

Entalpi uap jenuh sebenarnya dapat dilihat dengan persamaan sebagai

berikut:

$$\begin{aligned} h_5 &= h_4 - w_T \text{ kJ/kg} \\ &= 3443,59 - 1019,72 \end{aligned}$$

$$= 2423,87 \text{ Id/kg}$$

Sementara kualitas uap sebenarnya dapat dihitung dengan persamaan :

$$X_5 = \frac{H_s - H_{fs}}{H_{fgs}} =$$

dimana:

$$h_s = 2423,87 \text{ (O/kg)}$$

$$h_e = h_{fs} = 208,20 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fgs} = h_{fgs} = 2383,34 \text{ kJ/kg}$$

Dari data diatas maka kualitas uap sebenarnya :

$$X_5 = \frac{2423,87 - 208,20}{2383,34}$$

$$= 0,94$$

Bila kualitas uap masuk kondensor turun terlalu rendah, butir - butir cairan dapat membentur sudu-sudu turbin, oleh karena itu kebiasaan dalam mendesain adalah mempertahankan kualitas aup sekurang-kurangnya sebesar 90 % didalam tingkat bertekanan rendah .

## 7. Kondisi Cairan Jenuh Keluar Kondensor

Cairan jenuh meninggalkan kondensor merupakan fluida air pengisi ketel yang akan masuk ke dalam ketel gas buangan dengan melalui pompa. Koadisi mi dapat diketaliui dimana :

$$P_1 = P_5 = 12,4 \text{ kPa}$$

Dan temperatur air keluar kondensor (T1) 49/7°C cairan jenuhdi dapatkan kondisi:

$$HI = (hfs \text{ pada } P_5 = 12,4 \text{ kPa})$$

$$= 208,2 \text{ Id/kg. Vi}$$

$$= 0.001012 \text{ nWkg.}$$

### 8. Kondisi Cairan Jenuh Keluar Pompa

Dengan memilih efisiensi pompa ( $\eta_p$ ) sebesar 0,85 dan tekanan pompa ( $P_2$ ) sebesar 4,32 Mpa ,untuk kondisi isentropik, maka kondisi cairan sebenarnya dapat diketahui dari persamaan :

$$h_2 = h_1 + V_1 (P_1 - P_2) \eta_p \text{ Kj/kg}$$

Maka:

$$h_2 = 208,2 \frac{4320 - 12,4}{0,85} 0,0010012$$

$$= 213,33 \text{ kJ/kg}$$

### 9. Kerja Pompa

Kerja pompa pengisi ketel dapat diketahui dengan persamaan :

$$W_p = h_2 - h_1 \text{ kj/kg}$$

Dari informasi diatas maka :

$$W_p = 213,33 - 208,2$$

$$= 5,13 \text{ kJ/kg}$$

atau daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan pompa adalah :

$$\begin{aligned} P_p &= m_s \cdot W_p \text{ kW} \\ &= 45,2 \times 5,13 \\ &= 213,87 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 10. Kalor Yang Dibutuhkan/Dilepaskan

Kalor yang dibutuhkan untuk proses penguapan dalam ketel dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :  $Q_{in} = (h_3 - h_2) \text{ kJ/kg}$  Dimana telah diketahui;

$$\begin{aligned} h_3 &= 3558,56 \text{ kJ/kg} \cdot h_2 \\ &= 213,33 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

maka:

$$\begin{aligned} Q_{in} &= 3448,56 - 213,33 \\ &= 3235,23 \text{ a/kg} \end{aligned}$$

Sementara kalor yang dilepaskan oleh uap pada proses kondensasi dapat dihitung dengan persamaan :  $Q_{out} = (h_5 - h_i) \text{ kJ/kg}$ .

Dimana:

$$h_5 = 2423,89 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 208,2 \text{ kJ/kg}$$

Maka :

$$\begin{aligned} Q_{out} &= 2423,89 - 208,2 \\ &= 2215,69 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

## 11. Menghitung Kerja Netto Keluaran Generator

Dari perhitungan diatas diketahui;

$$W_T = 1019,72 \text{ kJ/kg}$$

$$W_p = 5,13 \text{ kJ/kg}$$

Maka kerja netto siklus dapat dihitung dengan persamaan :

$$W_{\text{net}} = W_T - W_p \text{ kJ/kg}$$

$$= 1019,72 - 5,13$$

$$= 1014,59 \text{ kJ/kg}$$

sehingga daya yang dihasilkan adalah :

$$P_{\text{st}} = m_s [W_t - W_p] \text{ kW}$$

Dimana:

$$m_s = 45,2 \text{ kg/s}$$

( $m_s$  adalah laju aliran uap masuk turbin yang dihasilkan oleh 2 ketel dengan masing-masing ketel menghasilkan laju aliran uap sebesar 22,6 kg/s).

maka:

$$P_{\text{st}} = m_s \cdot W_{\text{net}} \text{ kW}$$

$$= 45,2 \times 1014,59$$

$$= 4585,47 \text{ kW}$$

## 12. Menghitung Efisiensi Thermal

Untuk menghitung efisiensi thermal dari siklus turbin uap digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \times 100 \%$$

$$= \frac{1014}{3235,23} = 100 \%$$

$$= 31,3 \%$$

### C. Perhitungan Siklus Gabungan (Combine Cycle)

#### 1. Kapasitas Total Instalasi Gabungan

Kapasitas total atau daya total yang dihasilkan oleh instalasi gabungan gas-uap menurut data perencanaan adalah sebagai berikut:

$$P_{tot} = P_{GT} + P_{ST} \text{ kW}$$

Dimana:

$$P_{GT} = (\text{Daya turbin gas 2 unit}) = 2 \times 45204,67 \text{ kW} = 90409,34 \text{ kW.}$$

$$P_{ST} = (\text{Daya turbin uap}) = 45859,47 \text{ kW.}$$

Sehingga daya total adalah :

$$P_{tot} = 90409,34 + 45859,47$$

$$= 136268 \text{ kW atau } 136,3 \text{ MW}$$

#### 2. Efisiensi Thermal

Efisiensi Thermal dari siklus gabungan dapat diketahui dengan persamaan:

$$\eta_c = \frac{P_{tot}}{Q_f}$$

Dimana laju aliran massa total dari bahan bakar yang disuplai pada 2 unit turbin gas adalah  $2 \times 140100$  atau  $280200 \text{ kW}$ , sehingga:

$$\eta_c = \frac{136268}{280200}$$

$$= 48,6 \%$$

#### D. Data Sistem Gabungan (Combine Cycle Gas dan Uap) PLTGU Sengkang.

Penggabungan antara sistem turbin gas dan sistem turbin uap pada perencanaan PLTGU Sengkang dapat mencapai efisiensi thermal menjadi 48,6 % dibandingkan dengan efisiensi dari turbin gas sendiri sebesar 32,26 % untuk daya 45204,67 kW atau sistem turbin uap sebesar 31,3% untuk daya 45859,47 kW. Hal ini dimungkinkan karena suplay bahan bakar sebesar 280200 kW (2 unit) hanya dilakukan pada unit turbin gas. (2 unit) dan kemudian gas buang yang bertemperatur 531°C yang kemudian bereksipansi menggerakkan turbin uap dengan daya sebesar 45859,47 kW.

Dengan demikian temperatur gas buang yang masih tinggi dari turbin gas justru menjadi faktor utama dalam perencanaan sebuah instalasi pembangkit daya gabungan (CombineCycle) sekaligus mempengaruhi tingkat efisiensi dari siklus secara keseluruhan. Lebih jelas dari perhitungan diperoleh informasi sebagai berikut:

- Keiuaran daya turbin gas (2 unit)	90409,34 kW
- Keiuaran daya turbin uap (dari 2 unit HRSG)	45849,47 kW
- Suplay kalor pada ruang bakar turbin gas (2 unit)	280200 kJ/s
- Efisiensi thermal turbin gas sendiri	32,26 %
- Efisiensi thermal turbin uap sendiri	31,3 %
- Efisiensi thermal siklus gabungan	48,6 %

Pada data diatas diperlihatkan bahwa peningkatan efisiensi dari siklus combine cycle pada tinjauan gas buang berbeda dengan peningkatan efisiensi dari turbin sendiri, dimana pada sebuah instalasi PLTG diharapkan temperatur gas buang tidak terlalu tinggi untuk meningkatkan efisiensi sementara pada sistem gabungan atau instalasi PLTGU temperatur gas buang yang tinggi mampu meningkatkan efisiensi thermal secara keseluruhan.

### E. Generator

PLTGU- Sengkang menggunakan 3 buah generator sebagai pembangkit yang dioperasikan untuk melayani beban penuh. PLTGU ini berfungsi untuk memikul beban besar, yang bekerja secara penuh sepanjang hari dan sepanjang tahun.

★ Dari data spesifikasi yang ada pada lampiran maka kita dapat menghitung :

#### a. Jumlah Kutub Generator

- Untuk Generator yang dibangkitkan turbin Gas

$$f = \frac{p}{2} = \frac{n}{60} = \frac{p \cdot n}{120}$$

$$= \frac{120 \cdot f}{n}$$

dimana diketahui dari data PLTGU Sengkang didapatkan

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$n_{G1} = 3000 \text{ rpm}$$

$$n_{G2} = 3000 \text{ rpm}$$

$$n_{G3} = 3000 \text{ rpm}$$

- $n_{G1}$  jumlah kutubnya yaitu :

$$P_{G1} = \frac{120 \cdot f}{n_{G1}}$$

$$= \frac{120 \times 50}{3000}$$

$$= 2(\text{pasang})$$

- $n_{G2}$  jumlah kutubnya yaitu :

$$P_{G2} = \frac{120 \cdot f}{n_{G2}}$$

$$= \frac{120 \times 50}{3000}$$

$$= 2(\text{pasang})$$

- $n_{G3}$  jumlah kutubnya yaitu :

$$P_{G3} = \frac{120 \cdot f}{n_{G3}}$$



## BAB IV

### PENUTUP

#### A. Kesimpulan.

Dan hasil pembahasan diatas maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Suatu sistem Combine cycle yang ada di PLTGU-Sengkang yaitu perpaduan antara Pusat Listrik Tenaga Gas dan Pusat listrik Tenaga Uap yang mana Gas buang yang meninggalkan turbin gas yang masih mempunyai temperatur suhu yang tinggi ( $531^{\circ}\text{C}$ ) dipakai untuk memanaskan air di ketel uap yang mana menghasilkan uap dan dipakai untuk memutar turbin uap sehingga membangkitkan listrik lagi.
- Besarnya Daya yang dihasilkan oleh Turbin Gas dan Uap yang terdiri dari 2 unit turbin gas yang masing-masing berkapasitas 45550 kW (45 MW) dan satu unit turbin Uap yang berkapasitas 45200 kW (45 MW), sehingga daya totalnya adalah 136,3 MW (135 MW).
- Penggabungan antara instalasi turbin gas dan instalasi turbin uap sebagai suatu instalasi gabungan (Combine Cycle) dengan kapasitas total dayanya sebesar 136,3 MW (135 MW) pada PLTGU - Sengkang, akan mencapai efisiensi sebesar 48,6 % dibandingkan dengan efisiensi dari instalasi turbin gas sendiri sebesar 32,26 % dan efisiensi instalasi turbin uap sendiri sebesar 31,3 %.

## B. Saran-Saran

1. Kepada Lembaga Pendidikan, Khususnya Lembaga Pendidikan Universitas Muhammadiyah Makassar, Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Listrik, hasil penelitian ini merupakan bahan masukan dan bahan pertimbangan dalam mengembangkan ilmu pengetahuan di bidang pembangkitan.
2. Pemanfaatan dari Energi Gas Buang ini sangatlah menguntungkan bukan saja hanya pada PLTGU namun baik juga pada Pembangkit-Pembangkit Tenaga Gas yang lain ataupun pada Pembangkit-Pembangkit Listrik Tenaga Diesel PLTD yang bisa dimanfaatkan gas buangnya unruk mciicapai efisiensi thermal yang tinggi.



**DAFTAR PUSTAKA**

Rohl Kolhoyer (ABB), Combine Cycle Turbin Power Plant 1991.

Ir. M J. Djoko Setyarjo, Ketel Uap Edisi kedua, PT. Pradnya Paramita, Jakarta 2013.

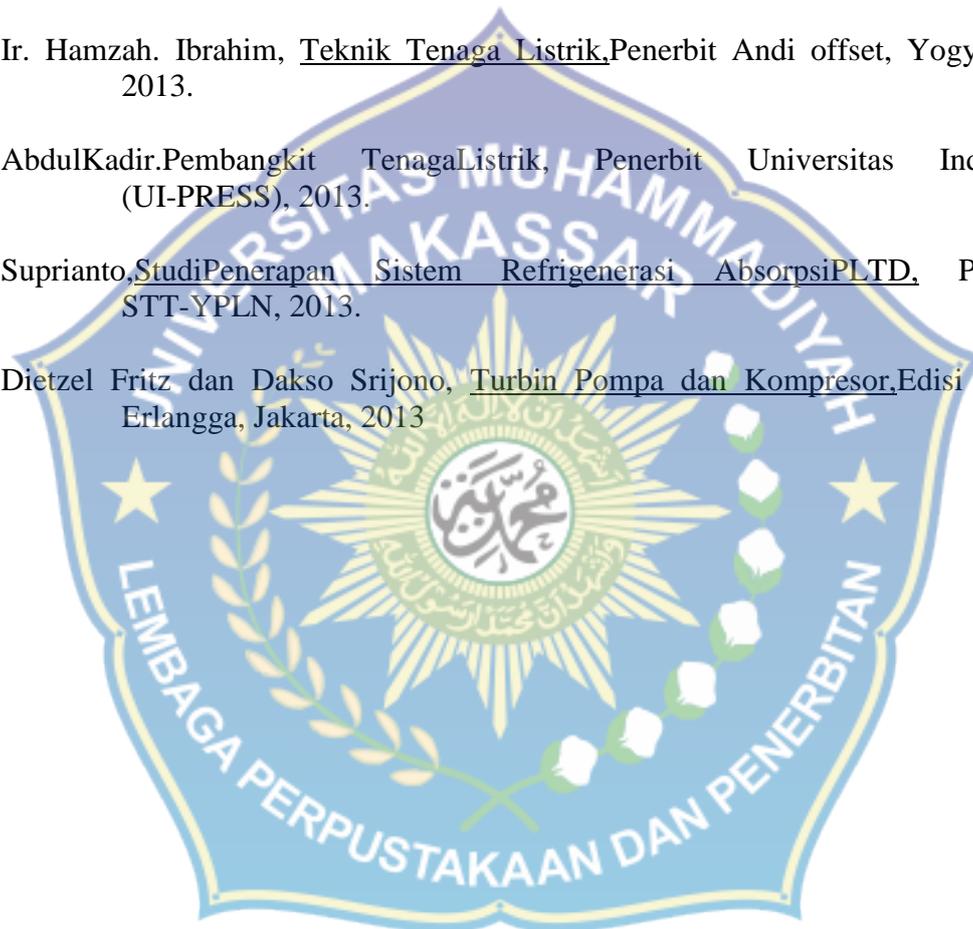
Hicks Edwards, Teknologi Pemakaian Pomoa Penerbit Erlangga, 2013.

Ir. Hamzah. Ibrahim, Teknik Tenaga Listrik, Penerbit Andi offset, Yogyakarta, 2013.

AbdulKadir. Pembangkit Tenaga Listrik, Penerbit Universitas Indonesia (UI-PRESS), 2013.

Suprianto, Studi Penerapan Sistem Refrigenerasi Absorpsi PLTD, Penerbit STT-YPLN, 2013.

Dietzel Fritz dan Dakso Srijono, Turbin Pompa dan Kompresor, Edisi kedua. Erlangga, Jakarta, 2013





# LAMPIRAN

## DATA SPESIFIKASI UNTUK GENERATOR

### A. Untuk Generator (G.T 1)

Serial Number	: H M 301074
Type	: 162 – 668 LL
Rated out put	: 68900 kVA
Power Factor	: 0,85
Voltage	: 11500 V $\pm$ 5 %
Current	: 3459 A
Frequency	: 50 Hz
Temperature	: 40 °C
Stator Mass	: 70000 Kg
Manufactured	: 1995
Fild Voltage	: 244 V
Fild Current	: 856 A
Speed	: 3000 rpm
Rotor	: 18600 Kg
Jumlah kutub	: 2



**Thermal Block**

Number of turbine stages	3
Number of compressor stages	12
Combuster number and type	1, top mounted, silo
Burner number and type	19, EV, lean pre-mix

**Main Reduction Gear Block**

<b>Gear Block</b>	
Manufacturer	MAAG or equivalent
Type:	G-72 s
Type of Gearing	single-helical
Speed of main shaft turbine side	6209/6212 RPM
Speed of main shaft generator side	3000/3600 RPM
Speed of main lube oil pump	1396/1398 RPM
Gear ratio	2.07/1.73
Mechanical limit at gear box base load	70 MW
Casing design	horizontally split

<b>Rotor Barring Device</b>	
Type:	ratchet
Rate of revolution	0.3 RPM
Power consumption	0.3 kW

**Generator Block**

<b>Generator 50/60 Hz</b>	
Generator Series/Size	WY16Z-068LL
Apparent power	73.80/87.00 MVA
Power factor	0.80/0.85
Voltage at terminals	11.5/13.8 kV
Rated phase current	3705/3765 A
Operating speed	3000/3600 RPM
Insulation class	F

*(Continued next page)*

**Typical Technical Data**

Figures are shown for both 50 and 60 cycle machines.

**Gas Turbine-Generator**

Gas Fuel	
Frequency	50/60 Hz
Gross electrical output	52.8/52.6 MW
Gross electrical output at peak load	56.8/56.6 MW
Gross electrical efficiency	34.4%/34.2%
Gross heat rate	9,920/9,975 Btu per kWh
Gross heat rate:	10,485/10,526 kJ per kWh
Shaft speed	6,200 RPM
Compressor pressure ratio	15.7
Exhaust gas temperature	517°C/963°F
Exhaust gas mass flow	179 kg/s/395 lb/s
NOx emissions (corrected to 15% O <sub>2</sub> dry)	25 vppmd

Liquid Fuel	
Frequency	50/60 Hz
Gross electrical output	51.7/51.5 MW
Gross electrical output at peak load	55.5/55.4 MW
Gross electrical efficiency	34.1%/33.9%
Gross heat rate	10,005/10,065 Btu per kWh
Gross heat rate	10,557/10,619 kJ per kWh
Shaft speed	6,200 RPM
Compressor pressure ratio	15.7
Exhaust gas temperature	: 517°C/963°F
Exhaust gas mass flow	179 kg/s/395 lb/s
NOx emissions (corrected to 15% O <sub>2</sub> dry):	42 vppmd, with water injection

lampiran A.2

Data ABB. PT. Energi Sengkang Uap

No	Keterangan	Nilai
1	Temperatur uap superheater keluar HRSG ( $T_3$ ), °C	503
2	Tekanan uap superheater keluar HRSG ( $P_3$ ), MPa	4.32
3	Laju aliran massa uap superheater keluar 1 unit HRSG ( $m_{sh}$ ), kg/s	22.6
4	Temperatur uap masuk turbin ( $T_4$ ), °C	500
5	Tekanan uap superheater masuk turbin ( $P_4$ ), MPa	4.15
6	Laju aliran massa uap masuk turbin ( $m_s$ ), kg/s (2x22,6)	45.2
7	Temperatur aktual uap jenuh keluar turbin/masuk kondensor ( $T_5$ ), °C	50.1
8	Tekanan uap jenuh keluar turbin/masuk kondensor ( $P_5$ ), kPa	12.4
9	Kualitas uap sebenarnya keluar turbin ( $x$ ), kg.uap/kg.camp.	0.86
10	Temperatur air keluar kondensor ( $T_1$ ), °C	49.7
11	Keluaran kerja turbin aktual ( $P_{T_2}$ ), kW	46091.3
12	Efisiensi turbin uap ( $\eta_{st}$ )	0.86
13	Tekanan pompa ( $P_2$ ), MPa	4.32
14	Kerja pompa aktual ( $W_p$ ), kW	231.87
15	Efisiensi pompa ( $\eta_p$ )	0.85
16	Tekanan air masuk HRSG, MPa	4.32
17	Temperatur air masuk HRSG, °C	50.1
18	Kalor yang dibutuhkan untuk proses penguapan ( $q_{in}$ ), kJ/kg	3235.23
19	Kalor yang dilepaskan pada proses kondensasi ( $q_{out}$ ), kJ/kg	2215.69
20	Kerja netto siklus ( $W_{net}$ ), kJ/kg	1014.59
21	Daya berguna sistem ( $P_{net}$ ), kW	45859.5
22	Efisiensi thermal siklus uap ( $\eta_{th}$ ), %	31.3
23	Kalor yang diserap dalam ekonomiser ( $Q_{ek}$ ), kJ/kg	906.41
24	Kalor yang disorap dalam evaporator ( $Q_{ev}$ ), kJ/kg	1676.04
25	Kalor yang disorap dalam superheater ( $Q_{sh}$ ), kJ/kg	650.41
26	Temperatur masuk ekonomiser ( $T_{ek}$ ), °C	50.1
27	Temperatur penguapan/evaporasi ( $T_{ev}$ ), °C	257.59
28	Temperatur pemanasan lanjut/superheater ( $T_{sh}$ ), °C	503

lampiran A.1

Data ABB. PT. Energi Sengkang Gas

No.	Keterangan	Nilai
1	Tekanan udara masuk kompresor ( $P_1$ ), Bar	1.00
2	Temperatur udara masuk kompresor ( $T_1$ ), °C	28.5
3	Laju aliran massa udara masuk kompresor ( $m_a$ ), kg/s	163.08
4	Suplai bahan bakar ( $Q_{gr}$ ), kW	140100
5	Nilai kalor bahan bakar (LHV), kJ/kg	47968
6	Laju aliran massa bahan bakar ( $m_f$ ), kg/s	2.92
7	Perbandingan bahan bakar udara (FAR), kg.bb/kg.ud	0.018
8	Kalor spesifik pembakaran ( $C_{pg}$ ), kJ/kg.K	1.214
9	Perbandingan kompresi pada kompresor ( $r_p$ )	14
10	Temperatur udara isentropik keluar kompresor ( $T_{2s}$ ), °C	640.84
11	Temperatur udara aktual keluar kompresor ( $T_2$ ), °C	696.09
12	Tekanan Masuk turbin ( $P_3$ )	14
13	Efisiensi kompresor ( $\eta_c$ )	0.88
14	Temperatur masuk turbin ( $T_3$ ), °C	1100
15	Temperatur isentropis keluar turbin ( $T_{4s}$ ), °C	711.4
16	Temperatur aktual keluar turbin ( $T_4$ ), °C	531
17	Laju aliran massa gas buang ( $m_{gb}$ ), kg's	166
18	Efisiensi turbin ( $\eta_T$ )	0.86
19	Daya yang dibutuhkan menggerakkan kompresor ( $P_c$ ), kW	69497.7
20	Daya yang dihasilkan turbin ( $P_t$ ), kW	114683.67
21	Daya yang dibutuhkan menggerakkan generator ( $P_{net}$ ), kW	45204.67
22	Laju kalor yang dibutuhkan siklus ( $q_{in}$ ), kW	26299.68
23	Laju kalor yang dilepaskan oleh siklus ( $q_{out}$ ), kW	148016
24	Efisiensi thermal siklus ( $\eta_{th}$ ), %	32.26

INTRODUCTION TO STEAM POWER PLANTS  
LESSON 1. FUNDAMENTALS OF PRODUCING ELECTRICAL ENERGY

T/P

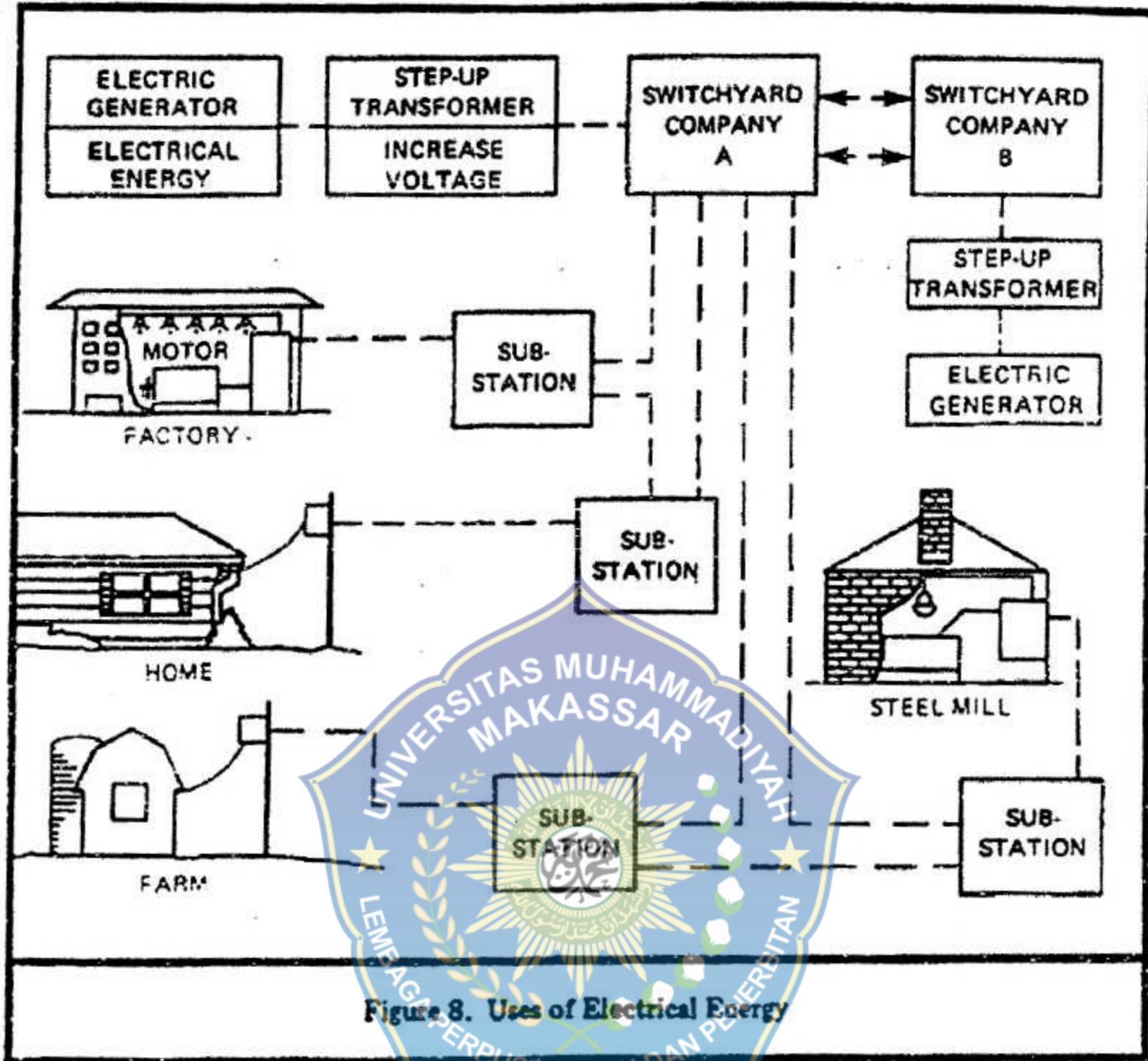
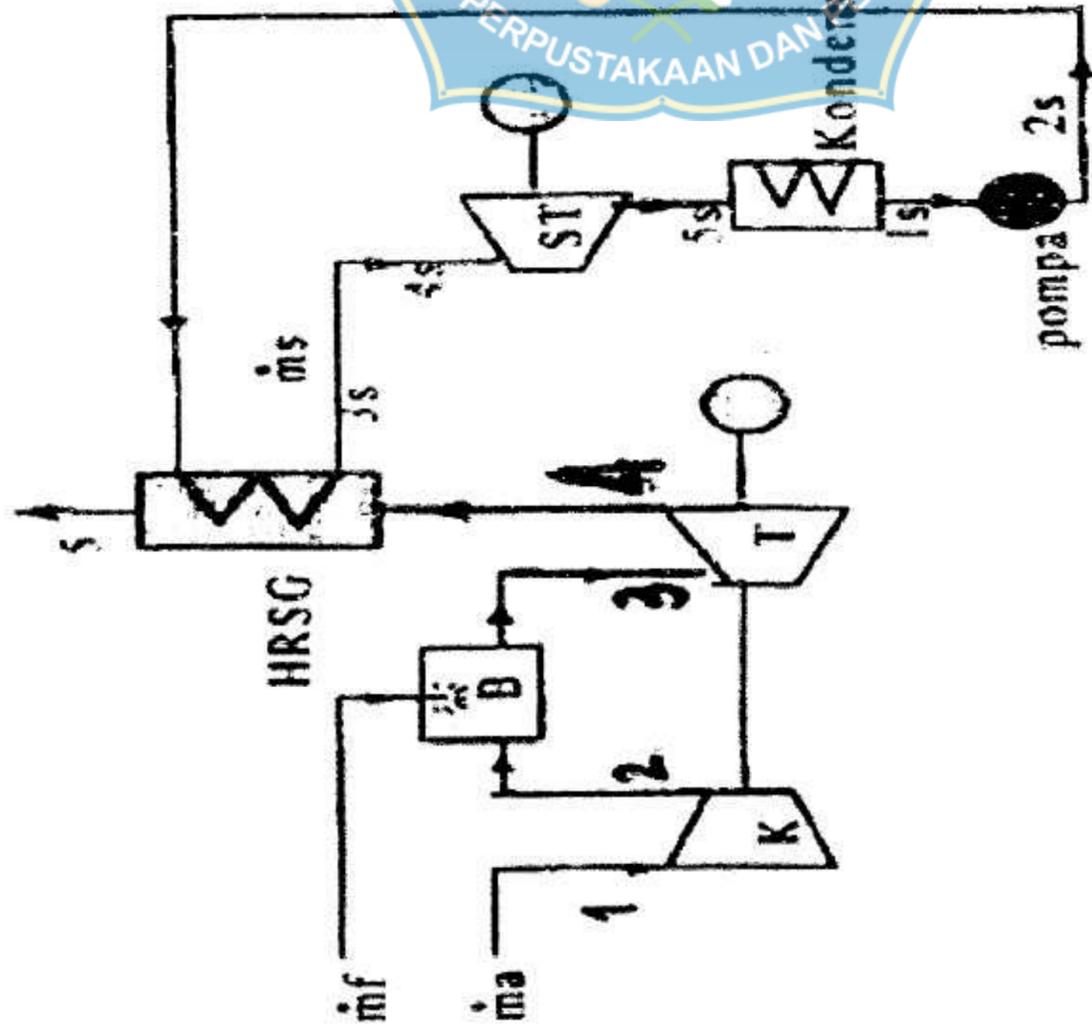


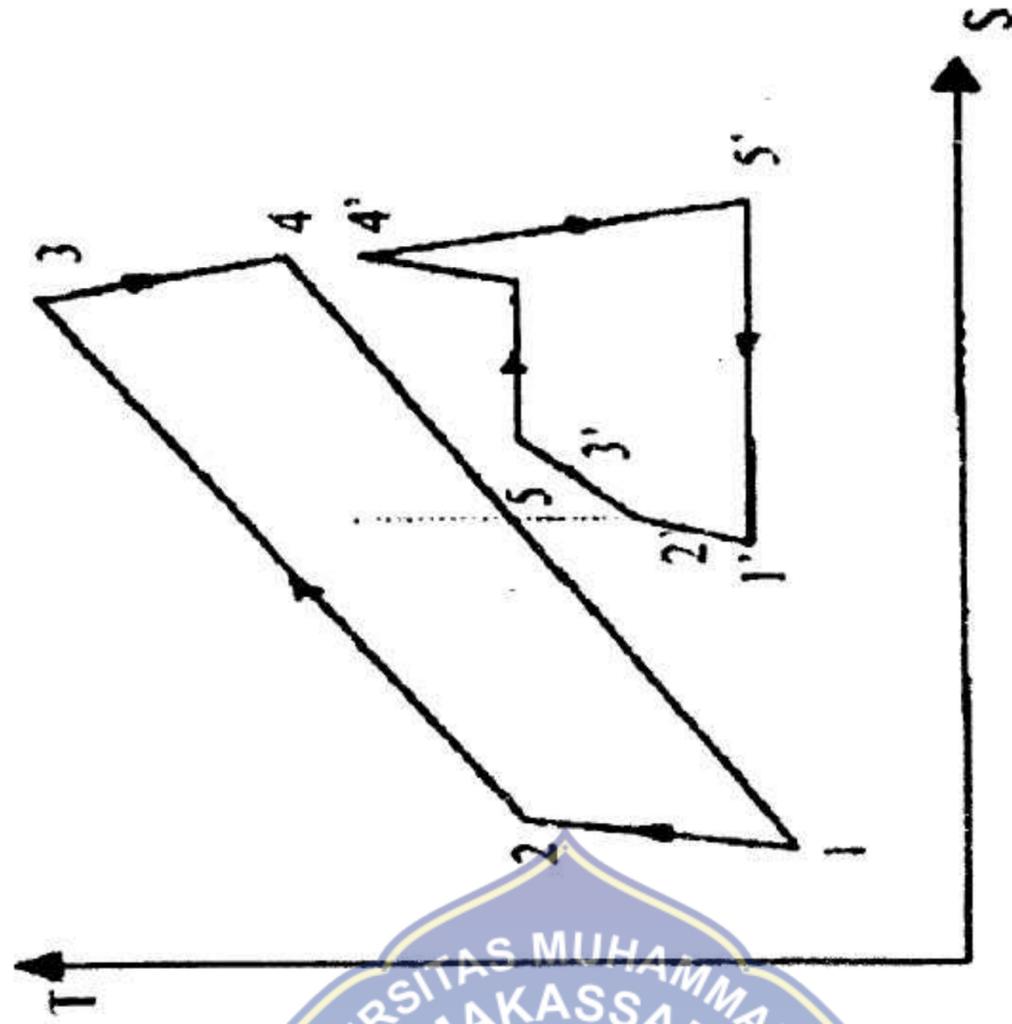
Figure 8. Uses of Electrical Energy







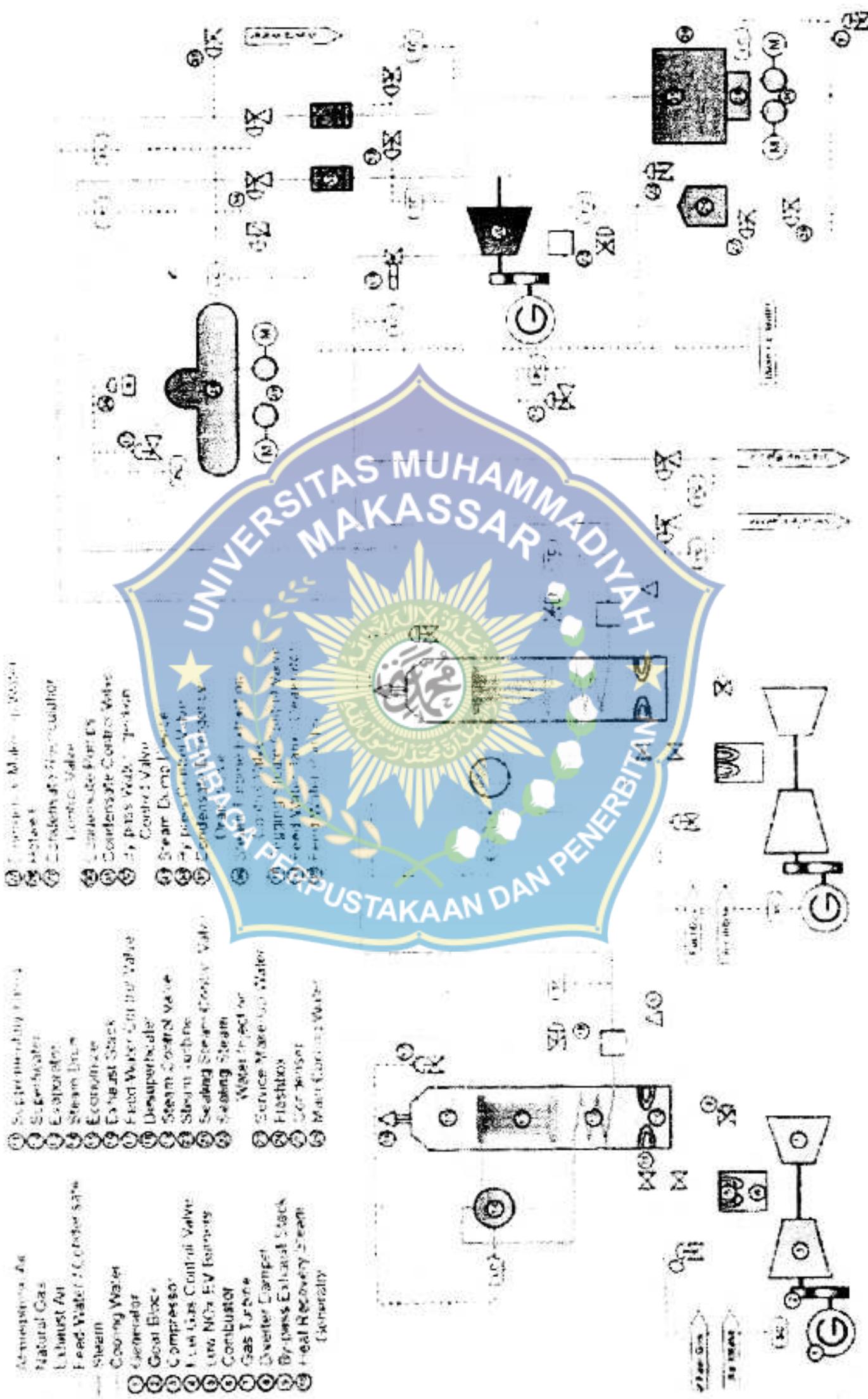
Gambar 2.1 Instalasi Gabungan Gas-Uap Sederhana (combine Cycle)



Gambar 2.2 Diagram T - S Siklus gabungan (Combine Cycle)

# PLANT SPECIFICATION Process Diagram

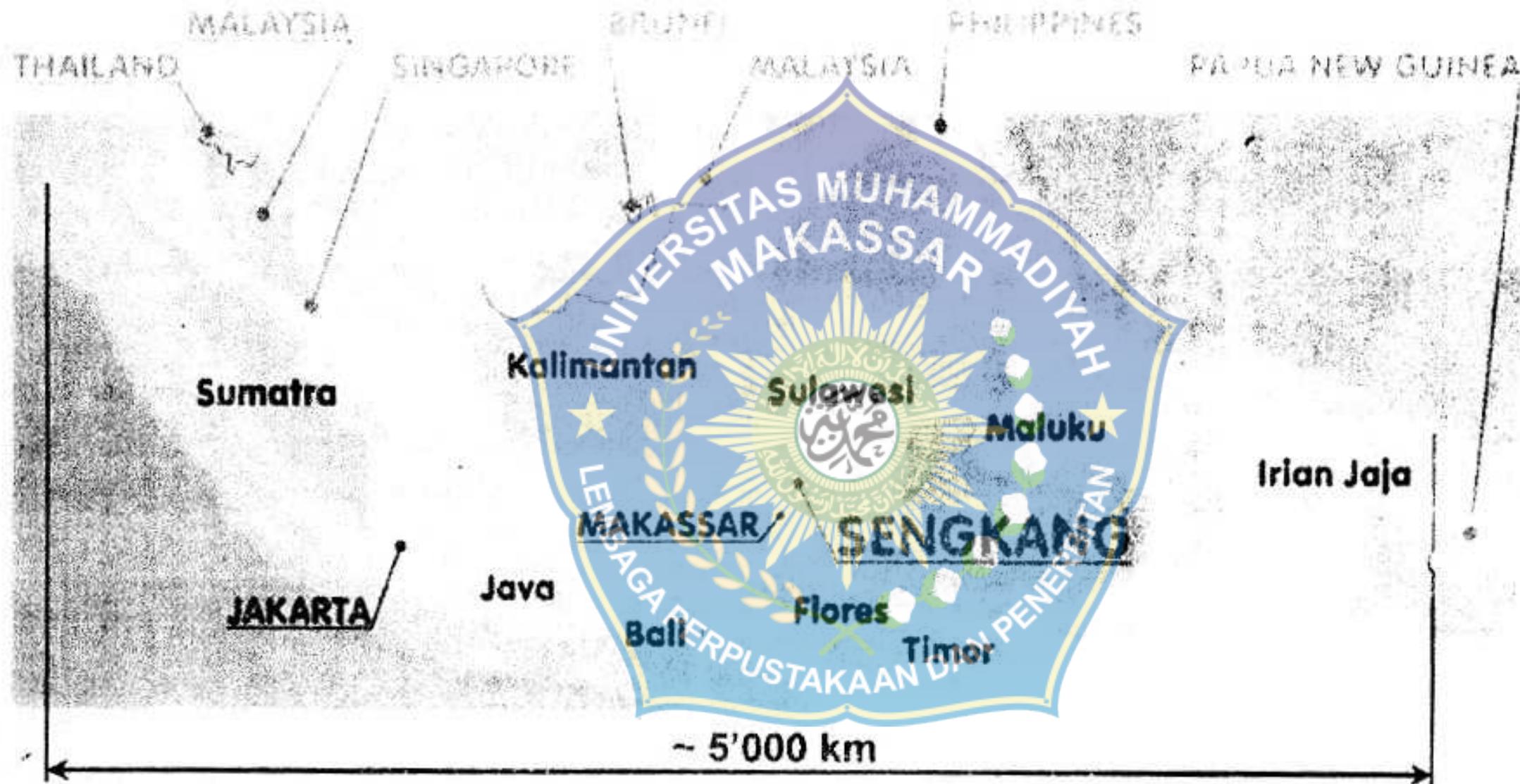
ALSTOM



# LOCATION

Sengkang, Sulawesi, INDONESIA

# ALSTOM



**Geography:** Indonesian Territory: ~3'164'819 km<sup>2</sup>; Land: ~2'026'226 km<sup>2</sup>; Islands: ~17'500;

**Population:** Indonesia: ~204'000'000; Sulawesi: ~14'500'000; South Sulawesi: ~5'000'000; Makassar: ~1'000'000;

**Ethnology:** Ethnic Groups: 370; Languages: 67; Dialects: ~400;