

**PEMANFAATAN GAS BUANG PLTG PADA COMBINED  
CYCLE PLTGU DI PT. PLN (Persero) SEKTOR  
PEMBANGKITAN BELAWAN**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Ujian Sarjana**

Oleh :

**ZULPIKAR SIREGAR**

**07.813.0012**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA  
M E D A N  
2013**

**UNIVERSITAS MEDAN AREA**

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/7/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)17/7/24

## LEMBAR PENGESAHAN

# PEMANFAATAN GAS BUANG PLTG PADA COMBINED CYCLE PLTGU DI PT. PLN (Persero) SEKTOR PEMBANGKITAN BELAWAN

### TUGAS AKHIR

Oleh :

**ZULPIKAR SIREGAR**

07.813.0012

Disetujui:

Pembimbing I,



(Ir. Amru Siregar, MT)

Pembimbing II



(Ir. Syafrian Lubis, MT)

Mengetahui:

  
(Ir. Amru Siregar, MT)  
Program Studi

(Ir. Amru Siregar, MT)

Tanggal Lulus :

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/7/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber  
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area  
Access From (repository.uma.ac.id)17/7/24

## ABSTRAK

*Sistem pengkombinasian antara turbin gas dan turbin uap merupakan sistem yang paling efisien, dimana dengan menggunakan jumlah pemakaian bahan bakar yang sama dapat menghasilkan daya yang lebih besar. Dimana Sistem turbin gas merupakan sistem yang paling baik dalam mengatasi masalah beban puncak, tetapi sistem ini juga mempunyai masalah yaitu temperature gas buang yang sangat tinggi, yang mana dari tingginya temperatur dapat digunakan sebagai pembangkit turbin uap. Dimana gas asap dari turbin gas ini di masukan ke dalam HRSG. Dimana HRSG cara kerjanya sama dengan boiler tetapi tidak memiliki ruang bakar. Uap yang dihasilkan dari HRSG digunakan untuk menggerakkan turbin uap, daya yang dihasilkan turbin uap sebesar 45% - 50% dari daya yang dihasilkan turbin gas.*

**Kata kunci :** *Turbin gas, Gas buang, HRSG, Turbin uap, Daya.*

## Abstract

*System Combining the gas turbine and steam turbine is the most efficient system, where with to utilize the same fuel can produce more power. Where the turbine system is the best system in addressing peak loads, but the system also has the problem that the exhaust gas temperature is very high, whic of the high temperature can be used as a steam turbine generator. Where is the exhaust gas from the gas turbine is at the input to the HRSG. Where HRSG boiler works the same way but to not have the combustion chamber. Steam generated from the HRSG is used to drive a steam turbine, steam turbine power generated by 45% - 50% of the generated power gas turbine.*

**Kyword:** *gas turbine, exhaust, HRSG, steam turbine, power*

## DAFTAR ISI

Halaman

LEMBARAN PENGESAHAN

ABSTRAK

KATA PENGANTAR.....i

DAFTAR ISI .....iii

DAFTAR GAMBAR.....iv

DAFTAR TABEL .....v

BAB I PENDAHULUAN.....1

1.1 Latar Belakang.....1

1.2 Rumusan Masalah.....2

1.3 Batasan Masalah.....3

1.4 Tujuan.....3

1.5 Manfaat Perencanaan.....3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....5

2.1. Turbin Gas.....5

2.1.1. Sejarah Turbin Gas.....5

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/7/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)17/7/24

2.1.2. Klasifikasi dan Aplikasi Turbin Gas.....	6
2.1.3. Instalasi Turbin Gas Yang Tetap Tidak Berpindah-Pindah.....	10
2.1.4. Turbin Gas Untuk Industri Yang Digunakan Untuk Menerima Beban Puncak.....	10
2.1.5. Prinsip Kerja Turbin Gas.....	12
2.1.6. Analisa Termodinamika Turbin Gas.....	13
2.1.7. Pemilihan Turbin Gas.....	19
2.2. Turbin Uap.....	20
2.2.1. Teori Dasar.....	20
2.2.2. Bagian Proses Tenaga Uap.....	20
2.2.3. Masalah Operasional.....	24
2.2.4. Pemeliharaan.....	25
2.2.5. Masalah Lingkungan.....	26
2.2.6. Analisa Termodinamika Fluida Kerja.....	27
2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap.....	33
2.3.1. Teori Dasar PLTGU.....	33
2.3.2. Daya Yang dihasilkan, Rendemen, Kapasitas Uap.....	35
2.3.3. Siklus Dasar Combined Cycle ( PLTGU ).....	36
2.3.4. Siklus Aktual Tekanan Combined Cycle.....	41

2.3.5. Siklus Aktual Tekanan Ganda Combined Cycle.....42

**BAB III METODOLOGI PERENCANAAN.....44**

3.1. Metodologi Perencanaan.....44

3.2. Diagram Alir Perencanaan.....45

**BAB IV ANALISA DAYA.....46**

4.1. Analisa Daya Penggerak Turbin Gas .....46

4.1.1. Analisa Thrmodinamika Pada Kompresor.....49

4.1.2. Analisa Proses Pembakaran di dalam ruang Bakar.....51

4.1.2a. Menentukan Kebutuhan Udara Stokimetri.....52

4.1.2b. Menentukan Kebutuhan Udara Aktual.....53

4.1.3. Menentukan Laju Aliran Bahan Bakar.....55

4.1.4. Analisa Thermodinamika Pada Turbin Gas.....56

4.2. Analisa Daya Penggerak Turbin UAP.....61

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....68**

5.1. Kesimpulan.....68

5.2. Saran .....69

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**

**UNIVERSITAS MEDAN AREA**

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/7/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)17/7/24

**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2.1. Sistem turbi gas siklus terbuka.....6

Gambar 2.2. Sistem turbin gas siklus tertutup.....7

Gambar 2.3. Siklus turbin gas sederhana.....10

Gambar 2.4. Siklus dasar dan aktual turbin gas.....12

Gambar 2.5. (a) Diagram T vs s (b) Diagram h vs s.....12

Gambar 2.6. Diagram h, T vs s.....15

Gambar 2.7. Bagan proses tenaga uap.....19

Gambar 2.8. Proses alir turbin uap.....19

Gambar 2.9. Diagram alir dan Diagram T-s Siklus Rankie.....29

Gambar 2.10. Diagram alir dan Diagram T-s Siklus Rankine Superheater.....30

Gambar 2.11. Diagram alir dan Diagram T-s Siklus Rankine dengan superheater dan Reaheter.....31

Gambar 2.12. (a) Diagram T vs (b) Diagram h-s.....37

Gambar 2.13. Sistem dan diagram T vs s turbin uap.....39

Gambar 2.14. Siklus tekanan tunggal combined cycle.....41

Gambar 2.15. Diagram T-s untuk tekanan tunggal siklus combined cycle.....41

Gambar 2.16. Proses dua tekanan pada siklus combined.....43

Gambar 2.17. Diagram T-s untuk proses dua tekanan pada siklus combined cycle.....43

Gambar 4.1. Diagram alir proses combined cycle.....47

Gambar 4.2. Diagram T-s untuk combined cycle.....47

Gambar 4.3. Diagram h-s untuk kompresor.....49

Gambar 4.4. Diagram h-s turbin gas.....57

Gambar 4.5. Diiagram h, T-s proses siklus turbin gas.....66

Gambar 4.6. Diagram alir untuk turbin uap.....61

Gambar 4.7. Diagram T-s untuk siklus turbin uap.....62

**DAFTAR TABEL**



Tabel 4.1. Hasil turbin gas.....60

Tabel 4.2. Hasil siklus turbin uap.....64



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Dalam era teknologi seperti sekarang ini, kebutuhan akan energi listrik baik untuk industri, perdagangan, pertambangan dan pariwisata terus meningkat. Kondisi tersebut menuntut penyediaan tenaga listrik yang cukup besar, handal, dan efisien. Hal ini disebabkan karena hampir seluruh sektor kehidupan di Negara maju menggunakan listrik.

Di Indonesia upaya pengadaan energi listrik telah diusahakan dengan membangun bermacam-macam mesin pembangkit tenaga listrik seperti : Pembangkit listrik tenaga air (PLTA), Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), Pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), Pembangkit listrik tenaga gas (PLTG)

Namun dalam penulisan ini, yang dibicarakan hanyalah pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU) dimana PLTGU merupakan pusat listrik tenaga thermal yang dioperasikan oleh PLN selain PLTD, PLTP. Unit ini terdiri dari dua bagian utama yaitu : PLTG dan PLTU yang saling berkaitan. Lokasi PLTGU yang berada di Indonesia : Belawan, Muara Karang, Semarang, Surabaya, Tanjung periuk.

Dasar utamanya dipasang unit PLTGU ini adalah pemanfaatan gas bekas dari PLTG yang masih mempunyai temperatur yang sangat tinggi. Dengan pemanfaatan gas bekas ini efisiensi menjadi besar sebab kehilangan energi oleh gas bekas dapat digunakan untuk pemanasan air di boiler untuk menghasilkan uap.

Maka dengan adanya perbedaan tersebut diatas lebih cocok kita mengkombinasikannya menjadi combined cycle (PLTGU). Salah satu keuntungan yang yaitu dapat menghemat penggunaan bahan bakar untuk boiler dengan sebuah Heat Recovery Steam Generator (HRSG).

Dimana gas bekas dari turbin gas dapat dimanfaatkan, yaitu yang berfungsi sebagai masukan energi panas (input energy).

Pada dasarnya suatu proses produksi didalam suatu perusahaan, penghematan ongkos produksi minimum, keuntungan maksimum merupakan kebutuhan yang harus dipenuhi. Dimana dalam proses Combined Cycle ini semua aspek di atas dapat terpenuhi, ditinjau mulai dari penghematan bahan bakar, di mana unit PLTGU ini tergolong sebagai unit yang paling efisien di antara unit – unit termal (bisa mencapai angka di atas 45%) dan sampai dengan hasil produksi ( daya out put) yang naik hingga 50%.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dimana temperatur yang keluar dari turbin gas PLTG masih sangat tinggi, dan dapat dimanfaatkan untuk PLTU. Dengan cara combined cycle dimana daya yang dapat di hasilkan dari gas buang pada PLTG itu sebesar 50% dari daya yang di keluarkan turbin gas dengan combined cycle dimana daya yang dihasilkan merupakan suatu bentuk energi yang terbuang dengan nilai sangat besar. Pada kondisi ini loses yang terjadi tidak dapat di toleri kontitas energinya. Maka loses energi masih dapat dimanfaatkan agar tidak terbuang secara percuma. Dimana pemanfaatan energi yang terbuang ini dimanfaatkan dengan suatu sistem yang disebut combined cycle. Apakah penggunaan HRSG dapat meningkatkan tenaga listrik ?

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan permasalahan dalam tugas akhir ini, beberapa batasan masalah yang diambil diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Analisa proses yang dihasilkan turbin gas.
2. Analisa pemanfaatan gas buang.
3. Analisa yang dihasilkan PT.PLN sektor pembangkitan belawan.

### 1.4 Tujuan Perencanaan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah, untuk meningkatkan kinerja dari proses PLTG dan PLTU dengan menggunakan combined cycle sehingga diketahui seberapa besar peningkatan kinerja dari system. :

1. Menentukan panas yang keluar dari PLTG.
2. Menentukan daya out put yang dapat dihasilkan oleh gas asap pada PLTU.
3. Menentukan efisiensi thermal dari combined cycle

### 1.5 Manfaat Perencanaan

Adapun manfaat dengan terwujudnya tujuan perencanaan diatas adalah :

1. Sebagai buku referensi tambahan untuk mengkaji pemanfaatan gas buang dan PLTG yang belum dimanfaatkan di dalam industri tersebut, terutama energi panas dara cerobong industri tersebut.
2. Untuk teman-teman yang memanfaatkan buku ini sebagai pedomannya

3. Untuk penulis menyelesaikan pengalaman didalam merekayasa ilmu pengetahuan yang didapat selama mengikuti perkuliahan.
4. Serta khususnya untuk penulis, yang sebagaimana laporan tugas skripsi ini bertujuan untuk salah satu syarat untuk menjadi seorang sarjana teknik.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Turbin Gas

##### 2.1.1 Sejarah Singkat Turbin Gas

Pengembangan turbin gas hingga bisa dibuat seperti sekarang ini, yaitu sampai bisa ekonomis untuk bisa dipakai mesin penggerak pesawat terbang dan untuk instalasi darat yang dipakai untuk membangkitkan tenaga listrik yang sudah menghabiskan waktu yang cukup lama sekali, yaitu sejak ditemukan dan didemonstrasikan oleh seorang filosof dari Alexandria sekitar abad pertama masehi. Alat dimaksud terdiri atas sebuah bola lowong yang dapat berputar bebas pada sumbu horizontal antar dua pipa yang menghubungkan kesuatu pendidih. Pada tahun 1791, seorang kebangsaan Inggris bernama Jhon Baber telah merancang turbin gas dengan prinsip tekanan tetap dengan tiga komponen utama yaitu : Kompresor, ruang bakar, sebagai pembuat gas dan turbin impuls. Pada tahun 1872 Dr. F. Stolza seorang kebangsaan Jerman merancang sistem turbin gas dengan kompresor aksial bertingkat ganda yang digerakkan langsung oleh turbin reaksi bertingkat ganda.

Pengujian terhadap sistem turbin gas ini dilaksanakan pada tahun 1900 dan 1904, tetapi tidak menunjukkan hasil yang memuaskan. Hal ini disebabkan terutama karena waktu itu efisiensi kompresornya masih sangat rendah. Pada tahun 1908 di Hanover, H. Holzworth mengembangkan gagasan sistem turbin gas dengan proses pembakaran pada volume konstan, tetapi usaha ini dihentikan karena terbentur pada konstruksi ruang bakar dan tekanan gas pembakaran yang

berubah dengan besarnya beban, meskipun menurut teori dapat diharapkan memperoleh efisiensi siklus yang lebih tinggi pada penggunaan proses pembakaran tekanan constant.

Pada tahun 1919 aldof mayer dari brown boveri jerman barat mendemonstrasikan penggunaan turbin gas dengan kekuatan 4000 Hp pada pameran nasional di swiss. Maka tahun inilah tahun resmi kelahiran turbin gas, sedangkan pesawat terbang pancar gas pertama, di selesaikan pada awal tahun 1937, oleh *British Thomson Houston Co.*

Pada era tahun sekarang pemakaina turbin gas terus berkembang dengan pesat, bahkan pada saat ini telah dibuat turbin gas dengan kekuatan ratusan menggawaat oleh bebrapa pabrik pembuat turbin gas sperti : Brown Boveri Corporation ( BBC ), General Elektic (GE) dan pabrik lainnya. Di Indonesia, Turbin gas pertama kali digunakan pada tahun 1960 ketika diadakan GENAFO di Jakarta. Sejak tahun 1987 sampai saat ini jumlah turbin gas yang dioperasikan di Indonesia mencapai ratusan unit.

### 2.1.2 Klasifikasi dan Aplikasi Turbin Gas

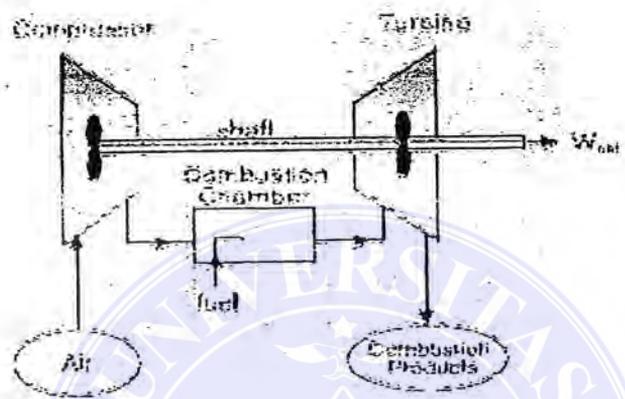
Turbin gas dapat diklasifikasi berdasarkan bebrapa criteria sebagai berikut : menurut Dietzel F (3) :

1. Berdasarkan Siklus Kerja
  - a. Siklus terbuka

Dalam siklus terbuka ini, gas panas hasil pembakaran di ekspansikan pada turbin lalu dibuang atau dikeluarkan ke udara bebas. Struktur turbin gas dengan siklus terbuka yang paling

sederhana terdiri dari kompresor, ruang baker dan turbin yang berfungsi menggerakkan beban terutama kompresor.

Sistem turbin dengan siklus terbuka dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.1 Sistem turbingas siklus terbuka

b. Siklus tertutup ( Closed cycle )

Pada turbin gas siklus tertutup, fluida kerja (udara) dipanaskan dengan memakai alat pemanas(heater). Jadi dalam hal ini fluida kerja adalah gas, tetapi bukan gas panas hasil pembakaran. Fluida kerja udara panas setelah diskspansikan kedalam turbin dialirkan kembali dalam kompresor dengan terlebih dahulu didnginkan melalui pendingin, sehingga dalam sistem ini bahan bakr dari pemanasan tidak bersentuhan sama sekali dengan fluida kerja. Turbin gas dengan siklustertutup dapat mempergunakan berbagai jenis bahan baker lain :

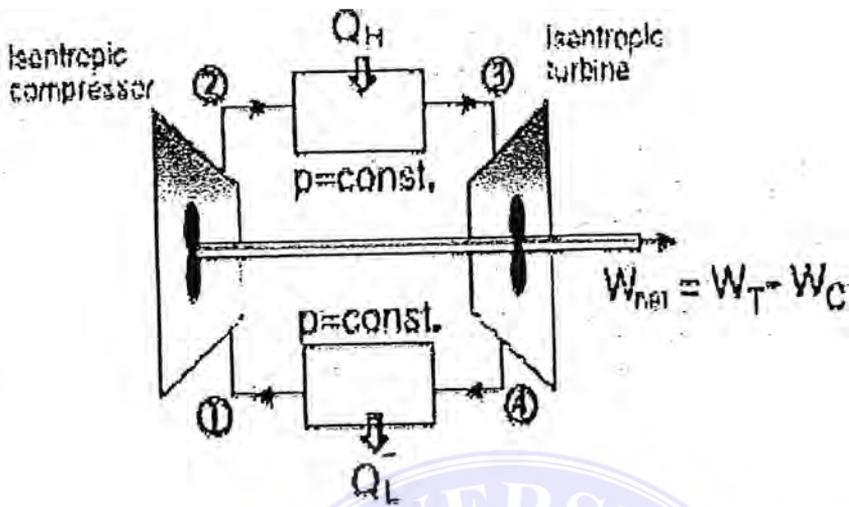
- Minyak Berat
- Gas dapur tinggi
- Serbuk batubara dan lain – lain

Hal ini memungkinkan, karena panas hasil pembakaran bahan baker tersebut digunakan untuk memanaskan alat pemanas yang ditempatkan sebelum turbin.

Turbin gas dengan sistem ini konstruksinya rumit bila dibandingkan dengan siklus terbuka, sebab system ini membutuhkan pesawat pendingin, namun sistem ini memiliki beberapa keuntungan antara lain :

- Untuk daya yang sama, turbin ini mempunyai ukuran yang lebih kecil
- Dapat menggunakan fluida kerja selain udara
- Dapat digunakan bahan baka nuklir untuk pemanasan karena tidak mengotori fluida kerja
- Dapat bekerja pada tekanan yang lebih tinggi
- Jika menggunakan bahan baker nuklir pemanas maka digunakan ditempat – tempat dari atmosfer pada kapal selam.

Sistem turbingas dengan siklus tertutup dapat dilihat dari gambar 2.3 berikut :



Gambar 2.2 Sistem turbin gas siklus tertutup

## 2. Berdasarkan Kotreksinya

### a. Turbin gas tunggal ( Single Shaft )

Turbin gas ini hanya memiliki satu poros tetapi pada poros tersebut telah terdiri dari komponen – komponen utama turbin gas seperti sudu turbin dan kompresor. Turbin gas jenis ini digunakan untuk pembangkit listrik, baik pada perusahaan listrik maupun industri bersekala besar.

Turbin dengan tekanan tinggi ini berfungsi untuk menggerakkan kompresor, mensuplai gas panas pada tekanan rendah. Jenis turbin gas berporos ganda ( multi shaft ) ini, digunakan untuk menahan beban dan torsi yang tinggi atau pun bervariasi.

### 2.1.3 Instalasi Turbin Gas Yang Tetap Tidak berpindah – pindah

Konstruksi instalasi turbin gas dapat antara turbin yang tetap tidak dipindah – pindahkan dan dengan turbin yang dipakai untuk menggerakkan pesawat terbang ataupun auto mobil.

Instalasi turbin gas yang tidak dipindah – pindahkan adalah instalasi yang dipakai untuk menggerakkan atau memutar motor listrik dan untuk menggerakkan kompresor dan juga ada dikapal – kapal, karena turbin ini harus bekerja dalam jangka waktu yang panjang. Dan karena jangka waktu bekerjanya turbin yang lama, maka turbin selama bekerja dibuat memikul beban yang tinggi, Daya yang berguna ( daya efektif ) yang keluar biasa mencapai 100 MW, dimana berarti daya yang dihasilkan turbin harus mencapai 300 MW dan temperature kerja turbin  $850^{\circ}\text{C}$  sampai  $1050^{\circ}\text{C}$  menurut Dietzel, F [3].

### 2.1.4 Turbin Gas Untuk Industri Yang Digunakan Untuk Menerima Beban Puncak

Pada malam hari pemakaian listrik hanya sedikit ( tengah malam ), tetapi pada waktu pagi secara tiba – tiba beban terus naik dan sepanjang hari beban tersebut mencapai puncaknya, Karena mesin – mesin pemakaian listrik di industri bekerja, dan perubahan beban listrik yang terjadi kurang lebih 15 %, Dietzel F [3].

Turbin gas sangat baik bila digunakan untuk menanggulangi atau bertugas untuk menerima beban puncak dengan cepat. Karena turbin gas mulai dari keadaan berhenti sampai bisa berputar dengan cepat dan menerima beban hanya membutuhkan waktu beberapa menit saja dalam pengadaan instalasi turbin gas lebih murah bila di bandingkan dengan turbin uap, sebagai perbandingan untuk

daya yang sama besarnya harga investasi untuk instalasi turbin gas 40%nya instalasi turbin uap. Turbin gas biasa dipasang di pusat tempat – tempat yang membutuhkan tenaga. Hampir sama sekali tidak membutuhkan air pendingin, bisa distart secara otomatis dan bisa dilayani serta di ataur dari jauh.

Pembangunan PLTG di Indonesia mengalami suatu tingkat pertumbuhan yang tinggi pada periode tahun 1973 – 1978. Ini terjadi sebagai hasil dari cash program yang dilaksanakan pada tahun 1970-an. Ketika PLN mengalami kekurangan kapasitas terpasang yang cukup besar, dan pembangunan PLTG dipandang sebagai jalan satu – satunya yang dapat memberikan kapasitas terpasang secara cepat. Menurut Bahri, dkk [ 2 ]

Penggunaan turbin gas sebagai pembangkit tenaga listrik didorong oleh :

1. Kenaikan beban yang sulit diramal
2. Terjadinya keadaan darurat dari suatu sistem pembangkit yang lain
3. Kemudahan dalam pembangunan / pemasangan dan pengoperasian, serta pemasangan yang relative cepat.
4. Adanya perencanaan sstem pembangkit listrik jangka panjang yang didasarkan atas pertimbangan ekonomis secara total

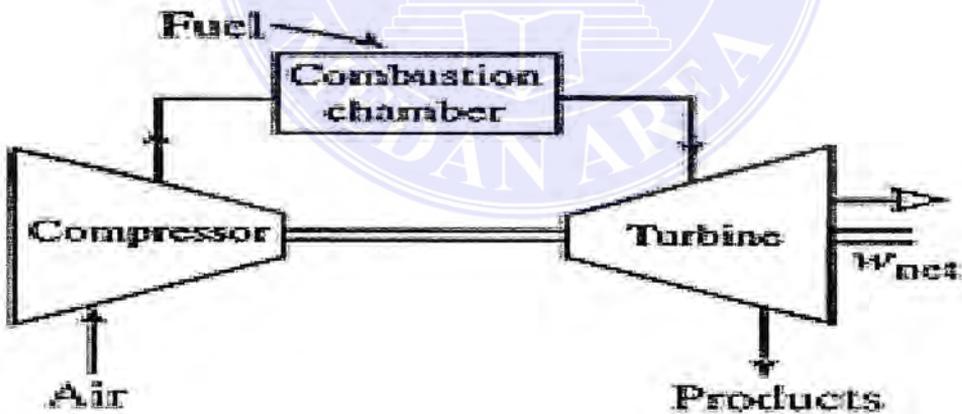
Sedangkan kelemahan yang ada pada PLTG ini adalah biaya operasi yang relative tinggi untuk setiap KWH yang dihasilkan. Efisien yang dapat di capai berkisar 20% - 32% dan energi yang trbawa gas buang ke atmosfer masih cukup besar ( 65% dari energi bahan bakar yang masuk ). Temperature gas buang yang masih sangat tinggi berada pada  $500^0\text{C} - 600^0\text{C}$ . Menurut Bahri, dkk [2].

Bahan bakar yang digunakan oleh PLTG dapat berupa Gas Alam ( natural gas ), gas LPG minyak distilasi ( distillate oil ) dan minyak residu ( residual oil ), yang

harus mempunyai persyaratan tertentu, misalnya unsur vanadium dibatasi 0,5 ppm, unsur kalsium 1 ppm dan sebagainya. Oleh karena itu biasanya ada fasilitas tambahan untuk pengolahan bahan bakar.

### 2.1.5 Prinsip Kerja Turbin Gas

Udara masuk ke kompresor untuk di naikan tekanan, kemudian udara tersebut di alirkan ke ruang bakar. Dalam ruang bakar, udara bertekanan ini bercampur dengan bahan bakar dan dibakar. Apabila di gunakan Bahan Bakar Gas (BBG), maka gas dapat langsung di campur dengan udara untuk dibakar, tetapi bila di gunakan Bahan Bakar Minyak, maka BBM harus di jadikan kabut terlebih dahulu kemudian di campur dengan udara dulu baru di bakar. Teknik mencampur bahan bakar dengan udara sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran, menurut Bahri dkk Siklus turbin gas sederhana dapat terlihat seperti gambar 2.3 berikut :



Gambar 2.3 Siklus turbin gas sederhana

Pembakaran bahan bakar dalam ruang menghasilkan gas bersuhu tinggi sampai kira – kira 1300 C. Gas hasil pembakaran ini kemudian dialirkan menuju turbin untuk disemprotkan kepada sudu - sudu turbin sehingga energy ( enthalpy ) gas di konversikan menjadi enenergi mekanik dalam turbin penggerak generator dan akhirnya generator menghasilkan tenaga listrik. Karena pembakaran yang terjadi mencapai suhu sekitar 1300 C maka suhu – sudu turbin beserta porosnya perlu didinginkan dengan udara.

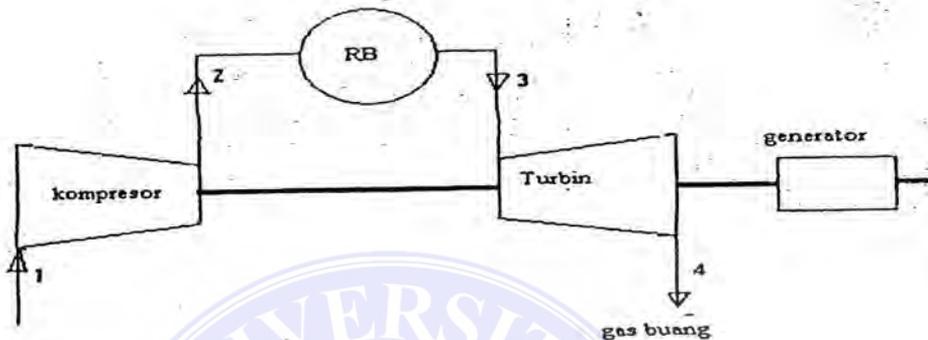
Selain masalah pendingin, operasi turbin gas yang menggunakan gas hasil pembakaran dengan suhu berkisar 1300 C memberi resiko korosi suhu tinggi yaitu bereaksinya logam potassium, vanadium, dan sodium yang terkandung dalam bahan bakar dengan bagian – bagian turbin seperti sudu dan saluran panas ( hot gas path ). Oleh karena itu, bahan bakar yang digunakan tidak boleh mengandung logam – logam tersebut diatas melebihi batas - batas tertentu. Kebanyakan pabrik pembuat turbin gas mensyaratkan bahan bakar dengan kandungan logam potasium, vanadium dan sodium tidak boleh melampaui 1 part per mill ( ppm ). Di Indonesia BBM yang bisa memenuhi syarat ini hanyalah minyak solar, High Speed Diesel Oil, atau yang sering disebut minyak HSD yang disediakan oleh Pertamina. Sedangkan BGG dapat memenuhi syarat tersebut diatas.

### 2.1.6 Analisa Termodinamika Menggunakan Siklus Brayton

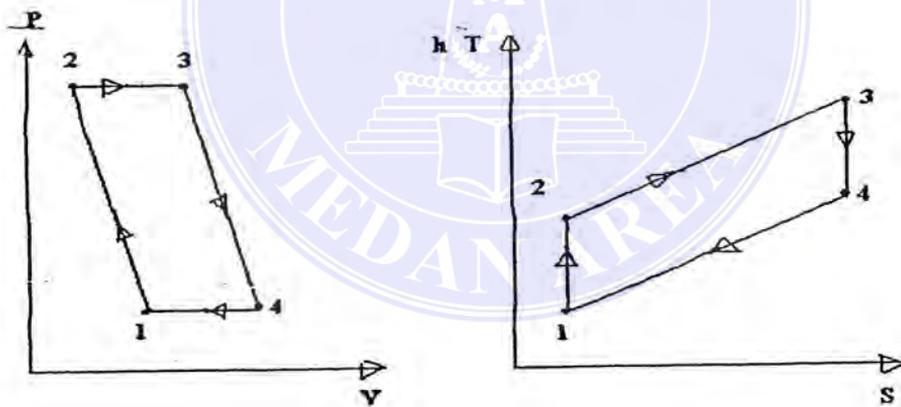
Siklus dasar turbin gas adalah siklus brayton. Namun ini diambil dari seorang sarjan teknik dari boston yang bernama *George Brayton* yang menemukan siklus ini pada abad XIX. Siklus ini merupakan gabungan dari

kompresi isentropic dan kemudian proses pemasukan panas tekanan constant dilanjutkan dengan proses pengeluaran panas pada tekanan konstan.

Gambar dibawah ini memperlihatkan siklus brayton yang sederhana. Kemudian siklus Brayton dapat digambar pada diagram  $h$  vs  $s$  dan  $P$  vs  $V$  dibawah ini :



Gambar. 2-4 Siklus dasar dan actual turbin gas



Gambar. 2.5 (a) Diagram  $T$  vs  $s$  (b) Diagram  $h$  vs  $s$

Proses yang terjadi dari diagram tersebut diatas adalah sebagai berikut :

Proses 1-2 :

Proses kompresi isentropic yang terjadi dalam kompresor

Proses 2-3

Proses pembakaran pada tekanan konstan di dalam ruang baker, adanya pemasukan kalor.

Proses 3-4

Proses ekspansi isentropic didalam turbin

Proses 4-1

Pembuangan panas

Dengan demikian pada proses steady state untuk masing – masing proses diperoleh :

Proses 1-2 : Kerja Kompresor

$$\begin{aligned} W_K &= C_p ( T_2 - T_1 ) \\ &= h_2 - h_1 \text{ ( kJ/kg) } \end{aligned} \quad (2.1)$$

Proses 2 - 3 : Pemasukan Panas

$$\begin{aligned} Q_{in} &= C_p ( T_3 - T_2 ) \\ &= h_3 - h_2 \text{ ( kJ/kg) } \end{aligned} \quad (2.2)$$

Proses 3 – 4 : Kerja ekspansi

$$\begin{aligned} W_1 &= C_p ( T_3 - T_4 ) \\ &= h_3 - h_4 \text{ ( kJ/kg) } \end{aligned} \quad (2.3)$$

Proses 4 – 1 : Pengeluaran panas

$$\begin{aligned} Q_{out} &= C_p ( T_4 - T_1 ) \\ &= h_4 - h_1 \text{ ( kJ/kg) } \end{aligned} \quad (2.4)$$

Kerja netto siklus :

$$W_{\text{net}} = W_t - W_k$$

$$= (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

$$= C_p (T_3 - T_4) - C_p (T_2 - T_1)$$

$$W_{\text{net}} = C_p (T_3 - T_4) - (T_2 - T_1) \text{ (kW)} \quad (2.5)$$

Efisiensi total instalasi ( $\eta_{\text{tot}}$ ) adalah perbandingan antara kerja netto siklus dengan pemasukan energi, jadi :

$$\eta_{\text{tot}} = \text{Kerja netto siklus} / \text{pemasukan energi}$$

$$\eta_{\text{tot}} = W_{\text{net}} / Q_m \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{tot}} &= (T_3 - T_4) - (T_2 - T_1) / (T_3 - T_2) \\ &= 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2) \\ &= 1 - T_1 (T_4 / T_1) / T_2 (T_3 / T_2) \end{aligned} \quad (*)$$

Oleh karena proses 1-2 dan 3-4 adalah isentropis maka perbandingan pressure ratio dengan temperatur yaitu :

$$T_4 / T_3 = (P_4 / P_3)^{(k-1/k)} = (1 / R)^{(k-1/k)}$$

$$T_1 / T_2 = (P_1 / P_2)^{(k-1/k)} = (1 / R)^{(k-1/k)}$$

Maka :

$$T_4 / T_3 = (T_1 / T_2)^{(k-1/k)} = (1 / R)^{(k-1/k)}$$

Atau

$$T_4 / T_1 = T_3 / T_2 \quad (**)$$

Persamaan (\*\*) dimasukkan ke persamaan (\*) menjadi:

$$\eta_{\text{tot}} = 1 - T_1/T_2$$

Atau

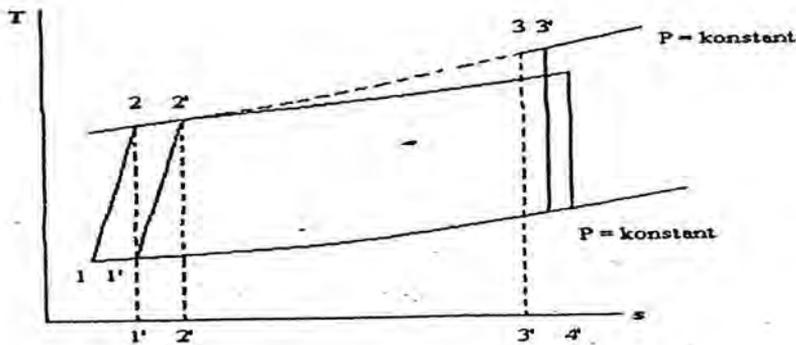
$$\eta_{\text{tot}} = 1 - (1/R)^{(k-1/k)} \quad (2.7)$$

Dengan demikian jelas dapat dimengerti bahwa besarnya harga efisiensi tergantung kepada pressure ratio ( R ) jadi efisiensi akan naik apabila dapat dipergunakan perbandingan antara tekanan kompresi ( R ) yang lebih tinggi.

Pada proses -proses yang terjadi diatas adalah secara actual proses tersebut terdapat penyimpangan – penyimpangan. Adapun penyebab penyimpangan - penyimpangan sebagai berikut :

1. proses kompresi di dalam turbin tidak berlangsung secara isentropis
2. proses ekspansi di dalam turbin tidak berlangsung secara isentropis
3. penurunan tekanan pada ruang baker dan turbin
4. panas jenis fluida kerja akan bervariasi akibat dari perubahan temperature
5. kerja yang dihasilkan turbin lebih kecil dari idealnya akibat pengaruh beban – beban pembantu yang digunakan dalam mesin turbin.
6. Gas yang dihasilkan pembakaran adalah bukan gas ideal.

Kerugian - kerugian tersebut diatas akan mempengaruhi efisiensi siklus, sehingga untuk losses tersebut dapat dilihat pada siklus berikut ini :



Gambar. 2.6 Diagram h, T vs s

Diagram diatas diperoleh :

1. Proses kompresi berlangsung tidak secara isentropis yaitu menurut garis 1-2'

Sedangkan proses ideal yang terjadi adalah 1-2

2. Proses ekspansi berlangsung tidak secara isentropis yaitu menurut garis 3-4'

sedangkan pada proses ideal yang terjadi adalah 3-4.

Efisiensi isentropis pada kompresor:

$$\begin{aligned}\eta_{(is)k} &= \frac{h_2 - h_1}{h_2' - h_1} \\ &= \frac{C_p (T_2 - T_1)}{C_p (T_2' - T_1)}\end{aligned}\quad (2.8)$$

Dimana :

$C_p$  = panas spesifik pada tekanan konstan jenis (Kj/ Kg K )

Efisiensi isentropis pada turbin

$$\begin{aligned}\eta_{(is)k} &= \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4'} \\ &= \frac{C_p (T_3 - T_4)}{C_p (T_3 - T_4')}\end{aligned}\quad (2.9)$$

Jadi temperature keluar kompresor ( $T_2'$ ) dan keluar ( $T_4'$ ) sebenarnya :

$$T_2' = \frac{(T_2 - T_1)}{\eta_{(is)k}} + T_1\quad (2.10)$$

$$T_4' = (T_3 - \eta_{(is)t} + (T_1 - T_1)) \quad (2.11)$$

T = Temperatur (K)

P = Tekanan (Bar)

m = Laju aliran massa (Kg/s)

Rc = Rasio Kompresi (Bar)

$$Rc = P_2/P_1$$

Wt = Daya turbin (kW)

Wc = Daya Kompressor (kW)

K = 1,4

Cp = 1,005 kJ/kg.K

### 2.1.7 Pemilihan Turbin Gas

Sebagai langkah pertama penetapan turbin gas ini perlu ditetapkan spesifikasinya yang sesuai untuk combined cycle. Jenis turbin yang terpilih adalah

- Siklus : Terbuka v.94-2
- Kontruksi : Satu posos, Satu casting, dua ruang bakar
- Penggunaan : Sebagai penggerak generator listrik
- Bahan Bakar : HSD solar
- Type : Axial flow turbin

Dalam pemilihan turbin gas ini perencanaan hanya menghitung satu unit turbin gas saja. karena type dan kontruksinya satu dengan yang lain tidak jauh berbeda. Pada turbin gas 1 temperatur rotor blade turbin mampu menerima panas 1000<sup>0</sup>C, sdangkan pada turbin gas 2 di desain untuk temperature 1050<sup>0</sup>C.



Selain itu pada sisi inlet kompresor untuk turbin 2 di pasang variabele inlet guide vane yang berfungsi untuk menjaga agar exhaust temperature gas tetap konstan dan tidak kurangan panas. ( kalor ) untuk pemanasan Heat Recovery Steam Generator ( HRSG ).

Adapun keuntungan dari type yang telah saya pilih ini dengan jenis lain adalah

- Efisiensi lebih baik disbanding dengan jenis radial
- Pressure ratio dapat dibuat lebih tinggi
- Kontruksinya lebih ringan dan ditinjau dari segi ekonomis lebih murah karena tidak membutuhkan banyak tempat.

## 2.2 Turbin Uap

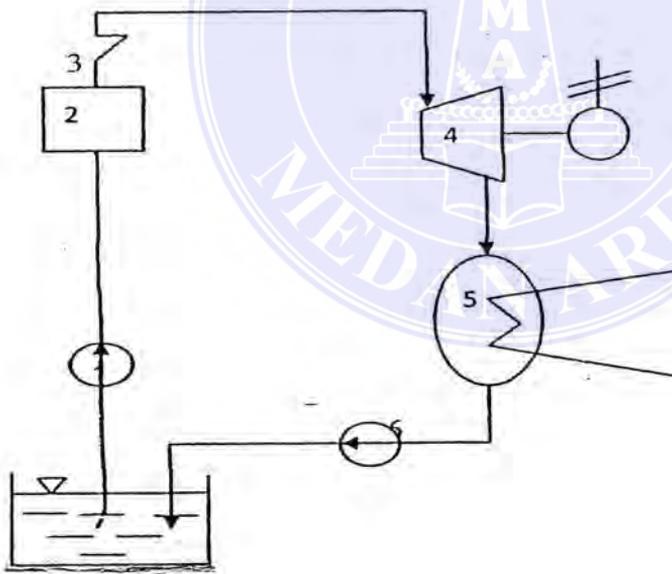
### 2.2.1 Teori Dasar

Turbin uap biasa di operasikan memakai uap panas lanjut dan memakai uap basah. Untuk dapat menentukan penghematan proses tenaga uap, selain ukuran utama turbin uap seperti misalnya diameter roda turbin, jumlah tingkatan panjang sudu dan penampang bagian – bagian yang mengantarkan uap, maka dipakai diagram perubahan keadaan uap air dalam T - s dan terutama h-s diagram [ 2 ]. Pada prinsip kedua diagram tersebut diatas sudah dikethui dari thermodinamika teknik. Untuk itu kesimpulanya akan dibahas secara singkat dengan menitik beratkan segi penggunaanya.

### 2.2.2 Bagian Proses Tenaga Uap

Dalam turbin uap energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa, batubara ( padat ), minyak ( cair ) atau gas. Adakalanya PLTU menggunakan kombinasi bahan bakar.

Konversi energi tingkat pertama yang berlangsung dalam PLTU adalah konversi energi, energi primer menjadi energi kalor ( panas ). Hal ini dilakukan didalam ruang bakar dari ketel uap PLTU. Energi panas ini kemudian dipindahkan kedalam air yang ada dalam pipa ketel untuk menghasilkan uap yang dikumpulkan dalam drum dari ketel. Uap dari drum ketel dialirkan ke turbin uap. Dalam turbin uap, energi ( entalphy ) uap di konversikan menjadi energi listrik pada generator. Seperti yang terlihat pada gambar 2.7 dibawah ini :



Gambar 2.7 Bagan proses tenaga uap: 1. Pompa pengisi air ketel, 2. Boiler, 3. Superheter, 4. Turbin uap, 5. Kondensor, 6. Pompa kondesat, 7. Reservoar air pengisi ketel.0

Proses tenaga uap dilihat dari gambar 2,6 dimulai dari proses pengisian ketel ( 1 ). disini air pengisi ketel ( boiler ) yang kebanyakan dari air kondensat yang hangat di pompakan masuk kedalam ketel ( 2 ). Dengan adanya pembakaran bahan bakar di dalam ketel, maka air di dalam ketel tersebut akan mendidih dengan kadar uap ( Kg uap/kg campuran uap dan air ) yang naik dari  $x= 0$  ke  $x=1$ . Selama proses penguapan ini temperatur campuran air dan uap adalah tetap. Besarnya temperature ini tergantung kepada tekanan dan dinamakan tetmperatur didih, sebagai contoh bila tekanan pada campuran air dan uap 0,4 bar maka temperatur didihnya  $75,9^{\circ}\text{C}$  dan untuk tekanan 1 bar harganya  $99,63^{\circ}\text{C}$  atau untuk tekanan 20 bar temperaturnya  $212^{\circ}\text{C}$ . Dietzel, F [ 3 ]

Di dalam pemanasan lanjut (3) uap panas lanjut ini dimasukan ke turbin uap (4) sebagai uap baru (uap masuk). Dan uap ini mempunyai entalpi, isi kalor  $h$ , yang besarnya bisa dilihat pada diagram  $h - s$  atau pada table uap. Didalam turbin, uap tersebut akan berekspansi. Dengan demikian akan terdapat suatu panas jatuh, selisi entalpi yang berguna  $h-h$ , sedangkan uap bekas dari turbin uap dengan entalpi  $h$  kebanyakan sudah tidak dimanfaatkan lagi, uap bekas ini dimasukan kedalam bejana tertutup yang rapat udara kondensor (5) didalam kondensor uap mengalami pendinginan dan tekanan kerendahan (kurang dari 1 atmosfer), sehingga uap mengembun menjadi air.

Bila tekanan uap lebih tinggi dari transfer, maka turbinya biasanya disebut turbin tanpa kondensasi. Air kondensat yang keluar dari kondensator (5) dipompa memakai pompa kondensat (6) dimasukan kedalam reservoir air pengisi ketel dan dari sini dipompa memakai pompa air pengisi ketel (1) dimasukan kedalam ketel

lagi, dengan demikian proses siklus ( Clausius – Rankine – Proses ) kembali diulang lagi Menurut Dietzel,F [ 3 ]

Pusat listrik tenaga uap menggunakan siklus tertutup ( closed cycly ) sehingga fluida kerja (air) dapat digunakan kembali untuk proses berikutnya. Siklus dari PLTU adalah siklus Rankine, yang modifikasinya dapat berupa superhenting, regenerative, dan reaheating.

Komponen utama siklus Rankine sederhana berupa boiler, turbin dan condensor. Daya yang dpat d bangkitkan PLTU perunitnya adalah 20 MW sampai 400 MW. Efisiensi yang dapat dicapai berkisar 34 % -- 43 %. Menurut Bahri, dkk [2]

Kelemahan dari pusat listrik jenis ini adalah :

- Investasi modal yang relative besar
- Jangka pembangunan dan pemasangan yang lama
- Memerlukan lokasi dan jumlah air yang cukup memadai
- Waktu start up relative lama
- Membutuhkan jumlah personal relative besar

Sedangkan keuntunganya adalah :

- Efisiensi relatife tinggi
- Bahan bakar yang digunakan lebih fleksibel
- Biaya bahan bakar yang dihasilkan untuk setiap KWH yang dihasilkan relative rendah

### 2.2.3 Masalah Operasional

Untuk menstart PLTU dari keadaan dingin sampai beroperasi dengan beban penuh, dibutuhkan waktu anantara 6-8 jam. Jika PLTU dihentikan dan tetapi uapnya dijaga agar tetap panas dalam drum ketel dengan cara tetap menyalakan api secukupnya dan untuk menjaga suhu dan tekanan uap ada disekitar nilai operasi, yaitu sekitar  $500^{\circ}\text{C}$  dan skitar  $100\text{Kg/C}$

maka untuk mengoperasikanya kembali diperlukan waktu selama 1 jam. Sebelumnya di start suhu turbin sama dengan suhu ruangan yaitu sekitar  $30^{\circ}\text{C}$ .

Pada waktu start, di alirkan uap dengan suhu berkisar  $500^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$ . Menurut Dietzel,F [ 3 ]. Hal ini harus dilakukan secara bertahap agar jangan sampai terjadi pemuaian yang berlebih dan tidak merata. Pemuaian yang berlebihan dapat menimbulkan tegangan mekanis (mechanical stress) yang berlebihan, sedangkan pemuaian yang tidak merata dapat menyebabkan bagian yang tidak bergerak (berputar) bergeser dangan bagian yang diam, misalnya antara sudu-sudu jalan turbin dengan sudu-sudu tetap yang menempel pada rumah turbin. Apabila turbin sedang berbeban penuh kemudian terjadi gangguan yang menyebabkan pemutusan tegangan (PMT) generator yang digerakkan turbin, maka turbin kehilangan beban mendadak. Hla ini menyebankan putaran turbin akan naik secara mendadak dan apabila hal ini tidak dihentikan, maka akan merusak bagian – bagian yang berputar pada turbin maupun generator, seperti: generator, sudu jalan turbin, dan kumparan arus searah yang ada pada generator. Untuk mencegah hal ini, aliran ke turbin harus dihentikan, yaitu dengan cara menutup katup uap ke turbin.

## 2.2.4 Pemeliharaan

Bagian – bagian PLTU yang memerlukan pemeliharaan secara periodik adalah bagian – bagian yang berhubungan dengan gas buang dan dengan air pendingin, yaitu pipa air dari ketel uap dan pipa-pipa air pendingin termasuk kondensor. Pipa – pipa ini semua memerlukan pembersihan secara periodik.

Pipa air ketel umumnya banyak abu yang menempel dan perlu dibersihkan agar proses perpindahan panas dari ruang bakar ke air melalui dinding pipa tidak terhambat. Walaupun telah ada soot blower yang dapat digunakan untuk menyemprot air pembersih pada pipa-pipa ketel, tetapi tidak semua bagian dapat terjangkau, sehingga perlu pembersihan terhadap bagian yang tidak terjangkau pada soot blower. Menurut Marsudi [ 4 ]

Saluran air pendingin, terutama jika menggunakan air laut, umumnya diempeli binatang laut yang berkembang baik dan juga ditempati kotoran air laut sehingga luas penampang efektif dari saluran menurun. Oleh karena itu, secara periodik saluran air pendingin, baik yang berupa saluran terbuka maupun pipa, perlu secara periodik dibersihkan. Pipa PLTU yang digunakan adalah yang terbuat dari tembaga dan ada yang dari titanium. Daya hantar panas tembaga lebih baik dari pada daya hantar titanium, tetapi kekuatan mekanisnya tidak sebaik titanium. Oleh karena itu bagi unit PLTU yang besar misalnya pada unit 400 MW, digunakan pipa titanium karena diperlukan pipa yang panjang, dan pada pipa titanium dinding pipa titanium lebih memerlukan perhatian dari pada tembaga. Oleh karena itu pada penggunaan pipa titanium dilengkapi dengan pipa – pipa tembaga.

Sambungan pada pipa kondensor sangat rawan dengan kebocoraan, tingkat kebocoran dapat dilihat dari daya hantar listrik air ketel. Apabila daya hantar listrik tinggi, hal ini berarti bahwa tingkat kebocoran tinggi. Semua peralatan yang ada didalam saluran gas buang perlu dibersihkan secara periodik, yaitu pemanas lanjut, economiser, dan pemanas udara.

Bagian – bagian PLTU lain yang rawan kerusakan dan perlu perhatian / pengecekan periodic adalah Menurut Marsudi [4 ]

- a. Bagian yang bergeser satu sama lain. Seperti bantalan dan roda gigi.
- b. Bagian yang mempertemukan 2 zat yang suhunya berbeda. Misalnya kebocoran kondensat dan penukar panas (heat exchanger)
- c. Kotak – kotak saluran listrik dan saklarnya.

Dalam pemeliharaan semua diatas dilakukan sekaligus sewaktu unit menjalani overhaul yang dilakukan secara periodik selama 10000 jam operasi untuk waktu kira-kira 3 minggu. Dibandingkan dengan ketel uap, turbin uap tidak banyak memerlukan waktu pemeliharaan asal kualitas uap terjaga baik. Oleh karena itu, pemeriksaan turbin uap dapat dilakukan setiap 20000 jam operasi.

### 2.2.5 Masalah Lingkungan

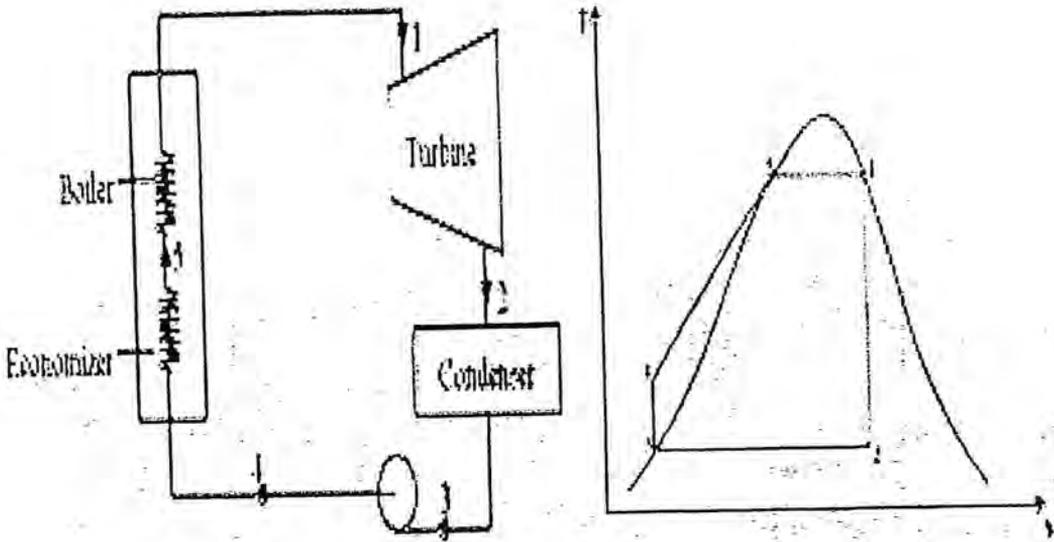
Gas buang yang keluar dari cerobong PLTU mempunyai potensial mengotori lingkungan. Oleh karena itu, ada penangkapan abu agar pengotoran lingkungan dibuat minimal. Selain abu yang halus yang ditangkap di cerobong, ada bagian-bagian abu yang relatif besar, jatuh dan ditangkap dibagian bawah ruang bakar. Abu dari PLTU, baik yang halus maupun kasar, dan dapat

dimanfaatkan untuk bahan bangunan sipil. Walaupun abunya telah ditangka. Gas buang yang keluar dari cerobong masih mengandung gas-gas yang kurang baik bagi kesehatan. Gas buang yang keluar dari cerobong masih mengandung gas yang kurang baik bagi kesehatan manusia, seperti  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , dan  $\text{CO}_2$ . Menurut Marsudi. [4].

Kadar dari gas-gas yang kurang baik ini tergantung kepada kualitas bahan bakar, khususnya batu bara yang digunakan. Bila perlu, harus dipasang alat penyaring gas-gas ini agar kadar yang masuk ke udara tidak melampaui batas yang diizinkan pemerintah.

### 2.2.6 Analisa Termodinamika Terhadap Fluida Kerja

Untuk mengetahui besarnya perubahan dari satu energi ke energi yang lainnya terutama yang terjadi pada mesin konversi energi yang dinamakan energi panas dapat merubah keadaan fluida dari cair menjadi uap dan dilakukan dengan analisa perubahan keadaan fluida kerja atau analisa termodinamika. Menurut Moran [6] Peristiwa perubahan keadaan dari fluida kerja ( air dan uap ) dalam sistem pembangkit tenaga uap dapat digunakan dan dibaca dengan siklus ideal RANKINE menggunakan diagram P-v, T – s, h-s .

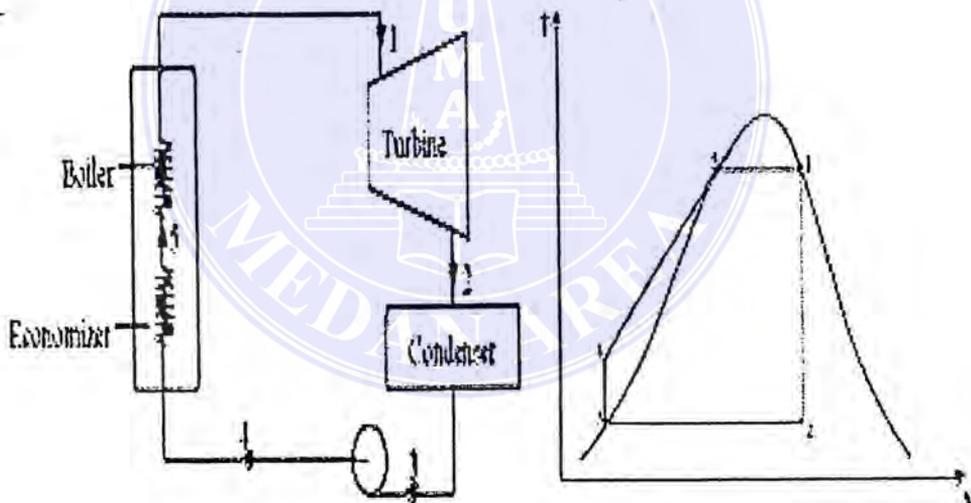


Gambar 2.8 Proses diagram alir turbin uap.

- 1-2 : Uap melakukan ekspansi dalam turbin uap secara isentropis tekanan dan temperature turbin.
- 2-3 : Proses pengembunan uap menjadi air kondensor secara isentropis dan isobar (hal ini dapat terjadi bila air yang dikondensasikan tetap mengalir)
- 3-4 : Proses pemampatan air dalam pipa secara isovolum (isovolum constant) dan isentropis (temperatur constant) tekanan air naik dari pipa  $p_3$  menjadi  $p_4$
- 4-5 : Proses pemanasan dan penguapan air menjadi uap
- 5-1 : Proses penguapan air menjadi uap secara isothermis dan isobar (hal ini dapat terjadi sebab uap yang dialirkan tetapp mengalir)

Siklus Rankine Adalah bagian dari ilmu thermodynamika yang menjadi referensi dasar untuk mengenal, memahami dan menganalisa sistem pembangkit tenaga uap. Maka tulisan ini akan mengulas tentang siklus Rankine dari siklus Rankine ideal hingga siklus Rankine yang mengalami modifikasi untuk mendapatkan efisiensi siklus yang lebih baik. Sehingga ekonomis dalam penggunaan bahan bakar. Oleh karena itu, sangat diharapkan bahwa pengertian dari siklus Rankine ini harus benar-benar dipahami oleh semua sarjana teknik secara umum.

### 1. Siklus Rankine saturasi



Gambar 2.9. Diagram Alir dan Diagram T-s Siklus Rankine Saturasi

Analisis performancenya berdasarkan thermodynamika

Keja turbin ( $W_1$ )

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/7/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber  
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)17/7/24

$$W_1 = (h_1 - h_2) \text{ (kW)} \quad (2.12)$$

Kerja Pompa ( $W_p$ )

$$W_p = V_3 (P_4 - P_3) = (h_4 - h_3) \text{ (kW)} \quad (2.13)$$

Kerja netto siklus ( $W_{\text{nett}}$ )

$$W_{\text{nett}} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3) \text{ (kW)} \quad (2.14)$$

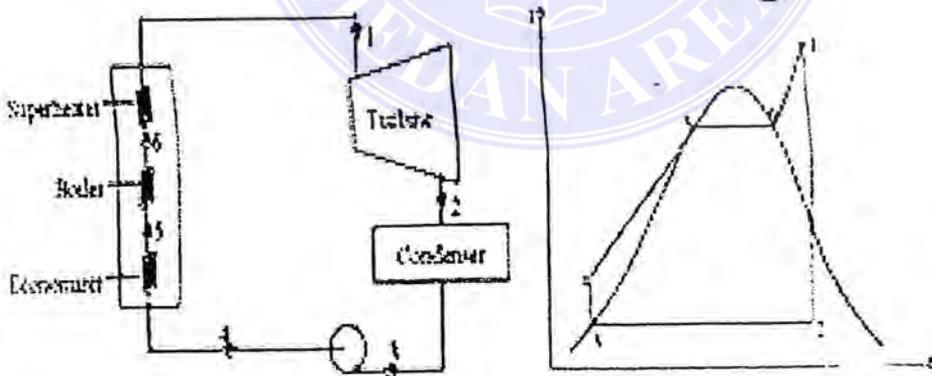
Panas Masuk ( $Q_{\text{in}}$ )

$$Q_{\text{in}} = (h_1 - h_2) \text{ (kJ/kg)} \quad (2.15)$$

Efisiensi Siklus ( $\eta_s$ )

$$\begin{aligned} \eta_s &= W_{\text{nett}} / Q_{\text{in}} \\ &= (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3) / (h_1 - h_2) \end{aligned} \quad (2.16)$$

## 2. Siklus Rankine dengan Superheter



Gambar 2.9. Diagram Alir dan Diagram T-s Siklus Rankine Superheater

Analisi performancenya berdasarkan thermodinamika

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/7/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber  
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)17/7/24

Kerja turbin ( $W_1$ )

$$W_1 = (h_1 - h_2) \text{ (kW)}$$

Kerja Pompa ( $W_p$ )

$$W_p = V_3 (P_4 - P_3) = (h_4 - h_3) \text{ (kW)}$$

Kerja netto siklus ( $W_{\text{nett}}$ )

$$W_{\text{nett}} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3) \text{ (kW)}$$

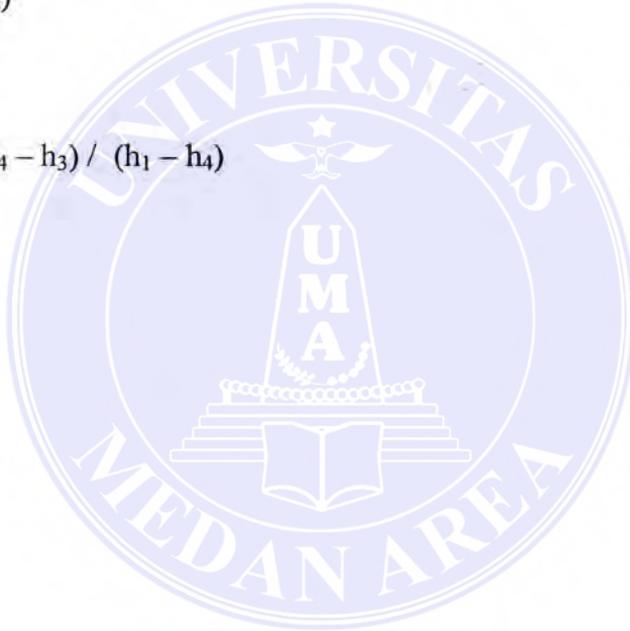
Panas Masuk ( $Q_{\text{in}}$ )

$$Q_{\text{in}} = (h_1 - h_4) \text{ (kJ/kg)}$$

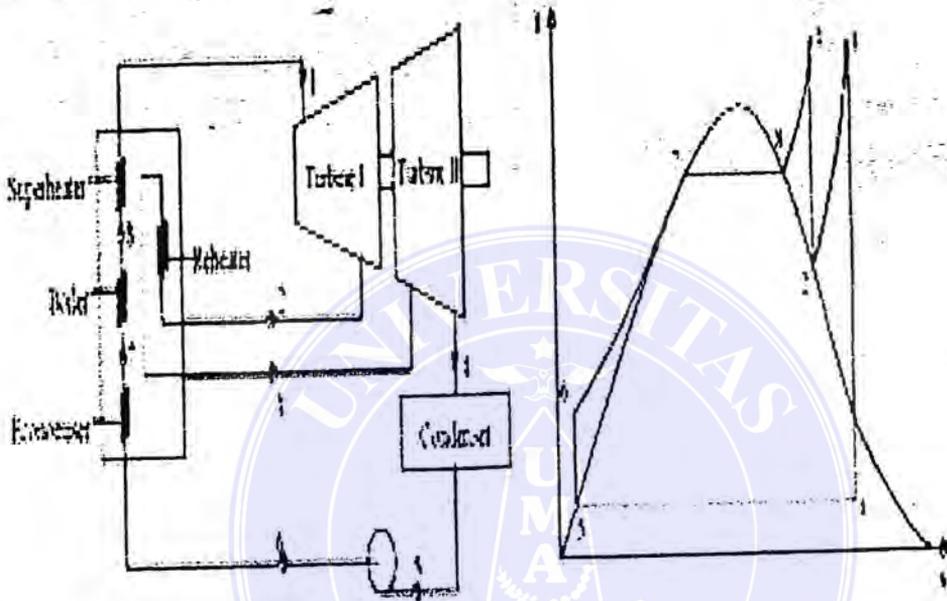
Efisiensi Siklus ( $\eta_s$ )

$$\eta_s = W_{\text{nett}} / Q_{\text{in}}$$

$$= (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3) / (h_1 - h_4)$$



### 3. Siklus Rankine dengan superheater dan Reheat



Gambar 2.10. Diagram Alir dan Diagram T – s Siklus Rankine dengan superheter dan Reheater

Analisi performancenya berdasarkan thermodinamika

Kerja turbin ( $W_1$ )

$$W_1 = (h_1 - h_2) \text{ (kW)} \quad (2. 17)$$

Kerja Pompa ( $W_p$ )

$$W_p = V_3 (P_4 - P_3) = (h_4 - h_3) \text{ (kW)} \quad (2. 18)$$

Kerja netto siklus ( $W_{\text{nett}}$ )

$$W_{\text{nett}} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3) \text{ (kW)} \quad (2. 19)$$

Panas Masuk ( $Q_{\text{in}}$ )

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/7/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber  
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)17/7/24

$$Q_{in} = (h_1 - h_2) \text{ (kJ/kg)} \quad (2.20)$$

Efisiensi Siklus ( $\eta_s$ )

$$\eta_s = W_{net} / Q_{in}$$

$$= (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5) / (h_1 - h_6) + (h_3 - h_4) \quad (2.21)$$

Turbin uap yang digunakan pada sistem pembangkit daya PLTGU belawan ini adalah turbin uap bertekanan tinggi (HP Steam turbin) yang digerakan oleh uap kering uap bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah (LP steam turbin) yang digerakan oleh uap bertekanan rendah. Uap yang bertekanan (HP superheater) bertekanan rendah (LP superheater) pada boiler.

## 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap ( PLTGU)

### 2.3.1 Teori Dasar PLGU

PLTGU merupakan kombinasi PLTG dengan PLTU. Gas buang dari PLTG yang umumnya mempunyai suhu yang sangat tinggi, dimanfaatkan (dialirkan) ke ketel uap PLTU untuk menghasilkan uap penggerak turbin uap. Dengan cara ini umumnya didapat PLTU dengan daya sebesar 50 % daya PLTG. Ketel uap yang digunakan untuk memanfaatkan gas buang PLTG mempunyai desain khusus untuk memanfaatkan gas buang dimana dalam bahasa inggris disebut Heat Recovery Steam Turbine. Marsudi [4].

Dua unit PLTG beserta 1 unit PLTU ini disebut sebagai 1 blok PLTGU. setiap unit PLTG mempunyai 1 unit penampung gas buang yang keluar dari unit PLTG. Uap dari 2 ketel uap unit PLTG kemudian ditampung dalam sebuah pipa pengumpul uap bersama yang dalam bahasa inggris disebut common steam header. Dari pipa pengumpul uap bersama, uap di alirkan ke turbin uap PLTU

yang terdiri dari turbin tekanan tinggi dan turbin tekanan rendah. Keluar dari turbin tekanan rendah, uap yang dialirkan ke kondensor untuk di embunkan. Dari kondensor, air dipompakan untuk di alirkan ke ketel uap.

HRSG dalam perkembangannya dapat terdiri dari 3 drum uap dengan tekanan uap yang berbeda tekanan tinggi (H), tekanan menengah (IP) dan tekanan rendah (LP). Hal ini didasarkan perhitungan termodinamika drum HP, IP, dan LP yang berhubungan dengan suhu gas buang yang tinggi, sedang, dan rendah. Tetapi disini hanya dipakai tekanan tinggi (HP) dan tekanan rendah (LP).

Dalam operasi unit turbin gas dapat dioperasikan terlebih dahulu untuk menghasilkan daya listrik, sementara gas buangnya untuk menghasilkan uap dalam ketel pemanfaatan gas buang kira-kira 6 jam kemudian, setelah uap dalam ketel cukup banyak, uap air dialirkan ke turbin uap untuk menghasilkan daya listrik.

Karena daya yang dihasilkan turbin uap tergantung kepada banyaknya gas buang yang dihasilkan unit PLTG, yaitu kira-kira menghasilkan 50% daya unit PLTG, maka dalam mengoperasikan PLTG, pengatur daya PLTGU dilakukan dengan mengatur daya unit PLTG, sedangkan unit PLTU mengikuti saja, menyesuaikan dengan gas buang yang diterima PLTG nya,

Perlu diingat bahwa selang waktu pemeliharaan unit PLTG lebih pendek dari unit PLTU sehingga perlu koordinasi pemeliharaan yang baik dalam suatu blok PLTGU agar daya keluar dari blok tidak terlalu banyak berubah sepanjang. Ditinjau segi efisiensi pemakaian bahan bakar, PLTGU tergolong unit yang paling efisien diantara unit-unit thermal (biasa mencapai angka 45%). Menurut Marsudi [44]

PLTGU termasuk teknologi mutakhir dengan perkembangan pusat listrik, PLTGU PLN yang pertama beroperasi di sekitar tahun 1995. Daya terpasang per blok dibatasi daya terpasang unit PLTG- nya Sampai saat ini, unit PLTG yang terbesar baru mencapai daya terpasang sekitar 120 MW.

Di dalam sistem PLTGU atau combined cycle power plant berlawanan terdiri dari 2 buah turbin gas, dan 2 buah Heater Recovery Steam Generator (HRSG) dan satu buah steam turbin dan sebuah Feed Water Tank, Menurut Marsudi [4]

Heater Recovery Steam Generator ini adalah boiler dengan tipe sirkulasi paksa yang mempunyai 2 buah steam drum, yaitu:

- Steam drum untuk high pressure system.
- Steam drum untuk low pressure system.

### 2.3.2 Daya yang dihasilkan, Randemen, Kapasitas Uap

Turbin uap dibuat dengan mempunyai daya yang telah tertentu. daya yang dihasilkan turbin diperoleh dari selisih entalpi (panas jatuh) dan kapasitas uap (masa aliran uap persatuan waktu) yang masuk kedalam turbin Diesel, f (3)

Dan pada transformasi energi di dalam turbin terjadi kerugian, hingga daya yang dihasilkan turbin dapat dihitung dari

$$P = h \cdot m_s \cdot \eta_i \cdot \eta_m \text{ dalam KW}$$

dimana:

$h$  = selisih entalpi dari ekspansi esentropika antara uap baru yang masuk ke

dalam turbin dengan uap bekas yang keluar dari turbin, dalam  $\text{Kj/Kg}$

$M$  = Kapasitas uap (masak uap yang masuk kedalam turbin persatuan waktu), dalam Kg/detik

$\eta_t$  = Randemen dalam turbin

$\eta_m$  = Randemen mekanis dari turbin

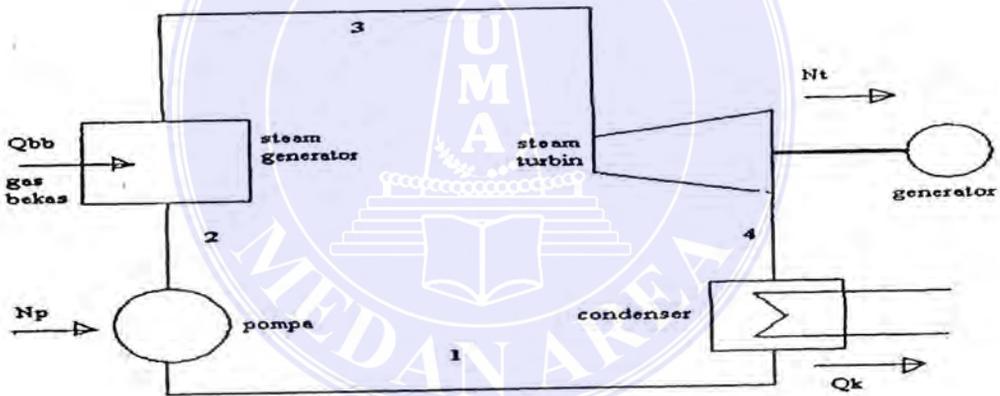
dan randemen kopling dari turbin  $\eta_i$   $\eta_m = \eta_e$

### 2.3.3 Siklus Dasar Combined cycle ( PLTGU )

Pada gambar berikut ini akan diperlihatkan kan siklus dasar combined cycle

(PLTGU)

dalam bentuk kurva temperature Vs entrophy Clausius – Rankine cycle.



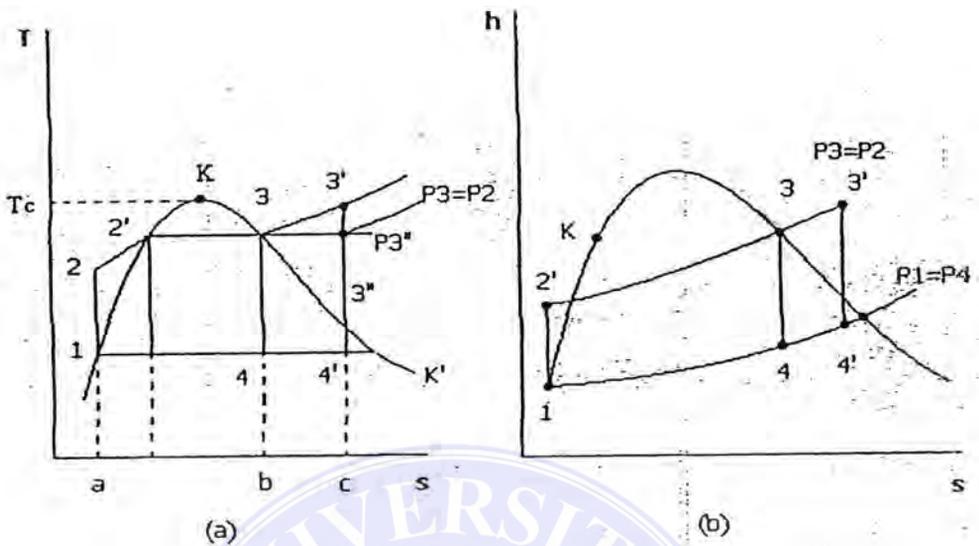
Keterangan:

$Q_{bb}$  =kalor pembakaran

$Q_k$  = kalor out put kondensor

$N_p$  =kalorinput pompa

$N_t$  =kalor out put turbin



Gambar 2.11 (a) Diagram T vs S, (b) Diagram h-s

Untuk mempertasikan proses yang terjadi dalam instalasi turbin secara ideal, dapat digunakan siklus Rankine yang digambarkan pada diagram entropi ( $s$ ) dengan temperature ( $T$ )

lihat gambar 2.11 diatas.

Proses 1-2 :

Aliran yang berasal dari kondensat (siklus tertutup) di pompakan ke dalam ketel. Proses yang terjadi dalam pompa akan menaikkan tekanan dari  $P_1$  menjadi  $P_2$  sehingga entalpi akan bertambah besar.

Proses 2-3 :

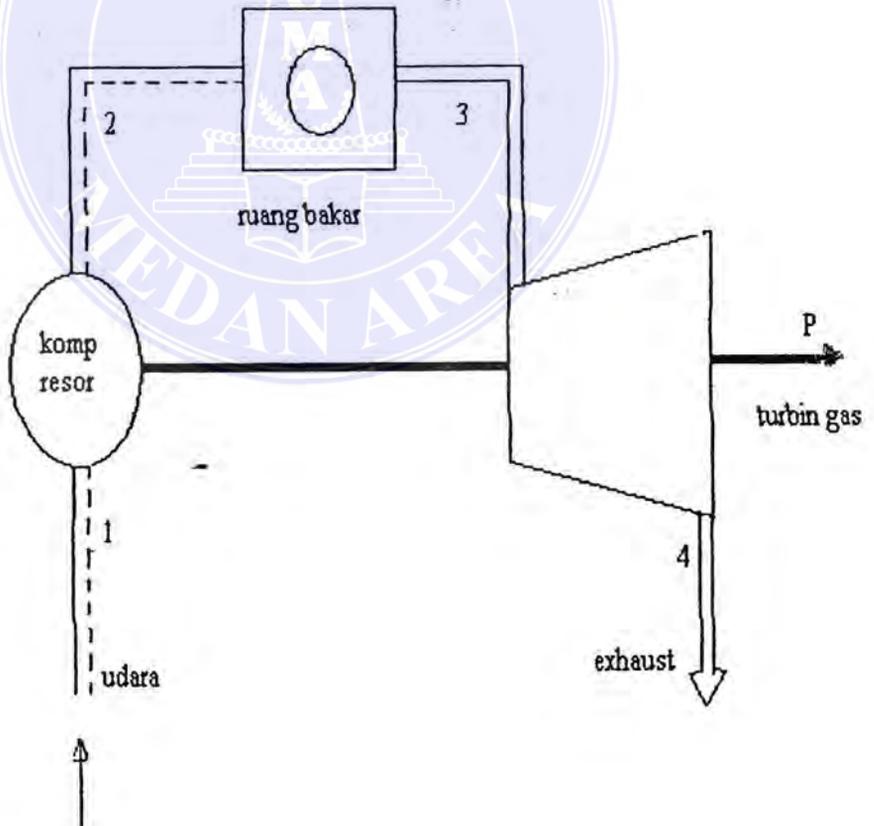
Didalam ketel, air dipanaskan hingga mencapai titik didihnya, di asumsikan proses ini terjadi pada tekanan constant.

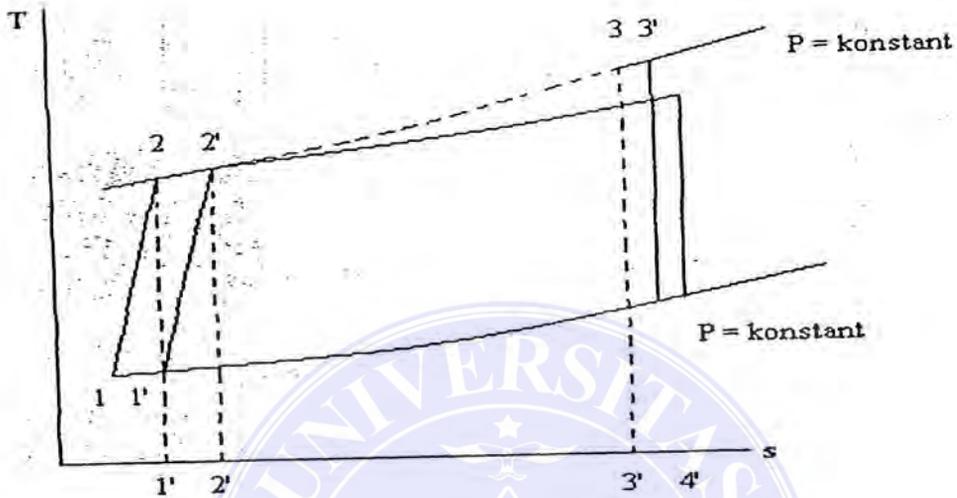
Proses 3-4 :

Dalam turbin uap, uap berekspresi melalui sudu – sudu sehingga menghasilkan energi mekanik.

Proses 4-1 :

Uap bekas keluar turbin didinginkan dalam kondensator hingga mengembun menjadi air pada tekanan constant dan selanjutnya disalurkan ke pompa.





Gambar 2.12 Sistem dan diagram T vs s Turbin gas

Langkah – langkahnya :

Proses 1-2 :

Kerja compressor mengambil udara dari atmosfer

Proses 2-3 :

Kerja penambahan panas di ruang bakar PLTGU

Proses 3-4 :

Kerja ekspansi pada sudu – sudu turbin gas yang merupakan proses untuk mengubah energi kinetik gas pada ruang bakar menjadi energi mekanik turbin.

Proses 4 :

Penolakan panas di dalam turbin

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/7/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)17/7/24

Efisiensi thermal untuk siste, PLTGU adalah :

$$\eta_{sh} = \frac{\text{Keluaran daya bermanfaat}}{\text{Energi yang dipakai}}$$

$$\eta_{sh} = \frac{W}{Q} \tag{2.23}$$

Efisiensi system kombinasi PLTG dan PLTU adalah :

$$\eta_{sh} = \frac{\left[ \begin{array}{l} \text{Keluarandaya} \\ \text{bermanfaat} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Keluarandayadarihasil} \\ \text{pemanfaatan gabungan} \end{array} \right]}{\text{Energi yang display}}$$

$$\eta_{sh} = \frac{W + W_1}{Q} \tag{2.23}$$

Dimana :

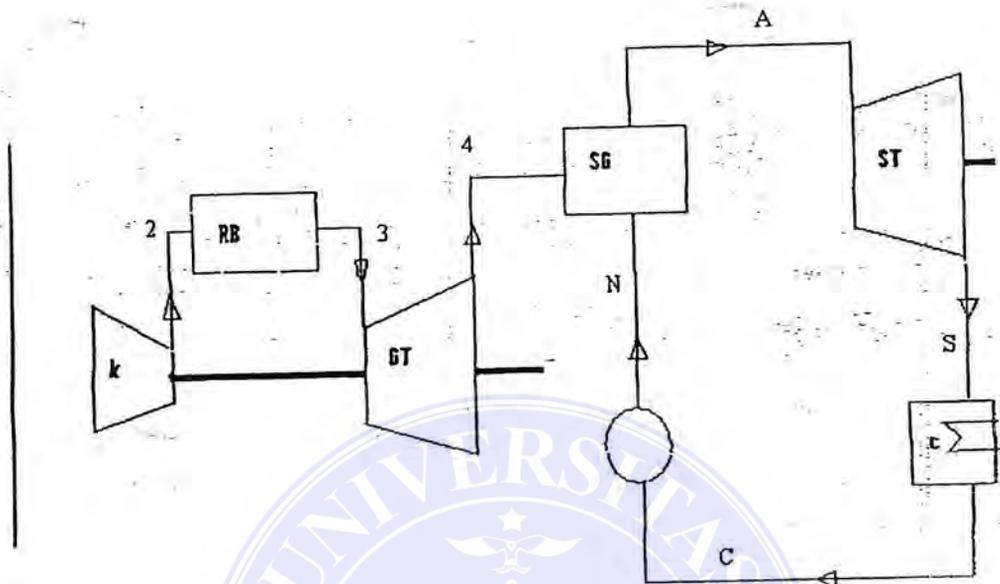
W : Keluaran Daya PLTGU (kW)

Wr : Keluaran daya PLTU dari hasil pembakaran gas buang PLTG (kW)

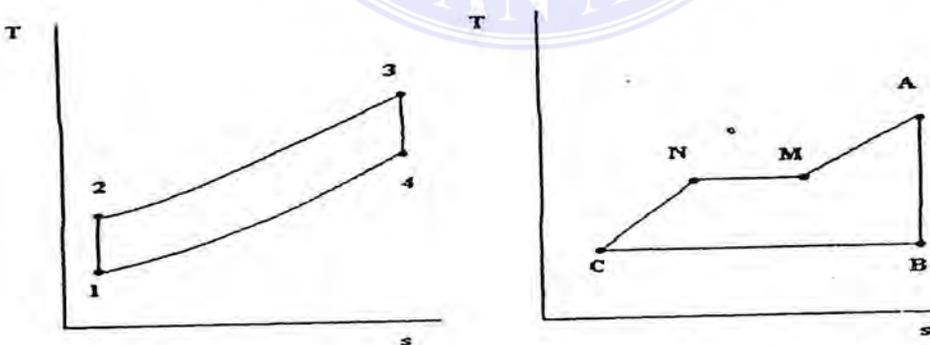
Q : Energi input dari bahan bakar ( kJ/kg)

### 2.3.4 Siklus Aktual Tekanan Combined Cycle

Dimana uap yang dihasilkan dari heat recovery steam generator(HSRG) mempunyai satu tekanan walaupun dihasilkan dari dua atau lebih. Berikut ini 2.14



Gambar 2.13 Siklus tekanan tunggal combined cycle



Gambar 2.14 Diagram T-s untuk tekanan tunggal siklus combined

**Keterangan :**

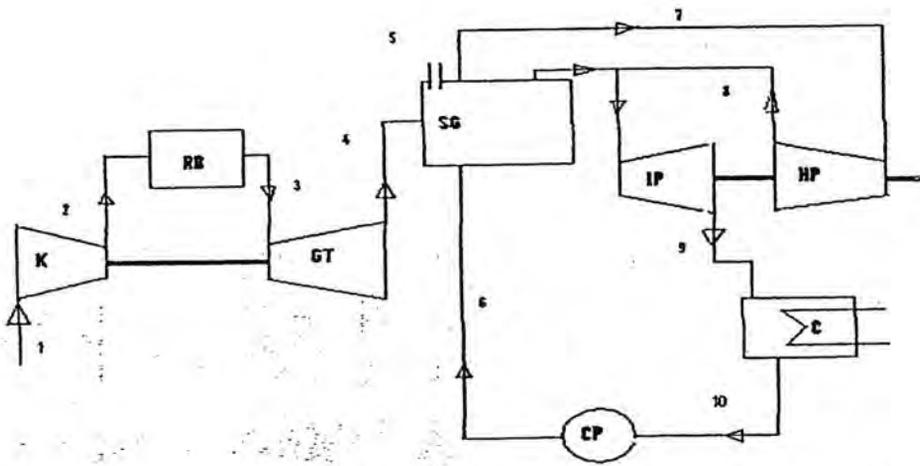
- 1-2 : Proses isentropic, dengan Tekanan berubah dari  $P_1$  menjadi  $P_2$
- 2-3 : Proses isentropic, dengan Temperatur berubah dari  $T_1$  menjadi  $T_2$
- 3-4 : Proses isentropic expansion, penurunan temperature yang terjadi di dalam Turbin.
- 4-1 : Isobarik cooling, tekanan konstan temperature turun.
- C-M-N-A : Proses isobarik, dengan perubahan air menjadi uap

disuperheater

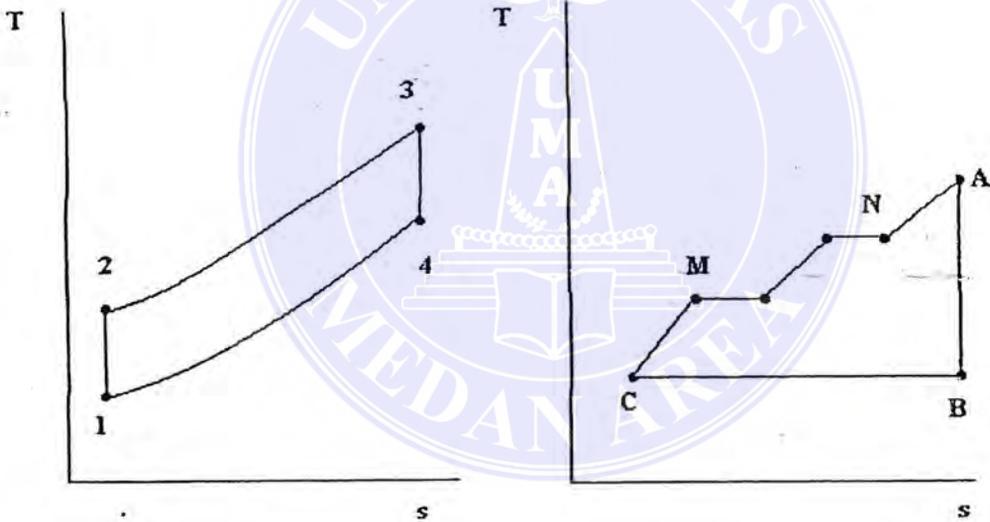
- A-B : Isentropic expansion, penurunan temperature dalam turbin.
- B-C : Isobarik condensation perubahan uap menjadi air yang terjadi di kondensator dengan tekanan constant.

**2.3.5 Siklus Aktual Tekanan Ganda Combined Cycle**

Uap yang dihasilkan dua atau lebih HRSG mempunyai tekanan ganda yang dihasilkan dua atau lebih HRSG. Tekanan yang satu dengan yang lainnya berbeda sehingga mempunyai dua sisi turbin. Berikut gambar 2.16 dibawah ini :



Gambar 2.15 Proses dua tekanan pada siklus combined



Gambar 2.16 Diagram T- s untuk proses dua tekana pada siklus combined cycle

## BAB III

### METODOLOGI PERENCANAAN

#### 3.1 Metode Perencanaan

Dalam penulisan ini metode yang digunakan adalah :

1. Studi literature: maksud dari literature ini dilakukan yaitu untuk mengupayakan konseptual teoritis dengan mendapatkan masukan – masukan berupa pengetahuan yang berhubungan dengan penulisan serta untuk memperoleh acuan pelaksanaan dari pada penulis ini. Penguatan sumber bacaan dari analisis tidak saja memfokuskan dari literature konvensional tetapi mencoba mendapatkan dari karya terbaru dari praktisi maupun penemuan di lapangan, dengan demikian hal ini akan mempertajam penganalisaan dari penulis.
2. Study lapangan/ survey : pada penulisan skripsi studi lapangan/ survey dilakukan di PLN sicanang, belawan, medan.

Dalam penulisan ini, metode yang digunakan adalah sebagai berikut :

- a. Study literature

Maksud studi literature ini dilakukan untuk mengupayakan konseptual memfokuskan dari literatur konvensional ( buku – buku lama/ handbook), tetapi mencoba mendapatkan dari karya terbaru dari praktek dilapangan, dengan demikian hal ini akan mempertajam penganalisaan penulis.

- b. Perhitungan termodinamika PLTG
- c. Perhitungan termodinamika PLTU
- d. Kesimpulan

## BAB III

### METODOLOGI PERENCANAAN

#### 3.1 Metode Perencanaan

Dalam penulisan ini metode yang digunakan adalah :

1. Studi literature: maksud dari literature ini dilakukan yaitu untuk mengupayakan konseptual teoritis dengan mendapatkan masukan – masukan berupa pengetahuan yang berhubungan dengan penulisan serta untuk memperoleh acuan pelaksanaan dari pada penulis ini. Penguatan sumber bacaan dari analisis tidak saja memfokuskan dari literature konvensional tetapi mencoba mendapatkan dari karya terbaru dari praktisi maupun penemuan di lapangan, dengan demikian hal ini akan mempertajam penganalisaan dari penulis.
2. Study lapangan/ survey : pada penulisan skripsi studi lapangan/ survey dilakukan di PLN sicanang, belawan, medan.

Dalam penulisan ini, metode yang digunakan adalah sebagai berikut :

a. Study literature

Maksud studi literature ini dilakukan untuk mengupayakan konseptual memfokuskan dari literatur konvensional ( buku – buku lama/ handbook), tetapi mencoba mendapatkan dari karya terbaru dari praktek dilapangan, dengan demikian hal ini akan mempertajam penganalisaan penulis.

b. Perhitungan termodinamika PLTG

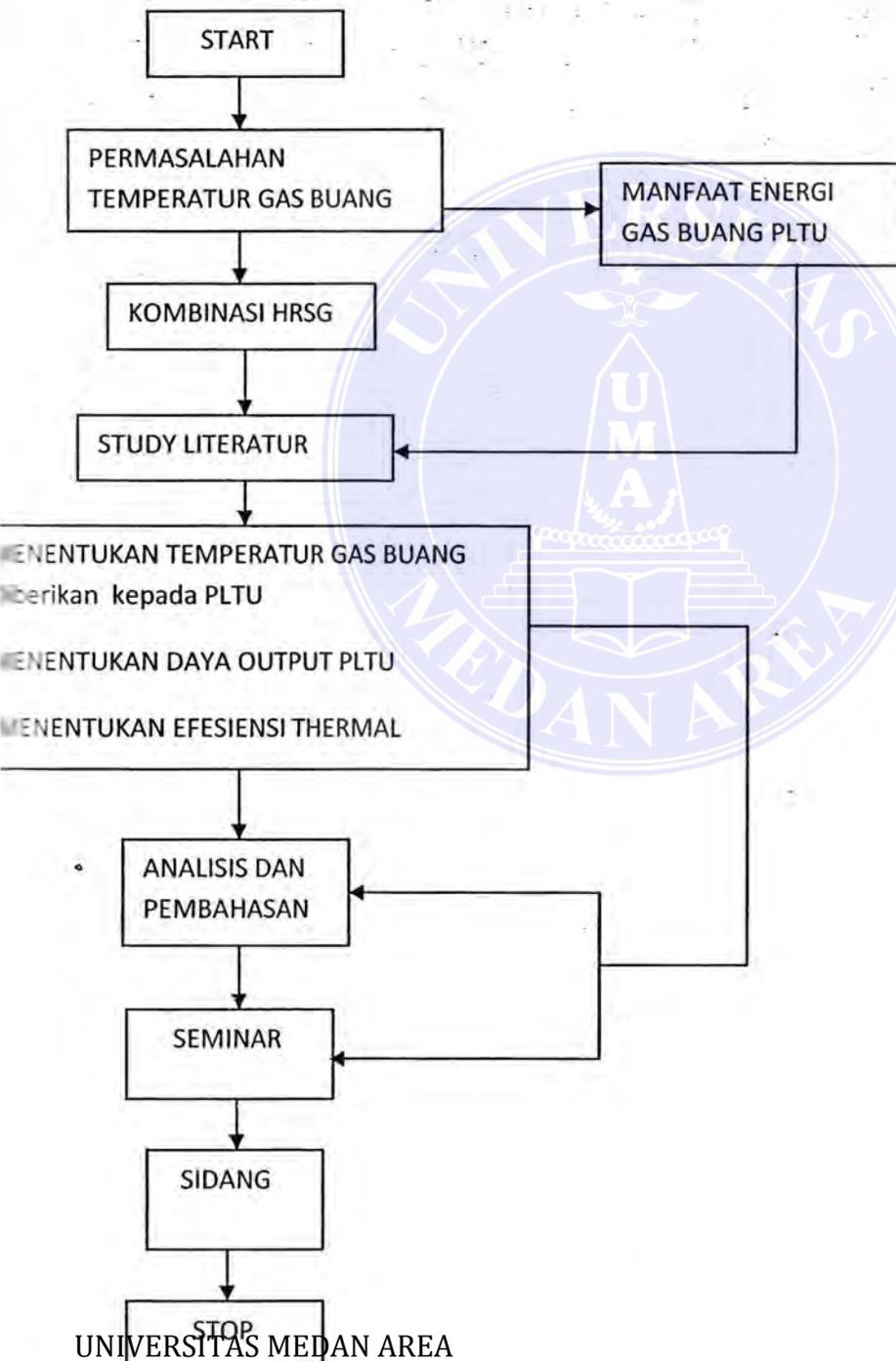
c. Perhitungan termodinamika PLTU

d. Kesimpulan

Hasil dari pengolahan data dan analisa perhitungan akan dapat membuktikan kebenaran yang telah dirumuskan dan merupakan bahan hasil penelitian

Hasil dari pengolahan data dan analisa perhitungan akan dapat membuktikan kebenaran yang telah dirumuskan dan merupakan bahan hasil penelitian

### 3.2 Diagram alir perencanaan



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Penggunaan penggabungan antara siklus brayton dan siklus rankine ini merupakan cara yang terbaik untuk penghematan energy, dimana dengan menggunakan jumlah pemakaian bahan bakar yang sama dapat meningkatkan efisiensi dari siklus ini, dan dari analisa yang telah dilakukan yang sesuai dengan tujuan dari tugas akhir ini

Dari analisa perhitungan dan survey lapangan, maka di dapat data-data sebagai berikut ;

1. Dari perencanaan di dapat Panas yang keluar dari PLTG adalah :
  - Temperature masuk turbin ( $T_3$ ) : 1002,5 °C
  - Panas masuk ( $Q_{in\ gas}$ ) : 513.790,27 kJ/s
  - Enthalpy masuk turbin ( $h_3$ ) : 1366,92 kJ/kg
  - Temperature keluar turbin ( $T_4'$ ) : 522,1 °C
  - Enthalpy keluar turbin ( $h_4'$ ) : 816,60 kJ/kg
  - Laju aliran massa campuran ( $m_c$ ) : 702,55 kg/s
  
2. Dari hasil perencanaan di dapat daya yang dihasilkan dari gas asap pada PLTU
  - Temperatur masuk turbin HP ( $T_7$ ) : 450 °C
  - Tekanan masuk turbin HP ( $P_7$ ) : 70 bar

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Penggunaan penggabungan antara siklus brayton dan siklus rankine ini merupakan cara yang terbaik untuk penghematan energy, dimana dengan menggunakan jumlah pemakaian bahan bakar yan sama dapat meningkatkan efisiensi dari siklus ini, dan dari analisa yang telah dilakukan yang sesuai dengan tujuan dari tugas akhir ini

Dari analisa perhitungan dan survey lapangan, maka di dapat data-data sebagai berikut ;

1. Dari perencanaan di dapat Panas yang keluar dari PLTG adalah :
  - Temperature masuk turbin ( $T_3$ ) : 1002,5 °C
  - Panas masuk ( $Q_{in\ gas}$ ) : 513.790,27 kJ/s
  - Enthalpy masuk turbin ( $h_3$ ) : 1366,92 kJ/kg
  - Temperature keluar turbin ( $T_4'$ ) : 522,1 °C
  - Enthalpy keluar turbin ( $h_4'$ ) : 816,60 kJ/kg
  - Laju aliran massa campuran ( $m_c$ ) : 702,55 kg/s
  
2. Dari hail perencanaan di dapat daya yang dihasilkan dari gas asap pada PLTU
  - Temperatur masuk turbin HP ( $T_7$ ) : 450 °C
  - Tekanan masuk turbin HP ( $P_7$ ) : 70 bar

- Laju aliran massa uap ( $m_v$ ) : 125,14 kg/s
- Daya turbin uap ( $N_{T_{uap}}$ ) : 146,98 MW

### 3. Efisiensi thermal dari penggabungan siklus ( combined cycle)

- Panas yang dihasilkan ruang bakar ( $Q_{in}$ ) : 513.790 kJ/s
- Daya turbin gas ( $N_{t_{gas}}$ ), untuk 2 turbin gas : 230 MW
- Daya turbin uap ( $N_{T_{uap}}$ ) : 146,98 MW
- Efisiensi turbin gas ( $\eta_{T_{gas}}$ ) : 22,4%
- Efisiensi turbin uap ( $\eta_{T_{uap}}$ ): 37,9 %
- Efisiensi PLTGU ( $\eta_{PLTGU}$ ) : 73,4 %

## 5.2 Saran

Setelah mengadakan analisa dan perhitungan pada unit PLTGU ini, maka penulis mengemukakan beberapa saran antara lain sebagai berikut ;

- Survey lapangan dilaksanakan harus rutin dan bertahap, agar akan lebih menambah wawasan dan pengetahuan bagi penulis.
- Pengambilan data bilapangan harus secermat mungkin, ini dilakukan untuk mencegah terjadinya kekeliruan dalam perhitungan.
- Pengambilan nilai-nilai konstanta dalam perhitungan harus lebih diperhatikan.
- Mengadakan perbandingan terhadap rumus-rumus yang digunakan dari beberapa literature.