

# **SKRIPSI**

## **PENJADWALAN EKONOMIS UNIT PEMBANGKIT GAS PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS UAP SENGGANG BLOK I**

Disusun dan diajukan oleh :

DEDDY HERNAWAN

D411 15 516



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

## LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### PENJADWALAN EKONOMIS UNIT PEMBANGKIT GAS PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS UAP SENKANG BLOK 1

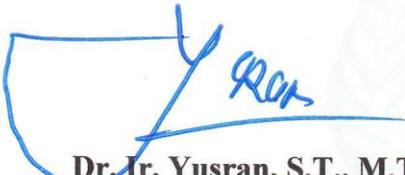
Disusun dan diajukan oleh :

**DEDDY HERNAWAN**  
**D41115516**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi. Program Sarjana Program Studi, Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada Tanggal 25 Maret 2022  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

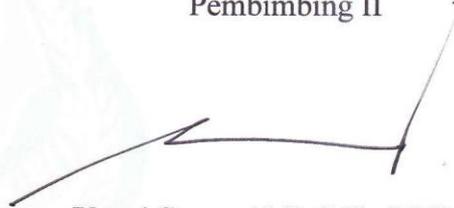
Menyetujui

Pembimbing I



**Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.**  
NIP. 19750404 200012 1 001

Pembimbing II



**Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D**  
NIP. 19770322 200501 1 001

Ketua Departemen Teknik Elektro



**Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.**  
NIP. 19691026 199412 2 001

## LEMBAR PERBAIKAN SKRIPSI

### PENJADWALAN EKONOMIS UNIT PEMBANGKIT GAS PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS UAP SENGKANG BLOK 1

Oleh:

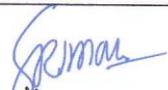
DEDDY HERNAWAN

D41115516

Skripsi ini telah dipertahankan pada Ujian Akhir Sarjana tanggal 2 Maret 2022.

Telah dilakukan perbaikan penulisan dan isi skripsi berdasarkan usulan dari penguji dan pembimbing skripsi.

Persetujuan perbaikan oleh tim penguji:

	Nama	Tanda Tangan
Ketua	Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.	
Sekretaris	Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D	
Anggota	Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T	
	Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T	

Persetujuan perbaikan oleh pembimbing:

Pembimbing	Nama	Tanda Tangan
I	Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.	
II	Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D	

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Deddy Hernawan

NIM : D41115516

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**PENJADWALAN EKONOMIS UNIT PEMBANGKIT GAS PADA  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS UAP SENKANG BLOK 1**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 19 April 2022

Yang membuat pernyataan,



Deddy Hernawan

## ABSTRAK

**DEDDY HERNAWAN.** *Penjadwalan Ekonomis Unit Pembangkit Gas Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap Sengkang Blok 1* (dibimbing oleh Yusran dan Yusri Syam Akil).

Biaya bahan bakar merupakan permasalahan yang besar untuk biaya operasi pembangkit-pembangkit termal. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu usaha untuk mengurangi biaya operasi melalui pengurangan biaya bahan bakar, sehingga menghasilkan biaya operasi pembangkit listrik yang lebih ekonomis. Penelitian ini bertujuan untuk (1) menentukan fungsi karakteristik input-output dengan aplikasi SPSS dan perhitungan manual unit pembangkit gas pada PLTGU Sengkang Blok 1, (2) menentukan penjadwalan ekonomis unit pembangkit gas PLTGU Sengkang Blok 1 untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang minimum, (3) menganalisis perbandingan biaya bahan bakar unit pembangkit gas PLTGU Sengkang Blok 1 sebelum dilakukan optimasi dan setelah dilakukan optimasi. Dalam penelitian ini, ada dua langkah dalam pencarian fungsi karakteristik input-output, yang pertama menggunakan aplikasi IBM SPSS Statistik hasilnya  $3368,835 + 157,439 P_1 + 0,019 P_1^2$  untuk unit GT 11 dan  $3479,814 + 144,633 P_2 + 0,219 P_2^2$  unit GT 12 dan yang kedua menggunakan perhitungan manual hasilnya  $3369,428 + 157,395 P_1 + 0,02 P_1^2$  unit GT 11 dan  $3479,47 + 144,558 P_2 + 0,221 P_2^2$  unit GT 12. Data input-output pembangkit gas pada tanggal 1-29 Juni 2021 digunakan untuk mendapatkan fungsi karakteristik input-output. Metode yang digunakan untuk mengoptimasi biaya bahan bakar pembangkit dalam penelitian ini adalah metode Lagrange dengan menggunakan aplikasi MATLAB. Hasil penjadwalan ekonomis selama beroperasi di tanggal 30 Juni 2021, pada jam 01:00 AM sebelum optimasi unit GT 11 membangkitkan daya lebih kecil sebesar 7,33 MW dibanding unit GT 12 sebesar 13,95 MW dengan biaya Rp. 30.924.777. Sesudah dioptimasi fungsi karakteristik *input-output* menggunakan aplikasi IBM SPSS, unit GT 11 membangkitkan daya 5 MW dan unit GT 12 sebesar 16,28 MW dengan biaya Rp. 30.881.000, maka penghematan biaya sebesar Rp 37.430 untuk fungsi karakteristik *input-output* menggunakan aplikasi IBM SPSS. Sedangkan untuk fungsi karakteristik *input-output* menggunakan perhitungan manual hasil optimasi pada jam 01:00 AM unit GT 11 membangkitkan daya 5 MW dan unit GT 12 sebesar 16,28 MW dengan biaya Rp. 30.879.000, maka penghematan biaya sebesar Rp 37.430. Hasil perbandingan biaya bahan bakar unit pembangkit gas selama beroperasi pada tanggal 30 Juni 2021, sebelum optimasi menghasilkan daya rata-rata yaitu 21,64 MW. Rata-rata total biaya bahan bakar sebelum optimasi sebesar Rp. 31.092.516/jam untuk fungsi karakteristik menggunakan aplikasi IBM SPSS dan Rp. 31.090.415/jam untuk fungsi karakteristik menggunakan perhitungan manual. Setelah optimasi didapatkan rata-rata total biaya bahan bakar sebesar Rp. 31.047.000/jam untuk fungsi karakteristik menggunakan aplikasi IBM SPSS dan Rp. 31.045.167/jam untuk fungsi karakteristik menggunakan perhitungan manual.

**Kata Kunci :** penjadwalan ekonomis, fungsi karakteristik input-output, biaya bahan bakar, metode Lagrange

## ABSTRACT

**DEDDY HERNAWAN.** *Economic Dispatch of Gas Generator Units at the Sengkang Gas Steam Power Plant Block 1* (supervised by Yusran and Yusri Syam Akil)

The cost of fuel is a big problem for the operating costs of thermal plants. Therefore, it is necessary to make an effort to reduce operating costs through reducing fuel costs, so as to produce more economical power plant operating costs. This study aims to (1) determine the input-output characteristic function with the SPSS application and manual calculation of the gas generating unit at the Sengkang PLTGU Block 1, (2) determine the economical scheduling of the Sengkang Block 1 PLTGU gas generating unit to obtain the minimum generation cost, (3) analyzes the comparison of the fuel costs of the Sengkang Block 1 PLTGU gas generator unit before and after optimization. In this study, there are two steps in finding the input-output characteristic function, the first using the IBM SPSS Statistics application, the results are  $3368,835 + 157,439 P_1 + 0,019 P_1^2$  for GT 11 units and  $3479,814 + 144,633 P_2 + 0,219 P_2^2$  for GT 12 units and the second using manual calculations the results are  $3369,428 + 157,395 P_1 + 0,02 P_1^2$  units of GT 11 and  $3479,47 + 144,558 P_2 + 0,221 P_2^2$  units of GT 12. Input-output data of gas generators on date 1-29 June 2021 is used to get the input-output characteristic function. The method used to optimize the fuel cost of the generator in this research is the Lagrange method using the MATLAB application. Economic scheduling results during operation on June 30, 2021, at 01:00 AM before optimization of the GT 11 unit generates 7,33 MW less power than the GT 12 unit of 13,95 MW at a cost of Rp. 30.924.777. After optimizing the input-output characteristic function using the IBM SPSS application, the GT 11 unit generates 5 MW of power and the GT 12 unit is 16,28 MW at a cost of Rp. 30.881.000, then the cost savings of Rp 37.430 for the input-output characteristic function using the IBM SPSS application. Meanwhile, for the input-output characteristic function using manual calculation, the optimization results at 01:00 AM GT 11 unit generates 5 MW of power and the GT 12 unit is 16,28 MW at a cost of Rp. 30.879.000, then the cost savings of Rp 37.430. The results of the comparison of fuel costs for gas generating units during operation on June 30, 2021, before optimization produced an average power of 21,64 MW. The average total cost of fuel before optimization is Rp. 31.092.516/hour for characteristic function using IBM SPSS application and Rp. 31.090.415/hour for characteristic function using manual calculation. After optimization, the average total fuel cost is Rp. 31.047.000/hour for characteristic function using IBM SPSS application and Rp. 31.045.167/hour for characteristic function using manual calculation.

**Keywords:** *economic dispatch, fuel cost, input-output characteristic function, Lagrange method*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulisan tugas akhir yang berjudul “Penjadwalan Ekonomis Unit Pembangkit Gas Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap Sengkang Blok 1” dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini menjadi syarat untuk menyelesaikan studi di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Banyak kendala yang penulis hadapi dalam penyelesaian tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, akhirnya tugas akhir ini dapat diselesaikan. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua penulis **Natan Dette** dan **Hermin Tanggo S.E**, yang tak henti-hentinya memberikan dukungan baik moril maupun materil kepada penulis.

Tidak lupa penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih sedalam-dalamnya kepada Bapak **Dr. Ir. Yusran, S.T, M.T**, selaku pembimbing I dan Bapak **Yusri Syam Akil, S.T, M.T, Ph.D**, sebagai pembimbing II sekaligus Ketua Lab Riset Pembangkitan Terdistribusi, Energi dan Lingkungan yang telah banyak meluangkan waktu, memberikan dorongan, bimbingan, arahan, dan kerjasama selama penulis menyelesaikan penulisan tugas akhir ini.

Dalam kesempatan ini pula dengan segala kerendahan hati, menyampaikan penghargaan dengan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibu **Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T**, selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin beserta seluruh staff.
2. Ibu **Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T**, Bapak **Dr. Ikhlas Kitta, S.T, M.T** selaku penguji yang telah banyak memberikan masukan serta kritik guna penyempurnaan tugas akhir ini.
3. Para dosen Teknik Elektro Unhas yang telah memberikan ilmu pengetahuan yang sangat berharga selama penulis mengikuti pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Agustinus Matongan dan seluruh pihak PT Consolidated Electric Power Asia yang telah memberi izin pengambilan data di wilayah kerjanya.

5. Adikku Devita Thalia Putri dan Dea Novalin Putri, atas segenap bantuan motivasi dan doa yang tak ternilai harganya.
6. Kekasih penulis Dielvani Theresa Djaruu, S.H, yang sangat perhatian, memberikan motivasi, semangat, dukungan dan doa yang tak ternilai harganya.
7. Kak Vikhugh Markus dan Kak Syenni Cornelia Lappy, sebagai kakak rohani yang telah banyak membimbing, memberikan nasehat, doa, serta dorongan kepada penulis.
8. Untuk Kak Enggar Widya, Kak Ferdy, Kak Erik, Roynaldo Daniel,S.T., Exalt Rivaldo Lewi,S.P., Octovian, Yizhar, Christian, atas segala bantuan, nasehat serta dorongan yang tidak henti-hentinya diberikan kepada penulis.
9. Untuk Kharis Community atas segala bantuan, nasehat serta dorongan yang tidak henti-hentinya diberikan kepada penulis.
10. Untuk Astri Wulandari,S.S., Andi Ahmad Nur Agsa,S.H., Andi Maunawan Tenrisui,S.IP., dan Muhammad Fuad,S.T., atas segala bantuan, nasehat serta dorongan yang tidak henti-hentinya diberikan kepada penulis.
11. Teman-teman seperjuangan Lab Riset Pembangkitan Terdistribusi, Energi dan Lingkungan, Muhammad Agus,S.T dan Clara Ingreastuti,S.T., terima kasih atas saran dan dukungan kalian.
12. Teman-teman seperjuangan “THR15TOR” Teknik Elektro Angkatan 2015 yang telah berjuang bersama memberi semangat dan menjadi saksi hidup perjuangan penulis menuntut ilmu di kampus merah hitam ini, kiranya kawan sejati takkan pernah pergi.
13. Saudara-saudari KMKO ELEKTROTEKNIK 2015 Unhas, serta teman-teman KMKO TEKNIK UNHAS 2015, Evander Steanly Paongan, Rayvaldo, Clara, Isty, Yuda, Suwitno, terima kasih atas dukungan, doa dan bantuan kalian.
14. Teman-teman KKN UNHAS – KKN Reguler Kabupaten Bone Gel. 102, Kec. Sibulue, Desa Balieng Toa, terima kasih untuk pengalaman baru dan perjuangannya saat KKN di Desa Balieng Toa.
15. Dan kepada semua pihak yang tidak sempat penulis sampaikan satu per satu, terimakasih atas dukungan, bantuan serta motivasi selama ini.

Semoga segala bantuan dan kebaikan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan dari Tuhan Yang Maha Esa. Akhirnya penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih sangat jauh dari kesempurnaan, sehingga saran dan kritik penulis sangat harapkan demi penyempurnaan penulisan ini.

Makassar, Maret 2022

Penulis

## DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
LEMBAR PERBAIKAN SKRIPSI	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	<b>16</b>
1.1 Latar Belakang	16
1.2 Rumusan Masalah	17
1.3 Tujuan Penelitian	18
1.4 Batasan Masalah	18
<b>BAB II DASAR TEORI</b>	<b>19</b>
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap	19
2.2 Prinsip Kerja PLTGU	19
2.2.1 Turbin Gas	20
2.2.2 <i>Heat Recovery Steam Generator (HRSG)</i>	31
2.2.3 Turbin Uap	33

2.3	Generator Sinkron	38
2.3.1	Kontruksi Generator Sinkron	39
2.3.2	Prinsip Kerja Generator Sinkron	40
2.3.3	Eksitasi	42
2.4	Sistem Tenaga Listrik	43
2.5	Operasi Ekonomis Sistem Tenaga Listrik	44
2.5.1	Biaya Operasi	44
2.6	Penjadwalan Ekonomis	46
2.7	Karakteristik <i>Input-Output</i> Pembangkit Termal	46
2.8	Fungsi Biaya Bahan Bakar	48
2.9	Metode Lagrange	49
2.10	IBM SPSS	52
2.11	MATLAB	53
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>		54
3.1	Tempat dan Waktu	54
3.2	Teknik Pengambilan Data	54
3.3	Alat dan Bahan	54
3.4	Kerangka Penelitian	55
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		56
4.1	Gambaran Umum	56
4.2	Data Masukan	56
4.1.1	Data Kapasitas Pembangkit yang Dioptimalkan	56
4.1.2	Data Beban Unit Pembangkit Gas	57

4.1.3	Data <i>Input-Output</i> Unit-Unit Pembangkit Gas	58
4.3	Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Unit Pembangkit Gas yang Dioptimalkan	62
4.3.1	Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Unit Pembangkit Gas Menggunakan IBM SPSS	62
4.3.2	Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Unit Pembangkit Gas Menggunakan Perhitungan Manual	65
4.4	Fungsi Biaya Bahan Bakar Pembangkit	67
4.5	Optimasi Biaya Bahan Bakar	68
4.5.1	Optimasi Biaya Bahan Bakar dengan Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Menggunakan Aplikasi IBM SPSS	70
4.5.2	Optimasi Biaya Bahan Bakar dengan Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Menggunakan Perhitungan Manual	72
4.6	Perbandingan Hasil Optimasi	74
4.6.1	Perbandingan Hasil Optimasi dengan Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Menggunakan Aplikasi IBM SPSS	74
4.6.2	Perbandingan Hasil Optimasi dengan Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Menggunakan Perhitungan Manual	75
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		76
5.1	Kesimpulan	76
5.2	Saran	77
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		78
<b>LAMPIRAN</b>		81

## DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1 Skema PLTGU	19
Gambar 2.2 Mesin Turbin Gas	20
Gambar 2.3 Diagram Siklus Brayton Diagram P-V & Diagram T-S	21
Gambar 2.4 <i>Lube Oil System</i>	24
Gambar 2.5 <i>Fuel Gas System</i>	25
Gambar 2.6 <i>Fuel Oil System</i>	26
Gambar 2.7 <i>Heat Recovery Steam Generator</i>	31
Gambar 2.8 Skematik Turbin Uap	34
Gambar 2.9 (A) Skematik Siklus Rankine, (B) Diagram T-s	34
Gambar 2.10 Rotor Turbin Uap	35
Gambar 2.11 <i>Casing</i> Turbin Uap	36
Gambar 2.12 <i>Casing Tipe Barrel</i>	36
Gambar 2.13 <i>Bearing</i> Turbin	37
Gambar 2.14 Kontruksi Turbo Generator	39
Gambar 2.15 Hubungan Kumparan	40
Gambar 2.16 Prinsip Kerja Generator Sinkron	41
Gambar 2.17 Sinyal 3 Fasa Generator	42
Gambar 2.18 Eksitasi Terpisah	42
Gambar 2.19 Kurva Karakteristik <i>Input-Output</i> Unit Termal	47
Gambar 2.20 N Unit Termal Bekerja Untuk Melayani Beban $P_{load}$	50

Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian	55
Gambar 4.1 Grafik Operasional Unit GT 11	60
Gambar 4.2 Grafik Operasional Unit GT 12	61
Gambar 4.3 Menu Dialog pada Halaman Pembuka Aplikasi SPSS	62
Gambar 4.4 Lembar Kerja <i>Variable View</i>	63
Gambar 4.5 Data <i>Input-Output</i> pada SPSS	63
Gambar 4.6 Menu <i>Analyze</i>	64
Gambar 4.7 Menu Dialog <i>Curve Estimation</i>	64
Gambar 4.8 Tampilan Hasil Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Pada SPSS	65
Gambar 4.9 Hasil Optimasi pada Matlab	69
Gambar 4.10 Program Optimasi pada MATLAB	69
Gambar 4.11 Perbandingan Hasil Optimasi dengan Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Menggunakan Aplikasi IBM SPSS	74
Gambar 4.12 Perbandingan Hasil Optimasi Dengan Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Menggunakan Perhitungan Manual	75

## DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 4.1 Data Kapasitas Unit-Unit Pembangkit Gas PLTGU Sengkang Blok 1	57
Tabel 4.2 Data Beban Unit Pembangkit Gas PLTGU Sengkang Blok 1 Tanggal 30 Juni 2021	57
Tabel 4.3 Data <i>Input-Output</i> Unit-Unit Pembangkit Gas Tanggal 30 Juni 2021	58
Tabel 4.4 Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Unit Pembangkit Gas Menggunakan Aplikasi SPSS	65
Tabel 4.5 Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Unit Pembangkit Gas Menggunakan Perhitungan Manual	67
Tabel 4.6 Perbedaan Hasil Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Unit Pembangkit Gas	67
Tabel 4.7 Optimasi Biaya Bahan Bakar dengan Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Menggunakan Aplikasi IBM SPSS	71
Tabel 4.8 Optimasi Biaya Bahan Bakar dengan Fungsi Karakteristik <i>Input-Output</i> Menggunakan Perhitungan Manual	72

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Seiring dengan kemajuan teknologi sekarang ini, kebutuhan akan energi listrik semakin meningkat dengan pesat. Peningkatan kebutuhan energi listrik dipengaruhi oleh banyaknya jumlah penduduk dan faktor aktivitas ekonomi pada suatu daerah. Oleh karena itu, ketersediaan energi listrik yang memadai dan tepat sasaran dapat memacu perkembangan pembangunan pada sektor industri, bisnis, pelayanan publik, serta meningkatkan kualitas hidup masyarakat yang menikmati energi listrik pada suatu daerah.

Menurut Arifin Tasrif, selaku Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, pada bulan Juni 2020 kapasitas pembangkit listrik di Indonesia mencapai 71 Giga Watt (GW). Angka tersebut naik 1,3 GW dibandingkan akhir tahun 2019 lalu sebesar 69,7 GW (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2020). Hal ini menunjukkan besarnya kebutuhan energi listrik di Indonesia. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, ada beberapa usaha yang dilakukan antara lain pembangunan pembangkit baru, pembelian listrik swasta (*independent power producer*), pengembangan pembangkit-pembangkit berbasis energi baru terbarukan (EBT), penggantian pemakaian bahan bakar serta mengoptimalkan efisiensi dan pemeliharaan pembangkit yang ada.

Salah satu akibat munculnya persoalan teknis maupun ekonomis dalam perencanaan, pengoperasian serta pengontrolan sistem tenaga listrik adalah kebutuhan daya listrik yang berubah dari waktu ke waktu. Apabila daya yang dikirim dari *bus-bus* pembangkit tenaga listrik lebih besar daripada kebutuhan daya listrik pada *bus-bus* beban, maka akan timbul pemborosan daya listrik. Sebaliknya, jika daya yang dibangkitkan lebih rendah dari kebutuhan daya listrik atau tidak memenuhi kebutuhan tersebut, maka akan timbul pemadaman lokal pada bus-bus beban listrik yang akan mengakibatkan kerugian pada konsumen.

Unit-unit pembangkit tenaga listrik tidak berada dalam jarak yang sama pada suatu wilayah dan tiap-tiap pembangkit memiliki biaya pembangkitan yang berbeda-beda. Biaya bahan bakar merupakan permasalahan yang besar untuk biaya operasi pembangkit-pembangkit termal. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu usaha untuk mengurangi biaya operasi melalui pengurangan biaya bahan bakar, sehingga menghasilkan biaya operasi pembangkit listrik yang lebih ekonomis.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Sengkang mempunyai dua blok pembangkitan blok 1 berkapasitas 135 MW dan blok 2 berkapasitas 180 MW. Masing-masing memiliki tiga unit pembangkit, terdiri dari dua unit pembangkit listrik tenaga gas dikombinasikan dengan satu unit pembangkit listrik tenaga uap. Pembangkit tersebut melayani beban yang ada pada sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan (SulbagSel). Permasalahan yang timbul adalah bagaimana cara mengatur pembebanan pembangkit listrik tersebut, sehingga biaya operasi menjadi seoptimal mungkin.

Berdasarkan uraian di atas, maka Penulis ingin meneliti mengenai penjadwalan ekonomis unit pembangkit gas pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap Sengkang blok 1. Untuk menghemat biaya bahan bakar yang digunakan, dilakukan penjadwalan yang optimal dan ekonomis antara unit-unit pembangkit listrik, sehingga daya yang dibangkitkan menjadi optimal.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana menentukan fungsi karakteristik input-output dengan aplikasi SPSS dan perhitungan manual unit pembangkit gas pada PLTGU Sengkang Blok 1?
2. Bagaimana penjadwalan ekonomis unit pembangkit gas pada PLTGU Sengkang Blok 1 untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang minimum?
3. Bagaimana perbandingan biaya bahan bakar unit pembangkit gas pada PLGU Sengkang Blok 1 sebelum dilakukan optimasi dan setelah dilakukan optimasi?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menentukan dan membandingkan fungsi karakteristik input-output dengan aplikasi SPSS dan perhitungan manual unit pembangkit gas pada PLTGU Sengkang Blok 1.
2. Menentukan penjadwalan ekonomis unit pembangkit gas PLTGU Sengkang Blok 1 untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang minimum.
3. Menganalisis perbandingan biaya bahan bakar unit pembangkit gas PLTGU Sengkang Blok 1 sebelum dilakukan optimasi dan setelah dilakukan optimasi.

### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Sistem tenaga listrik yang akan dibahas hanya pada PLTGU Sengkang Blok 1 dengan asumsi bahwa semua unit pembangkit yang ada masih bisa beroperasi normal.
2. Sistem tenaga listrik dalam kondisi normal (steady state).
3. Data yang digunakan adalah data operasional unit – unit pembangkit gas pada PLTGU Sengkang Blok 1 tiap jam selama 24 jam pada bulan Juni 2021.
4. Perhitungan dan simulasi menggunakan software IBM SPSS 25 dan MATLAB r2015a.
5. Metode yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan yaitu metode Lagrange.
6. Hal yang diperhitungkan dalam mengoptimalkan pembangkit adalah *variable cost* pembangkit terutama penggunaan biaya bahan bakar.
7. Tidak menghitung rugi-rugi.

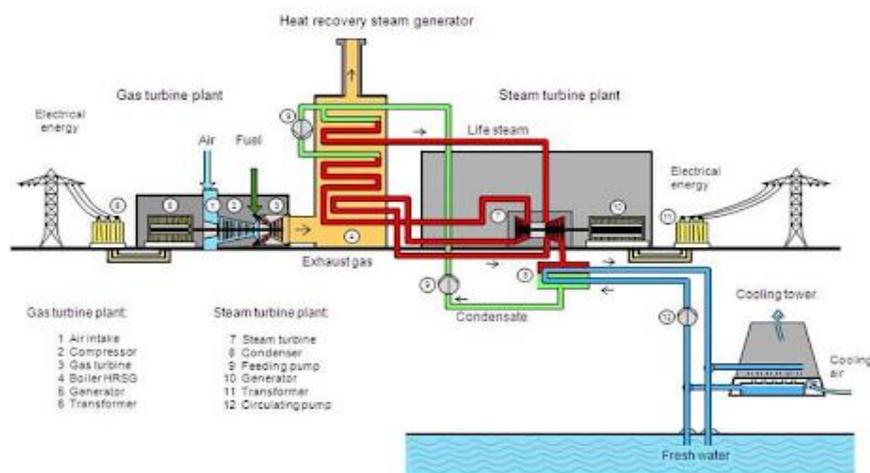
## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) merupakan pembangkit tenaga listrik yang menggabungkan antara pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) dan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). PLTGU memanfaatkan energi panas dari gas buang hasil pembakaran di PLTG untuk memanaskan air di *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG), sehingga mengubah air menjadi uap jenuh bertekanan tinggi untuk dapat memutar turbin uap pada PLTU (Ashok, 2012).

Pada PLTGU, PLTG dan PLTU saling berkombinasi sehingga disebut juga sebagai *Combined Cycle Power Plant* (CCPP) yang menggabungkan dua siklus tenaga secara seri untuk memperoleh efisiensi panas yang optimal. Siklus yang digabungkan yaitu siklus Brayton pada turbin gas dan siklus Rankine pada turbin gas uap (Ashok, 2012).



**Gambar 2.1** Skema PLTGU

Sumber : <https://rakhman.net/power-plants-id/prinsip-kerja-pltgu/>

#### 2.2 Prinsip Kerja PLTGU

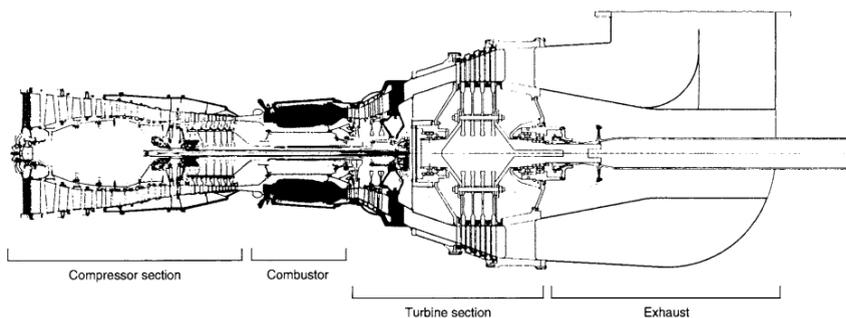
Secara umum prinsip kerja PLTGU adalah kompresor pada turbin gas menarik udara sekitar yang akan melewati sebuah *filter* untuk menghilangkan partikulat udara berukuran lebih dari 10  $\mu\text{m}$ . Bahan bakar dan udara bertekanan kemudian bercampur di ruang pembakaran (*combustor*), hasil pembakaran yang

berupa gas akan menggerakkan turbin gas yang mengkopel generator. Sisa gas panas dari turbin gas mengalir melalui *heat recovery steam generator* (HRSG). Air demineral umpan boiler (BFW) dipanaskan oleh sisa gas panas tersebut dan menghasilkan uap bertekanan (tekanan rendah, tekanan *intermediet*, dan tekanan tinggi) di HRSG yang akan memutar turbin uap (Ashok, 2012). Dari prinsip kerja di atas, diketahui bahwa PLTGU memiliki tiga komponen utama, yaitu : turbin gas (GT), *heat recovery system generator* (HRSG), dan turbin uap (ST).

### 2.2.1 Turbin Gas

Turbin gas merupakan suatu mesin jenis turbin yang beroperasi dengan gas (biasanya udara) sebagai bahan aktif. Komponen penting pada turbin gas adalah : (Avallone, 2007).

1. Kompresor yang meningkatkan tekanan udara.
2. Ruang bakar (*combustor*), dimana gas disemprotkan ke udara bertekanan sehingga terjadi pembakaran.
3. Turbin gas, memperluas gas bertemperatur tinggi hasil pembakaran *combustor*.



**Gambar 2.2** Mesin Turbin Gas

Sumber : Avallone, 2007

Turbin gas sebagai pembangkit listrik yang ideal digunakan untuk pesawat terbang serta untuk pembangkit tenaga listrik pada periode beban puncak, karena mampu di *start-up* dengan cepat, sehingga memungkinkan untuk menyediakan kebutuhan beban dengan cepat saat beban puncak. Turbin gas mampu mengikuti fluktuasi beban dengan mudah serta dapat dioperasikan dari jarak yang jauh atau

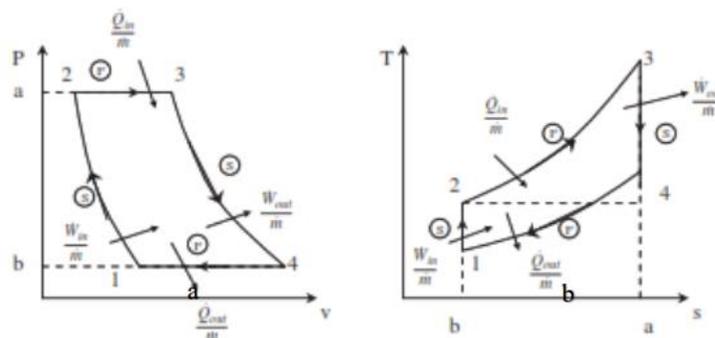
dibiarkan tanpa pengawasan. Turbin gas memiliki masa kerja yang lama, interval servis yang panjang, dan biaya perawatan yang murah (Avallone, 2007).

Kelemahan utama turbin gas adalah efisiensi siklusnya yang rendah dibanding dengan turbin lain. Kelemahan lainnya adalah ketidakcocokannya dalam penggunaan bahan bakar padat. Kombinasi antara biaya operasi murah dan efisiensi yang rendah juga menjadi alasan mengapa pembangkit listrik tenaga gas digunakan pada saat beban puncak (El-Wakil, 1988).

Turbin gas menggunakan berbagai jenis bahan bakar gas dan cair. Untuk penggunaan darat dan laut, gas alam dan minyak sulingan paling umum digunakan, tetapi batubara gasifikasi dan minyak beresidu berat juga dapat digunakan. Ketika bahan bakar yang digunakan mengandung sejumlah besar sulfur, garam, vanadium, dan logam lainnya, maka komponen panas seperti combustor dan turbin harus dirancang untuk menahan efek korosi dari *impuritie* ( Avallone, 2007).

### 2.2.1.1 Siklus Brayton

Turbin gas menggunakan prinsip termodinamika dari siklus Brayton atau disebut juga siklus Joule dalam pengoperasiannya. Keunikan dari siklus Brayton adalah proses penambahan panas dan penolakan panas terjadi pada tekanan yang konstan. Proses tersebut memungkinkan gas mengalir secara terus-menerus sehingga menghasilkan kerapatan daya yang sangat tinggi. Oleh karena itu, penggunaan turbin gas lebih disukai di pembangkit tenaga listrik dibanding dengan mesin tipe turbin jenis lainnya (Avallone, 2007).



**Gambar 2.3** Diagram Siklus Brayton *Diagram P-V & Diagram T-S*

Sumber: Sarkar, 2015

Diagram P-V dan T-S dari siklus Brayton ideal, dikenal juga sebagai siklus Joule, ditunjukkan pada Gambar 2.3. Siklus tersebut terdiri dari dua proses *isentropic* dan dua proses *isobaric*. Kompresor menarik udara disekelilingnya dan memampatkan secara *isentropic* dari posisi 1 ke posisi 2 pada tekanan P2. Kemudian udara yang ditekan menuju ke ruang *combustor* untuk dipanaskan pada tekanan yang konstan dari posisi 2 ke posisi 3. Hasil pembakaran berupa gas panas bertekanan menciptakan energi setelah melewati turbin secara isentropis dari posisi 3 ke posisi 4. Gas tersebut kemudian didinginkan dari posisi 4 ke posisi 1 pada tekanan konstan P1. Dalam siklus tertutup, pendinginan gas terjadi di dalam *heat exchanger*, tetapi dalam siklus terbuka, gas dibuang ke atmosfer (Sarkar, 2015).

Gambar 2.3 memperlihatkan bahwa proses tekanan konstan aliran stabil selama panas ditransfer tidak lagi diproses pada suhu konstan. Oleh karena itu, efisiensi ideal siklus Brayton harus jauh lebih kecil daripada efisiensi siklus Carnot berdasarkan pada suhu maksimum dan minimum siklus (Sarkar, 2015).

### **2.2.1.2 Sistem dan Peralatan Turbin Gas**

Berdasarkan pada ukuran, lokasi pemasangan, lingkungan operasi dan desainnya, unit turbin gas dapat mencakup sebagian atau keseluruhan komponen turbin gas sebagai berikut : (Sarkar, 2015)

#### **a. Air Intake System**

*Air Intake System* biasanya terdiri dari *air cleaning filter housing*, *silencer*, *expansion joint*, *inlet manifold*, dan lain-lain, yang berfungsi menghisap udara menuju kompresor turbin. *Filter* pada *air intake system* mencegah pengotoran kompresor, terjadinya erosi, dan kerusakan fisik pada bilah kompresor akibat jumlah kotoran udaran serta kontaminan lain berukuran 25-30 mikron. Kotoran yang tersaring pada *filter* dibersihkan dengan menyemprotkan udara bertekanan yang berlawanan arah dengan masuknya udara pada *filter*.

**b. *Anti-Icing System***

*Anti-icing system* mencegah pembentukan es didalam *air intake system* dan pada bilah kompresor ketika suhu udara sekitar turun di bawah suhu rendah, seperti 1280 K, sedangkan kelembapan relatif pada 70 % atau di atasnya. Sistem ini menghangatkan udara yang masuk pada kompresor dengan cara mengalirkan udara panas dari *compressor exhaust*, kemudian udara panas tersebut tercampur dengan udara yang masuk dari *air intake*.

**c. *Evaporative Cooling System***

*Evaporative Cooling System* digunakan untuk meningkatkan efisiensi *output* daya dan efisiensi unit turbin gas. *Output* daya dan tingkat efisiensi turbin gas biasanya berdasarkan oleh aturan ISO (suhu udara yang masuk 288 K (14,85°C dan kelembapan relatif 65%). Jika udara yang masuk lebih panas dan lebih kering dari ketentuan ISO, maka daya turbin gas akan berkurang. Tujuan dari *evaporative system* adalah untuk mendinginkan udara yang masuk menggunakan air, dimana energi evaporasi dari air akan mengurangi entalpi udara yang mengakibatkan bertambahnya massa aliran udara menuju kompresor.

**d. *Exhaust System***

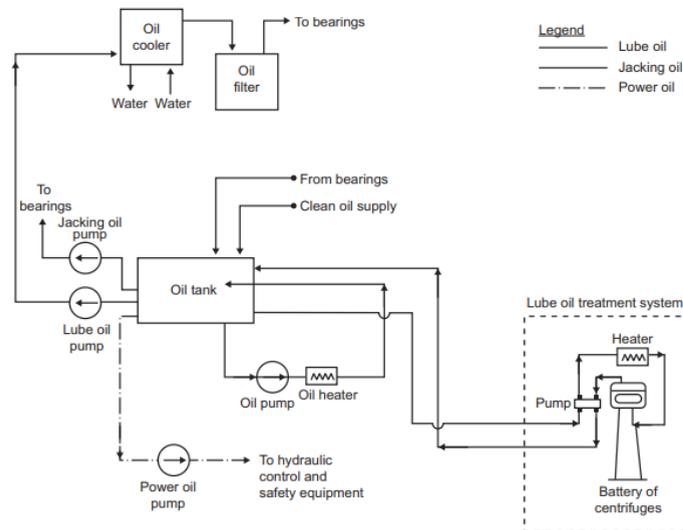
Gas sisa turbin gas dibuang ke atmosfer melalui *stack*. Gas melewati *silencer* untuk mengecilkan suara gas buang sebelum dilepaskan. Dalam sistem *combined cycle*, gas sisa dari turbin gas tidak dibuang tetapi diteruskan menuju HRSG untuk digunakan memanaskan air pada PLTU.

**e. *Starting System***

Sebelum memasukkan bahan bakar ke dalam *combustor*, turbin gas harus dihidupkan dengan *start-up device*. *Start-up device* ini dapat berupa motor AC, mesin diesel, atau *static starting device*. Dengan bantuan dari *start-up device*, turbin gas diakselerasi untuk mencapai kecepatan dimana igniter dapat bekerja. Setelah pembakaran pada *combustor* mulai stabil, turbin gas berakselerasi lebih cepat, melebihi *self-sustaining speed*, sehingga mengakibatkan *start-up device* terputus

secara otomatis dan *turbine governor* mengambil alih untuk mempercepat putaran unit turbin gas hingga mencapai kecepatan sinkronnya.

**f. Lubrication and Power Oil System**



**Gambar 2.4** *Lube Oil System*  
 Sumber : Sarkar, 2015

*Lubrication and power oil system* disediakan untuk memenuhi kebutuhan pelumasan bearings turbin gas, *compressor bearings*, *generator bearings*, *thrust bearings*, dan lain-lain. Dan berdasarkan pada desain peralatan, sebagian cairan yang digunakan diatur oleh *hydraulic control devices*. Oli pelumas disimpan dalam sebuah tangki yang dilengkapi pemanas untuk menjaga suhu minimum oli pelumas, sehingga digunakan kembali ketika pengoperasian berhenti dalam waktu yang panjang.

Selama operasi, *lube oil pump* memompa oli dari tangki oli dan mengedarkan oli pelumas melalui *filter* ke *bearings* dan komponen lainnya. Setelah melumasi *bearings*, oli mengalir melalui berbagai saluran pembuangan ke tangka oli. Oli pelumas juga diedarkan melalui *lube oil coolers* untuk menjaga temperatur oli dalam kisaran yang telah ditentukan sebelumnya.

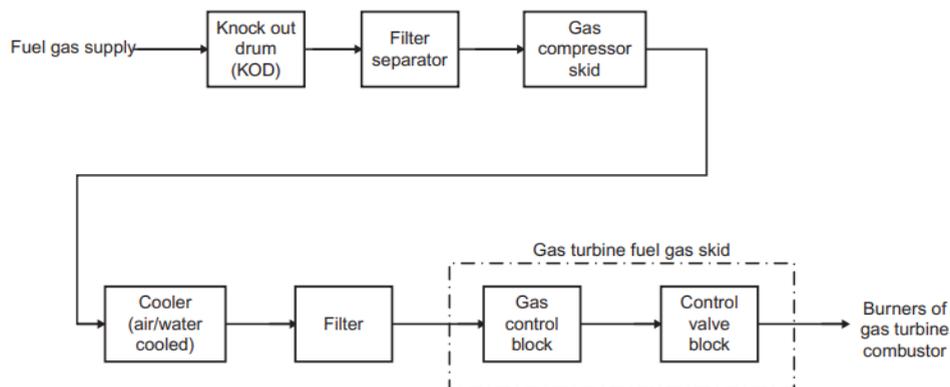
Oli pelumas juga disuplai ke *bearings* untuk *lifting* turbin dan rotor generator selama operasi *start-up* atau rotor barring untuk mencegah keausan pada

bearings dan mengurangi torsi awal yang diperlukan. Sistem ini disebut sebagai *jacking oil system*. *Separate pump* digunakan untuk memasok oli daya ke *hydraulic control* turbin gas dan *safety equipment*. *Lube oil treatment system* digunakan untuk membersihkan oli yang bersirkulasi pada pelumasan turbin gas dan *power 22 oil system*. Oli diambil oleh pompa dari tangki oli, dan setelah selesai *trearment oil* yang diinginkan, dikembalikan ke tangki oli.

#### g. *Hydraulic and Pneumatic Control System*

Sistem ini merupakan tulang punggung sistem kontrol dan proteksi dari turbin gas yang memastikan operasi aman, efisien, dan bebas masalah. *Hydraulic protection system* melindungi turbin gas dari kerusakan serius jika terjadi kegagalan sistem kontrol. *Hydraulic control system* mengoperasikan mekanisme *inlet guide vane* dan *fuel regulation system*. *Pneumatic control system* mengendalikan *blow-off valves*.

#### h. *Fuel Gas System*



**Gambar 2.5** *Fuel Gas System*

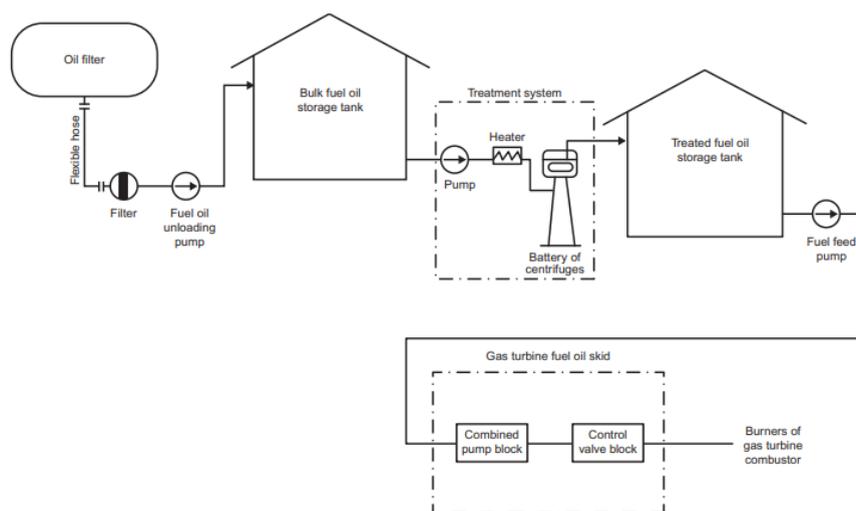
Sumber : Sarkar, 2015

Sebelum memasok bahan bakar ke *combustor*, bahan bakar diolah terlebih dahulu dalam *knock-out drum* (KOD) diikuti oleh unit *filter* separator untuk memisahkan seluruh zat padat dan cairan. Setelah itu, bahan bakar memasuki kompresor *booster* yang akan meningkatkan tekanan gas sesuai tekanan yang

dibutuhkan oleh turbin gas. Selanjutnya bahan bakar dikirim ke pendingin gas untuk membatasi temperatur *flue-gas* sesuai dengan kebutuhan turbin gas.

Bahan bakar yang sudah didinginkan, kemudian melewati *filter* lain untuk menghilangkan segala jenis cairan yang terkondensasi setelah pendinginan sebelum memasuki *fuel gas skid* dari turbin gas. Bahan bakar gas mengalir ke *combustor* ketika katup gas utama dan katup gas pembakaran dibuka. Selama *start-up*, katup gas *pilot* terbuka untuk pembakaran. Ketika gas dibakar, katup gas utama terbuka secara bertahap dan katup kontrol *pilot* ditutup, dengan demikian beban pada mesin dapat dipertahankan. Selama turbo *shutdown*, katup kontrol utama dan *pilot* tertutup.

#### i. Fuel Oil System



**Gambar 2.6** Fuel Oil System

Sumber : Sarkar, 2015

Bahan bakar minyak yang diterima dari kilang minyak diisi di tangki penyimpanan bahan bakar minyak. *Fuel Oil Treatment* terdapat di dekat tangki penyimpanan untuk menghilangkan zat yang larut dalam air seperti garam natrium ( $\text{Na}^+$ ) dan kalium ( $\text{K}^+$ ) dalam bahan bakar minyak ke tingkat yang sama atau lebih baik dari sesuai untuk operasi turbin gas.

*Fuel oil pump* meneruskan bahan bakar ke *combustor* untuk atomisasi pada tekanan yang sesuai standar pembakaran. Bahan bakar disuplai ke *combustor*

hanya jika katup pemutus oli utama dibuka. Katup kontrol pembakar kemudian dibuka secara bertahap untuk pembakaran dan setelah itu dibuka lagi sesuai kebutuhan beban. Selama mematikan peralatan, semua katup *control* dan katup pemutus ditutup.

**j. *Water Injection System***

Air dicampurkan dengan bahan bakar minyak, terutama untuk mengurangi emisi NOx. Pencampuran juga meningkatkan daya keluaran dari mesin.

**k. *Gas Turbine Governing System***

Sistem ini mengatur aliran bahan bakar ke turbin gas untuk memastikan kelancaran start-up dan mengatur bahan bakar dengan *temperature* tinggi mulai dari kondisi turbin dengan putaran minimum hingga operasi beban puncak dalam parameter operasi yang aman. *Governing system* melakukan fungsi kontrol dasar berikut :

**1. *Start-Up Control***

Fungsi kontrol ini mengatur aliran bahan bakar ke turbin gas selama *start-up* dari *turbo-set* hingga mencapai kecepatan nominalnya. Berfungsi juga mengontrol rasio *fuel-air* sehingga temperatur *outlet* gas tidak melebihi batas yang ditentukan saat kecepatan maksimum. Setelah kecepatan turbin sesuai dengan frekuensi jaringan, unit dipersiapkan untuk disinkronkan dengan jaringan yang ada.

**2. *Frequency / Load Control***

Kontroller frekuensi/beban bekerja saat kondisi idling, sinkronisasi, dan kondisi operasi normal. Setelah turbin berputar pada kecepatan operasinya, mode kontrol start-up beralih ke mode kontrol frekuensi/beban. Kontroler ini mendapatkan set point untuk beban turbin dari output pengontrol frekuensi. Bahan bakar yang mengalir kemudian dikontrol untuk membangkitkan daya yang diinginkan.

### **3. *Firing Temperature Control***

Kontroler temperatur mengatur laju aliran bahan bakar selama tahapan akselerasi turbin agar turbin tidak mengalami kondisi suhu berlebih. Kontroler ini memantau suhu masuk dan keluar dari turbin untuk mengontrol aliran bahan bakar gas, serta menjaga bahan bakar minimum yang mengalir ke *combustor* sehingga tidak terjadi ledakan di *combustor* yang bisa menyebabkan trip pada pembangkit.

### **4. *Emergency Shut-Down Control***

Kontroler ini melindungi turbin gas dari kerusakan serius ketika terjadi kegagalan sistem kontrol.

#### **1. *Firefighting System***

Pada setiap tempat di pembangkit, sangat rawan terjadi kebakaran yang disebabkan oleh hubung singkat atau penyalaan bahan bakar, dan pelumas atau bahan yang mudah terbakar, misalnya kertas, limbah kapas, dan lain-lain. Sejumlah alat pemadam kebakaran jenis soda-asam portabel/semi-portabel disediakan di berbagai tempat untuk memadamkan kebakaran kecil yang telah terdeteksi. Kebakaran kecil juga dapat berhasil dipadamkan dengan menggunakan pasir sebab air tidak sesuai untuk memadamkan air pada oli. Alat pemadam api karbon dioksida digunakan untuk memadamkan kebakaran listrik. Jika terjadi kebakaran besar, alat pemadam portabel/semi portabel tidak efektif digunakan.

#### **m. *Compressor unit***

Kompresor udara yang digunakan pada turbin gas terdiri dari beberapa baris bilah yang menghasilkan rasio kompresi tinggi dan memastikan pasokan udara yang memadai untuk *combustor*. Udara bertekanan tinggi ditarik dari kompresor dan diarahkan ke bagian dalam jalur gas panas di zona turbin untuk mendinginkan zona itu. Kompresor aliran aksial digunakan di semua unit turbin gas yang lebih besar karena efisiensi tinggi dan kapasitas.

Kompresor sentrifugal lebih stabil daripada kompresor aliran aksial tetapi kapasitasnya jauh lebih rendah dan tidak seefisien. Kompresor aksial mengalami masalah lonjakan saat *start-up*, beban rendah, dan kecepatan rendah. Kompresor aksial yang digunakan dalam pembangkit listrik turbin gas harus dirancang untuk menghindari operasi di wilayah ketidakstabilan tersebut yang dapat merusak peralatan. Untuk menghindari kondisi ketidakstabilan pada kompresor, ada beberapa metode yang digunakan, metode *inter-stage bleed*, *discharge bleed*, *variable compressor inlet vanes*, *turbine variable vanes*, dan *bypass* untuk memastikan *start* yang cepat dan mulus serta *low-load operation* pada turbin gas.

#### **n. *Combustion components***

Sistem pembakaran terdiri dari *combustor*, *burners*, *igniter*, dan *flame monitors*. *Combustor* harus menghasilkan gas dengan suhu yang terkontrol dengan rugi tekanan seminimum mungkin. Masalah utama 28 desain *combustor*, selain pembakaran yang bersih dan pencampuran gas yang tepat adalah stabilisasi api, penghapusan pulsasi dan kebisingan, pengurangan kehilangan tekanan, dan pemeliharaan stabil, suhu keluaran yang dikontrol dengan ketat.

*Combustor* ditempatkan di antara turbin dan kompresor. Itu adalah pemanas langsung dimana bahan bakar dibakar untuk memasok energi panas ke turbin gas. Udara mengalir melalui *combustor* memiliki tiga fungsi, yaitu : untuk mengoksidasi bahan bakar, untuk mendinginkan bagian logam, dan untuk menyesuaikan temperatur keluaran agar sesuai dengan kebutuhan temperatur *inlet* turbin. Temperatur gas di *combustor* dan masuk ke turbin dapat mencapai 1623 K (1349,85 °C) atau lebih.

Bahan bakar gas dimasukkan langsung ke setiap *burner* dan bercampur dengan udara. Ketika bahan bakar cair digunakan, maka bahan tersebut dikabutkan di nosel menggunakan udara bertekanan tinggi. Campuran bahan bakar kemudian disemprotkan ke *combustor*. *Igniter* digunakan untuk memantikkan api saat *start-up* turbin gas. Ketika *igniter* bekerja maka akan timbul api pada campuran bahan bakar dan udara.

#### **o. *Turbine Section***

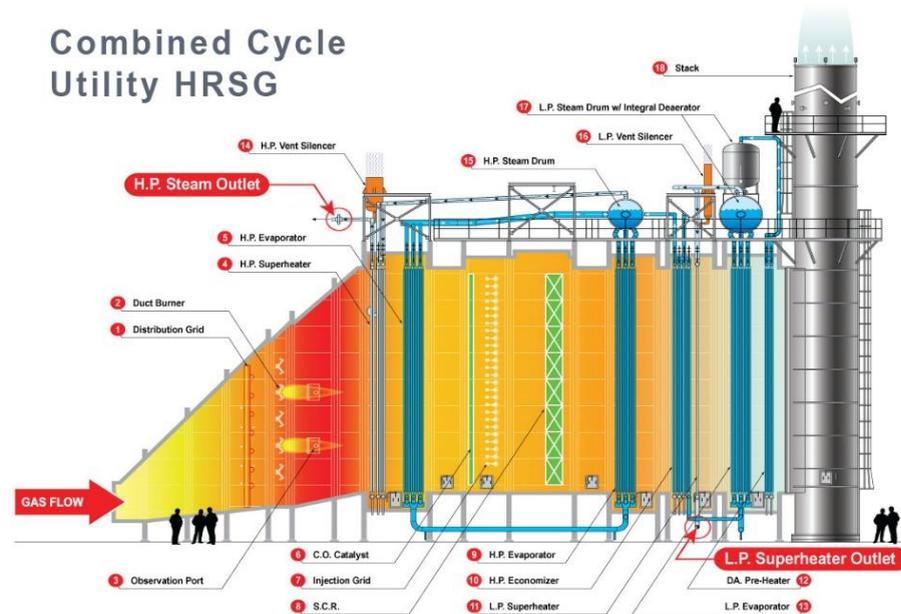
Daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor dan komponen pendukung lainnya disuplai oleh rotor turbin. Turbin di pembangkit turbin gas merupakan tipe aliran aksial, kecuali pada turbin dengan kapasitas kecil menggunakan turbin aliran radial. Turbin gas 29 mampu memulai dan memuat dengan cepat dan tidak memiliki kerugian pada saat *stand-by*.

Turbin gas biasanya mampu menembakkan bahan bakar gas dan bahan bakar minyak. Ketika keadaan turbin diam *variable inlet guide vanes* berada pada posisi tertutup dan ketika *start-up* udara disekitar mulai dihisap, kemudian udara disaring dan dikompresi dalam kompresor. Untuk mencapai efisiensi optimal dengan emisi minimum, aliran udara dikendalikan oleh *variable inlet guide vanes*.

Komponen utama dari turbin gas sebagai berikut :

1. Rotor.
2. *Journal and thrust bearings*.
3. *Turbine blades and vanes*.
4. *Air-cooling system for hot gas path components*.
5. *Turbine and compressor casing*.
6. *Compressor blades and vanes*.
7. *Compressor inlet variable guide vanes*.
8. *Air intake manifold*.
9. *Compressor intake housing*.
10. *Exhaust diffuser*.
11. *Burners*.

## 2.2.2 Heat Recovery Steam Generator (HRSG)



**Gambar 2.7** Heat Recovery Steam Generator

Sumber : <https://wbsakti.wordpress.com/2012/11/22/heat-recovery-steam-generator-hrsg/>

*Heat recovery steam generator* (HRSG) atau *waste heat recovery boiler* (WHRB) merupakan sebuah boiler tanpa ruang bakar. HRSG dirancang untuk memanfaatkan kembali sisa gas panas, terutama pada pembangkit *combined cycle*. Kombinasi ini menghasilkan listrik lebih efisien daripada turbin gas atau turbin uap saja. HRSG juga merupakan komponen penting dalam pembangkit *cogeneration*. Dimana HRSG memasok setidaknya sebagian dari proses penguapan, aplikasi ini disebut sebagai *co-generation* (Sarkar, 2015).

HRSG seperti boiler yang berisi *evaporator* dengan drum untuk memanaskan air menjadi uap jenuh. Setelah itu, uap jenuh tersebut dipanaskan di bagian *superheater* menjadi uap *superheated*. Untuk menggunakan energi tingkat rendah secara efektif, HRSG menggunakan sebuah *preheating* untuk memanfaatkan gas *lowest-grade* (temperatur) untuk memanaskan *preheat feedwater*, yang akan menjalani pemanasan lebih lanjut pada bagian *economizer*. HRSG terdiri dari empat komponen utama : *water preheater*, *economizer*, *evaporator* ( dengan drum ), dan *superheater* (Wang and Gary Stiegel, 2017).

HRSG dapat dirancang dengan satu hingga empat sirkuit tekanan operasi terpisah untuk mengoptimalkan panas dan efisiensi siklus. Uap bertekanan rendah

dapat digunakan dalam *deaeration* dan *feedwater heating*, sehingga menghindari regeneratif ekstraksi uap dalam *feedwater heating* yang menggunakan siklus pembangkit listrik konvensional. *Exhaust* turbin gas memasok panas yang cocok dan oksigen ke tungku pembangkit uap (Sarkar, 2015)

Gas keluaran turbin gas terdiri 16-18% oksigen, oksigen ini dapat digunakan untuk sistem pembakaran tambahan (*duct burners*) yang dipasang di hulu HRSG, pembakaran tambahan tersebut memberikan energi tambahan ke HRSG yang menghasilkan lebih banyak uap. Hal tersebut juga memungkinkan fleksibilitas operasi yang lebih besar, kontrol temperatur uap yang lebih baik, serta output daya yang lebih tinggi. Secara umum *duct firing* menghasilkan output listrik dengan biaya modal yang lebih rendah dibandingkan dengan generasi *combined cycle*. Oleh karena itu, sering digunakan ketika beban puncak (Sarkar, 2015)

#### **2.2.2.1 Prinsip Kerja HRSG**

Laju aliran *exhaust* turbin yang tinggi pada suhu tinggi menghasilkan sejumlah besar energi untuk *bottoming cycle*. Kunci kemampuan HRSG secara efektif menangkap limbah panas pada *cycle topping* sebagai *exhaust energy* yang telah meningkat karena adanya penambahan tingkat tekanan didalam HRSG. Gambar 2.7 menunjukkan profil suhu tipikal dari *exhaust* turbin gas dan fluida kerja *water-steam* di dalam HRSG. Tingkat tekanan tunggal yang terdiri dari *economizer*, bagian *evaporator*, dan *superheater* (Erikson, 2017).

*Feedwater* memasuki *economizer* dan dipanaskan oleh gas keluaran turbin. Air dipanaskan dalam *economizer* agar temperatur air mendekati temperatur saturasi/jenuh tekanan bagian *evaporator*. Setelah masuk ke bagian *evaporator*, air mendidih menciptakan campuran uap/air. Temperatur campuran uap/air tetap konstan selama perubahan fasa. Panas untuk merebus air dan menghasilkan uap disediakan oleh gas buang saat mengalir melewati tabung bagian *evaporator* (gas buang mengalir secara eksternal ke tabung, uap/air mengalir melalui bagian dalam tabung). Saat gas buang keluar dari bagian *evaporator* HRSG, suhunya harus lebih tinggi dari suhu saturasi campuran uap/air atau yang dikenal sebagai suhu "*pinch*". Temperatur *pinch* yang khas adalah 14°F (-10°C) hingga 20°F (-6,67°C)

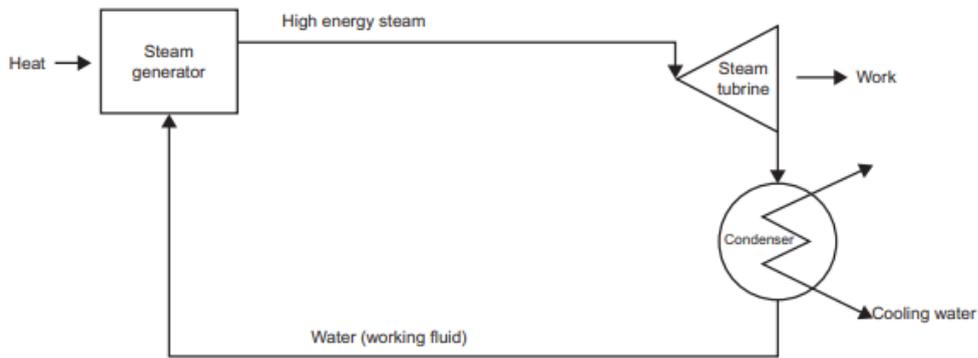
berdasarkan pertimbangan ekonomi yang wajar. Bagian HRSG yang terakhir adalah *superheater*. Pada bagian ini, temperatur uap yang dihasilkan di bagian *evaporator* meningkat (Erikson, 2017).

### 2.2.3 Turbin Uap

Turbin uap pada PTGU beroperasi menggunakan prinsip siklus Rankine konvensional, tetapi boiler pada turbin uap digantikan oleh HRSG. Metode konvensional untuk meningkatkan efisiensi siklus, *reheating*, dan regenerasi. *Reheating* berarti mengambil uap yang diekspansi sebagian dari turbin HP dan dipanaskan kembali di dalam HRSG ke suhu yang lebih tinggi mirip dengan suhu inlet turbin uap dari turbin uap HP. *Reheating* dapat meningkatkan temperatur tertinggi rata-rata di *bottom cycle* dan meningkatkan efisiensi termal secara keseluruhan dalam siklus. Regenerasi berarti mengekstrak sebagian uap dari turbin HP dan mengalihkannya untuk memanaskan *feedwater* dengan *feedwater* tertutup/terbuka (Wang and Gary Stiegel, 2017).

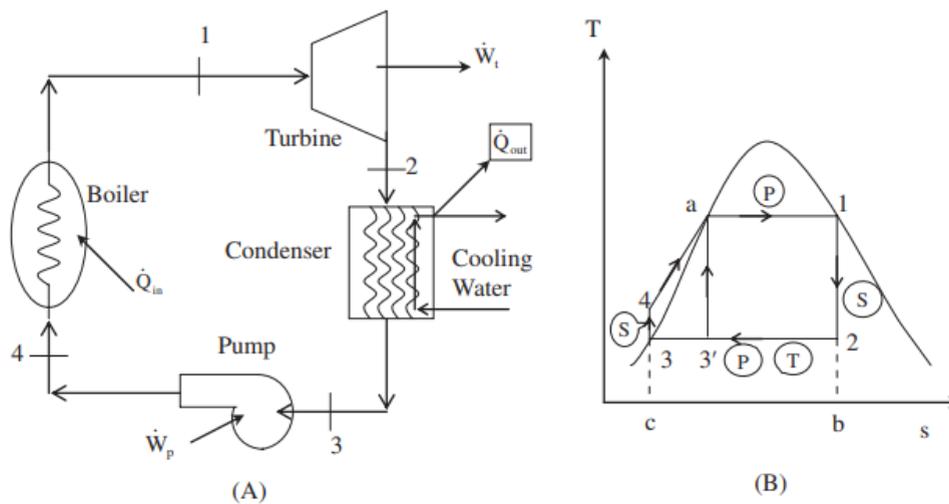
Turbin uap memerlukan ruangan yang kecil; konsumsi minyak pelumas lebih rendah karena tanpa pelumasan internal, sehingga uap buangan bebas dari minyak; memiliki torsi seragam; tidak terdapat bagian yang saling bergesekan selain *bearing*; memiliki kapasitas beban dan keandalan yang besar serta biaya perawatan yang rendah; mampu beroperasi dengan temperatur yang lebih tinggi dan berekspansi ke tekanan buang yang lebih rendah daripada mesin uap bolak-balik (Avallone, 2007).

Cairan kerja yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap adalah air. Pembangkit ini terdiri dari generator uap, dimana air menerima panas dari pembakaran bahan bakar fosil dan diubah menjadi uap bertekanan yang akan berekspansi melalui turbin uap serta mengalami perubahan tekanan, temperatur, dan kandungan panas. Selama proses pemuaihan, uap bertekanan tinggi melakukan kerja mekanis. Setelah melewati turbin, uap melepaskan panas di *condenser* dan kembali ke keadaan semula (Sarkar, 2015).



**Gambar 2.8** Skematik Turbin Uap  
 Sumber : Dipak K. Sarkar, 2015

### 2.2.3.1 Siklus Rankine



**Gambar 2.9** (A) Skematik Siklus Rankine, (B) Diagram T-s  
 Sumber : Wang and Gary Stiegel, 2017

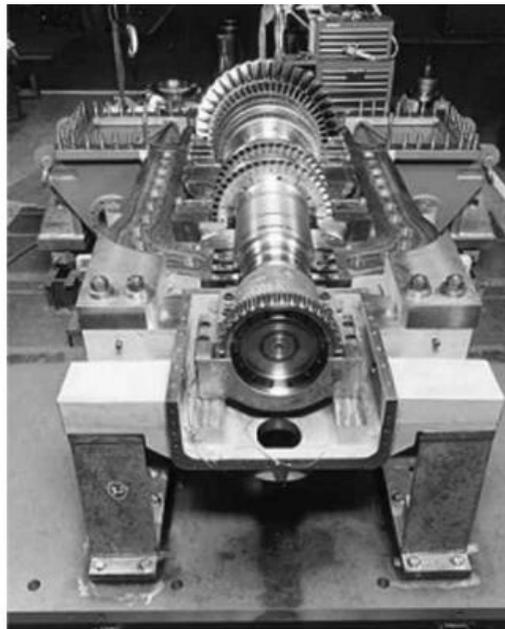
Skema siklus Rankine dan diagram T-s yang ditunjukkan pada gambar 2.10. Untuk sederhananya, semua proses dalam siklus Rankine di atas dianggap ideal yaitu tidak mengalami rugi-rugi panas dan gesekan. Pada tahap 1, mulai dari pintu masuk turbin uap, uap bertekanan dan bertemperatur tinggi diekspansi secara *isentropic* melalui turbin uap untuk menghasilkan tenaga. Pada Tahap 2, uap yang keluar dari turbin uap berada pada tekanan rendah dan temperatur rendah. Tahap 3, uap yang bertekanan dan bertemperatur rendah dikondensasikan menjadi jenuh atau didinginkan pada tekanan konstan (*isobaric*). Tahap 4, setelah dikondensasi di

dalam kubah uap atau yang disebut juga proses isothermal. Air yang dipompa secara isentropik sehingga bertekanan tinggi dan dipanaskan untuk mencapai uap jenuh yang berada pada tahap 1 (Wang and Gary Stiegel, 2017).

### 2.2.3.2 Komponen-Komponen Turbin Uap

Berikut komponen utama dari turbin uap : (Sarkar, 2015)

#### 1. Rotor

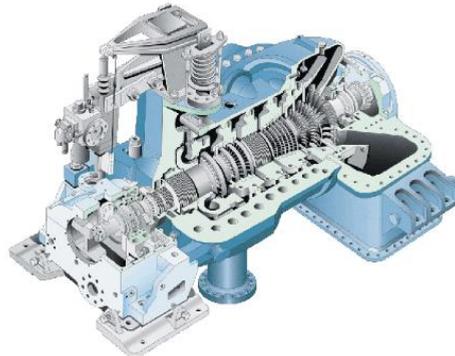


**Gambar 2.10** Rotor Turbin Uap

Sumber : Sarkar, 2015

Rotor turbin terdiri dari sejumlah cakram (sudu-sudu) yang dipasang pada poros. Temperature kerja pada turbin dibawah  $673\text{ K}$  ( $399,85^{\circ}\text{C}$ ), sudu-sudu yang digunakan adalah sudu jalan. Rotor yang beroperasi pada suhu yang tinggi dari  $673\text{ K}$  dan memiliki diameter yang lebih kecil terbuat dari poros padatan tunggal dengan sudu-sudu yang langsung menyatu.

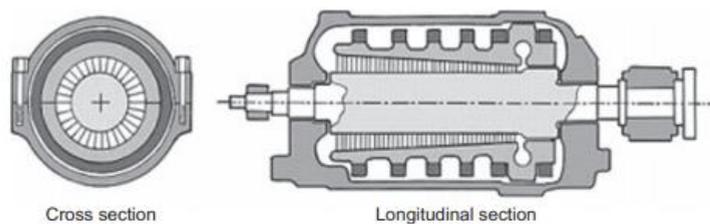
## 2. *Casing*



**Gambar 2.11** *Casing* Turbin Uap

Sumber : <https://inameq.com/engine-system/machinery/ad-2/>

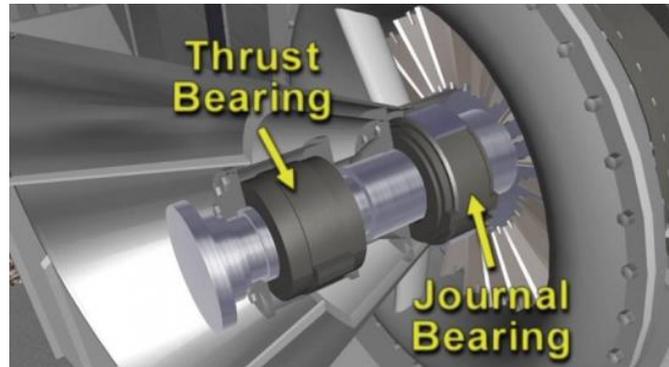
*Casing* berfungsi untuk melindungi komponen dalam turbin uap. *Casing* tipe *barrel* dirancang tanpa sambungan aksial (gambar 2.12). *Casing* turbin uap dapat berupa tipe *barrel* atau tipe *flange* yang dibelah secara horizontal. *Casing* tersebut memungkinkan *start-up* yang cepat dan tidak memerlukan pemanasan eksternal untuk menahan ekspansi *relative casing* dan rotor. Bentuk *casing* tipe barrel juga tetap tidak berubah dan anti bocor saat *start-up*, *shutdown*, perubahan beban, dan bahkan di bawah tekanan tinggi ketika suhu berubah dengan cepat.



**Gambar 2.12** *Casing* Tipe *Barrel*

Sumber: Sarkar,2015

### 3. Bearings



**Gambar 2.13** Bearing Turbin

Sumber : <https://www.opensesame.com/c/gas-turbine-bearings-training-course>

Fungsi *bearing* adalah untuk menahan beban dari rotor dan memungkinkan rotor berputar dengan sedikit gesekan. Kontak logam dengan logam akan merusak lapisan *bearing* dan lapisan oli berguna untuk memisahkan antara permukaan stasioner dan rotor. Ada dua jenis bearing turbin yaitu *journal bearing* dan *thrust bearing*.

*Journal bearing* berfungsi untuk mendukung rotor turbin. *Bearing* tersebut terdiri dari cangkang atas dan bawah dengan *babbit face*. Jarak antara poros dan permukaan *bearing* berfungsi untuk menampung minyak pelumas yang mampu menyeimbangkan berat poros. Ketika kecepatan poros meningkat, pusat poros cenderung mencapai pusat *bearing*. Oli bertekanan tinggi, yang biasa disebut oli *jacking*, disuplai pada bagian bawah *journal*, selama *start-up* dan *shutdown* rotor turbin berputar dengan kecepatan rendah. Sehingga mencegah gesekan kering dan torsi *breakaway* selama *start-up* dengan berkurangnya putaran *gear*.

*Thrust bearing* berfungsi untuk memperbaiki porsi rotornya serta untuk membawa sisa gaya dorong aksial yang berada dalam sistem poros generator turbin gabungan yang tidak dapat dikompensasikan oleh *balance piston*. Besar dan arah gaya dorong aksial diatasi oleh *thrust bearing* tergantung pada kondisi beban turbin. *Thrust pads* adalah tipe *tilting* dan tipe tersebut dapat menyesuaikan dengan kemiringan poros yang diperlukan dengan menemukan

posisi yang tepat pada kedudukan bola penyangga. Minyak pelumas disuplai ke *bearing* bagian bawah pada permukaan poros. *Thrust bearing* ditutup dari kedua ujung untuk mencegah keluarnya minyak pelumas.

#### **4. *Turning Gear***

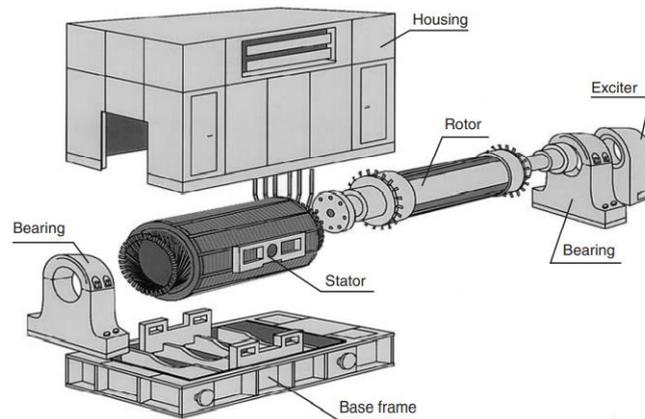
Sistem *turning gear* digunakan dengan mesin turbo besar, seperti turbin uap besar, untuk menyebabkan putaran lambat pada rotor turbin setiap kali turbin *start-up*, *shutdown*, atau pada kondisi lain saat rotor turbin ingin diubah ke posisi yang berbeda. *Turning gear* ditempatkan pada alas *bearing* antara LP dan turbin IP atau generator dan digerakkan secara hidraulik atau elektrik. Ketika uap masuk ke turbin dan ketika kecepatan rotor turbin melebihi kecepatan *turning gear*, *drive pinion* secara otomatis terlempar keluar dari ikatan atau terlepas dari *bull gear rotor* dengan gaya sentrifugal. Selama turbin *shut down* kecepatan rotor melambat dan di bawah kecepatan *turning gear*. *Turning gear* juga dapat diaktifkan secara manual.

*Turning gear* beroperasi secara hidraulik, oli dari sistem *jacking oil* disuplai dengan menghubungkan *drive pinion*. *Turning gear* tidak boleh di start sampai *drive pinion* bekerja penuh. Jika *turning gear* tidak berputar secara normal, poros rotor gabungan dapat diputar secara manual dengan batuan *mechanical turning / barring gear*.

### **2.3 Generator Sinkron**

Generator terdiri dari dua jenis yaitu ‘turbo’ atau generator *silinde-rotor* dan *salient-pole*. Keduanya merupakan generator sinkron dimana putaran rotor sinkron dengan medan magnet yang bergerak pada statornya. Generator yang paling banyak digunakan pada pembangkit listrik adalah turbo-generator karena dapat bekerja pada kecepatan tinggi dan biasanya langsung di kopel oleh turbin gas maupun turbin uap. (Warne, 2005).

### 2.3.1 Kontruksi Generator Sinkron



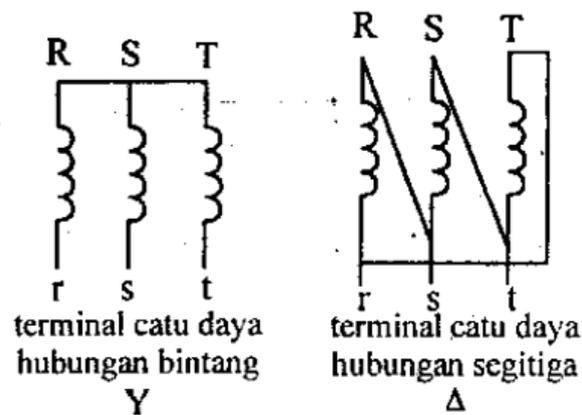
**Gambar 2.14** Kontruksi Turbo Generator

Sumber : Warne, 2005

Sama halnya dengan mesin induksi, mesin sinkron terdiri dari atas stator dan rotor. Bentuk kumparan statornya sama dengan kumparan stator pada mesin induksi, begitu juga dengan banyaknya lapisan kumparan di dalam jalur/alur rangka statornya (*single layer* dan *double layer*), serta hubungan kumparan 3 fasanya (bintang atau segitiga). Berdasarkan jenis kumparan medannya pada rotor yang bentuknya berbeda, ada dua jenis rotor mesin sinkron, yaitu : berbentuk kutub sepatu (*salient*), dan berbentuk celah udara sama rata (silinder atau kadang disebut sebagai *non-salient*) (Wijaya, 2001). Gambar 2.14 menunjukkan kontruksi mesin sinkron.

Stator pada generator atau disebut pula armature yang terdiri dari casing pelat baja yang melindungi generator. Kumparan jangkar pada stator terbuat dari batang tembaga yang dikelilingi oleh isolator. Kumparan tersusun pada tempat yang disebut *slot* (Warne, 2005).

Sebagian besar generator sinkron, rotor yang digunakan adalah rotor dengan jenis konstruksi berbentuk silinder (*non-salient*), karena perbedaan kerjanya dengan rotor jenis sepatu kutub cukup signifikan dalam keadaan *transient*. Inti rotor dibuat seperti pada inti transformator, yaitu terdiri atas lembaran logam tipis untuk mengurangi panas akibat adanya arus pusar (*eddy current*). Pada gambar 2.15 menunjukkan hubungan 3 fasa yang terdiri dari hubungan bintang dan segitiga (Wijaya, 2001).

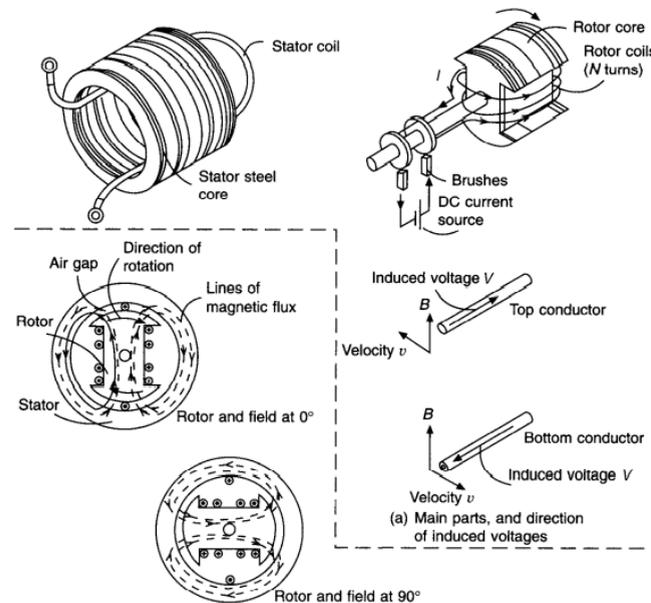


**Gambar 2.15** Hubungan Kumparan  
Sumber: Wijaya, 2001

### 2.3.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Arus DC disuplai oleh *eksiter* ke kumparan rotor (kumparan penguatan) melalui cincin geser. Kumparan yang dialiri oleh arus listrik menghasilkan potensial magnet. Ketika rotor mulai berputar, *fluks magnetic* timbul (Warne, 2005).

Saat medan magnet pada rotor berputar, kerapatan fluks celah udara pada kumparan stator berubah. Saat wajah kutub tepat berada pas disisi kumparan maka kerapatan fluksnya berada pada titik tertinggi, dan menjadi nol saat ketika kutub berjarak  $90^\circ$ . Ggl induksi pada stator juga berbeda-beda setiap waktu sebanding dengan perubahan kerapatan fluks celah udara (Warne, 2005).

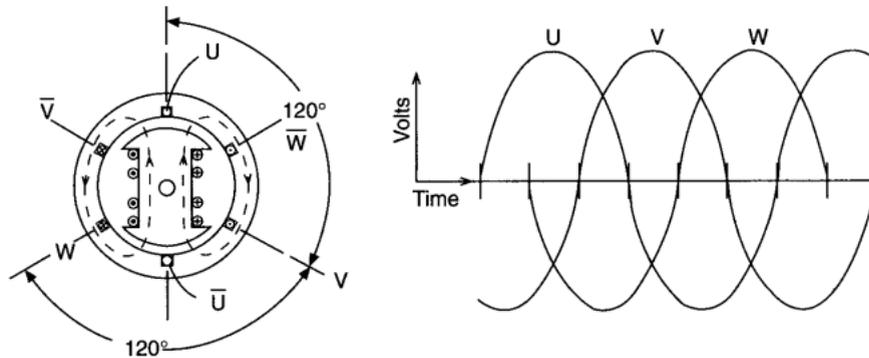


**Gambar 2.16** Prinsip Kerja Generator Sinkron  
 Sumber : Warne, 2005

Arus DC disuplai oleh *eksiter* ke kumparan rotor (kumparan penguatan) melalui cincin geser. Kumparan yang dialiri oleh arus listrik menghasilkan potensial magnet. Ketika rotor mulai berputar, *fluks magnetic* timbul (Warne, 2005).

Saat medan magnet pada rotor berputar, kerapatan fluks celah udara pada kumparan stator berubah. Saat wajah kutub tepat berada pas disisi kumparan maka kerapatan fluksnya berada pada titik tertinggi, dan menjadi nol saat ketika kutub berjarak 90°. Ggl induksi pada stator juga berbeda-beda setiap waktu sebanding dengan perubahan kerapatan fluks celah udara (Warne, 2005).

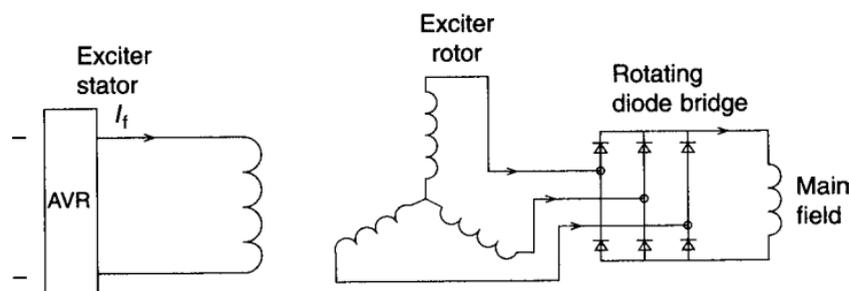
Sinyal 3 fasa terus berulang setiap perputaran rotor, apabila rotor memiliki kecepatan 300 rpm (atau 50 putaran/s) maka tegangan yang timbul memiliki frekuensi 50 Hz. Persamaan umum yang digunakan untuk menentukan kecepatan rotor ialah  $f = ns.p/120$ . Dimana (f) merupakan frekuensi, (ns) putaran rotor, dan (p) jumlah kutub (Warne, 2005).



**Gambar 2.17** Sinyal 3 Fasa Generator  
 Sumber : Warne, 2005

### 2.3.3 Eksitasi

*Exciter* menghasilkan arus DC sehingga menimbulkan medan magnet pada rotor generator. Ada beberapa jenis eksitasi pada generator, yaitu eksitasi terpisah dan eksitasi sendiri. Eksitasi sendiri lebih sering digunakan pada zaman modern ini, biasanya menggunakan unti eksiter berupa *static converter* atau *shaft driven systems*. Untuk eksitasi terpisah diperoleh dari generator DC yang digerakkan oleh penggerak utama, biasanya berupa motor AC (American Society of Power Engineer, 2011).



**Gambar 2.18** Eksitasi Terpisah  
 Sumber : Warne, 2005

Beberapa generator masih menggunakan sikat karbon dan slip ring untuk memasok arus pada rotor, tetapi pada zaman modern ini kebanyakan telah menggunakan sistem eksitasi brushless (tanpa sikat karbon). Pada eksitasi terpisah, output dari AVR memasok arus DC melalui kumparan jangkar pada eksiter.

Kumparan tersebut menghasilkan medan magnet pada rotor eksiter tiap kali berputar. Tegangan AC yang dihasilkan pada kumparan rotor dikonversi menjadi tegangan DC melalui penyearah jembatan yang juga terhubung dengan poros rotor. Output DC dari penyearah terhubung dengan kumparan rotor utama generator (Warne, 2005).

## 2.4 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang sangat vital bagi kelangsungan energi. Penyediaan energi yang handal dan berkualitas bagus tidak lepas dari adanya kualitas suatu sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik terbagi menjadi tiga poin penting, yaitu pembangkitan, penyaluran, dan beban. Pembangkitan menghasilkan daya listrik yang diperlukan oleh konsumen atau beban. Daya listrik yang dihasilkan berupa daya aktif dan daya reaktif. Daya aktif dihasilkan oleh *prime mover* (penggerak mula) dari turbin dan daya reaktif dihasilkan oleh sistem eksitasi pada generator (Syam, 2020).

Daya listrik yang dikirim dari pembangkitan melalui unit-unit pengaman dan trafo untuk menaikkan tegangan yang kemudian melewati sebuah transmisi menuju ke konsumen. Saluran transmisi menjadi sebuah bagian yang sangat penting dan vital dalam memberikan kualitas daya yang bagus dan efisien. Akan tetapi karena jarak antara pembangkitan dan beban sangat jauh, selain mengakibatkan rugi-rugi dan drop tegangan pada saluran transmisi juga sangat rentan terhadap gangguan. Gangguan itu baik berupa gangguan sambaran petir maupun gangguan fasa ke fasa, fasa ke tanah, dan lain-lain. Selain itu perubahan beban yang sangat mendadak juga merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi kualitas penyediaan daya listrik tersebut. Untuk itu pada sebuah sistem tenaga listrik, apabila terjadi gangguan seperti itu, diharapkan sistem tidak mengalami ketidakstabilan dan berakhir pada kegagalan sistem secara menyeluruh (Syam, 2020).

Menurut Crawford, D.M., dan Holt, S.B., Bilamana masing-masing sistem bekerja secara sendiri-sendiri dan tidak saling tersambung, maka pusat tenaga listrik dapat beroperasi dengan masing-masing frekuensinya, dan gangguan pada salah

satu sistem tidak akan mempengaruhi sistem yang lainnya. Akan tetapi lebih baik untuk melakukan interkoneksi antara ketiga sistem tersebut, karena : (Syam, 2020)

- Akan meningkatkan stabilitas secara menyeluruh.
- Memberikan kontinuitas yang lebih baik.
- Lebih ekonomis.

Jika salah satu pusat tenaga listrik mengalami kerusakan, atau dihentikan guna inspeksi atau pemeliharaan, bebannya dapat dipikul oleh pusat-pusat tenaga listrik lainnya. Dalam wilayah yang terinterkoneksi, beban keseluruhan dapat dipikul bersama antara berbagai pusat tenaga listrik sehingga biaya operasi secara keseluruhan menjadi minimal (Syam, 2020).

## **2.5 Operasi Ekonomis Sistem Tenaga Listrik**

### **2.5.1 Biaya Operasi**

Biaya yang dikeluarkan oleh suatu perusahaan listrik untuk menghasilkan energi listrik dalam suatu sistem tenaga listrik ditentukan oleh biaya investasi dan biaya operasi atau biaya produksi. Besar biaya investasi tidak bergantung pada besar daya keluaran pembangkit. tetapi bergantung pada besar kapasitas daya terpasang pembangkit. untuk sistem yang sudah ada (telah beroperasi) biaya investasi telah tertentu besarnya (Syam, 2020).

Biaya operasi adalah semua biaya yang dikeluarkan untuk mengoperasikan pembangkit yang telah ada. Berdasarkan hubungan dengan besar daya keluaran pembangkit, biaya operasi dibedakan atas : (Syam, 2020)

1. Biaya tetap (*Fixed Cost*).
2. Biaya tidak tetap (*Variable Cost*).

#### **2.5.1.1 Biaya Tetap (*Fixed Cost*)**

Biaya tetap merupakan biaya operasi yang tidak tergantung pada besar daya yang dihasilkan / dikeluarkan pembangkit. Biaya tetap ini mencakup upah karyawan, upah pekerja, suku cadang, biaya administrasi, dan lain-lain. Berapapun besar daya keluaran pembangkit di atur, besar komponen biaya tetap tidak akan berubah (Syam, 2020).

Tetapi apabila pembangkit terlalu sering dibebani pada batas pembebanan maksimumnya, akan mempercepat terjadinya keausan atau kerusakan komponen-komponen tersebut. Hal ini akan menyebabkan perlunya pemeliharaan atau operasi yang lebih sering dan ini mengakibatkan biaya pemeliharaan akan meningkat (Syam, 2020)

### 2.5.1.2 Biaya Tidak Tetap (*Variable Cost*)

Biaya tidak tetap merupakan semua biaya operasi yang bergantung pada besar daya keluaran pembangkit atau biaya yang diakibatkan oleh pembebanan, yaitu biaya bahan bakar, dan biaya minyak pelumas. Pada pembangkit termal, presentasi biaya bahan bakar jauh lebih besar terhadap keseluruhan biaya operasi, biaya bahan bakar ini tergantung dari : (Syam, 2020)

- Jenis bahan bakar.
- Efisiensi pembangkit.
- Harga bahan bakar.

Mengingat hal-hal tersebut diatas, maka operasi sistem tenaga listrik perlu dikelola atas dasar manajemen operasi yang baik terutama karena melibatkan biaya operasi yang besar. Manajemen operasi sistem tenaga listrik haruslah memikirkan bagaimana menyediakan tenaga listrik yang se-ekonomis mungkin dengan tetap memperhatikan mutu keandalan. Adapun syarat utama dari manajemen operasi sistem tenaga listrik harus berdasarkan pada persamaan : (Syam, 2020)

$$\text{Daya yang di bangkitkan} = \text{Beban} + \text{Rugi} - \text{rugi} \quad (2.1)$$

Masalah penanganan manajemen operasi sistem tenaga listrik dalam hal ini lebih dikenal istilah **Operasi Ekonomis Sistem Tenaga Listrik**. Yang dimaksud dengan operasi ekonomis adalah proses pembagian atau penjatahan beban total pada suatu sistem kepada pusat-pusat pembangkitnya. Minimumkan biaya operasi pembangkit adalah merupakan optimasi. Jadi optimasi didefinisikan sebagai suatu proses pembangkitan dengan tujuan mengoptimalkan daya pembangkitan dan meminimumkan biaya pembangkitan. Optimasi sistem tenaga listrik dapat dirumuskan sebagai berikut: (Syam, 2020)

1. Bagaimana cara penjadwalan pengoperasian sistem agar biaya operasi dapat diminimalkan ?
2. Bagaimana cara mendistribusikan beban pada masing-masing pembangkit yang beroperasi dalam sistem secara tepat ?

Untuk merealisasikan tentu perlu adanya perencanaan yang dalam hal ini merupakan suatu proses kegiatan perencanaan yang rumit dan bertujuan untuk mencari dan memilih suatu rencana yang optimal diantara beberapa alternative rencana yang tersedia (Syam, 2020).

## 2.6 Penjadwalan Ekonomis

Penjadwalan Ekonomis (*Economic Dispatch*) adalah pembagian pembebanan pada setiap unit pembangkit sehingga diperoleh kombinasi unit pembangkit yang dapat memenuhi kebutuhan beban dengan biaya yang optimum atau dengan kata lain untuk mencari nilai daya keluaran optimum dari kombinasi unit pembangkit yang bertujuan untuk meminimalkan total biaya pembangkitan dan dapat memenuhi batasan equality dan inequality (Pratama et al, 2016).

Hubungan antara biaya bahan bakar terhadap daya aktif yang dihasilkan pembangkit dirumuskan oleh persamaan berikut : (Susilo et al, 2015).

$$C_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.2)$$

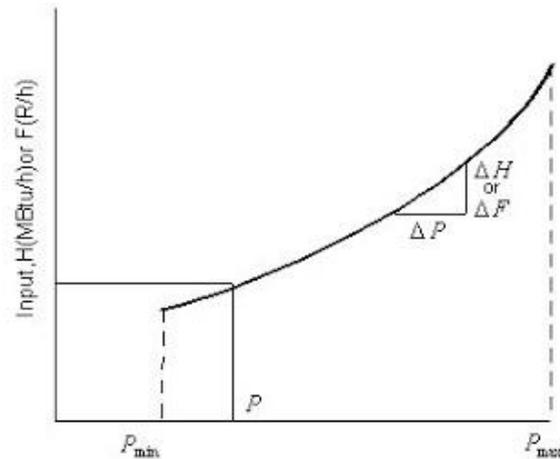
Keterangan :

$C_i(P_i)$	= Biaya operasi tiap unit pembangkit (\$/h atau Rp/jam)
$P_i$	= Daya keluaran tiap unit pembangkit (MW)
$a_i, b_i, c_i$	= Koefisien biaya operasi pembangkit
$i$	= 1,2,3,....., n (untuk n pembangkit)

## 2.7 Karakteristik *Input-Output* Pembangkit Termal

Gambar di atas menunjukkan kurva karakteristik *input-output* unit termal ideal, yang digambarkan sebagai kurva non-linier yang kontinu. Input unit pembangkit pada ditunjukkan pada sumbu “y”, berupa energi panas (bahan bakar) yang dibutuhkan dalam bentuk Mbtu/h yaitu satuan *British Temperature Unit* (apabila menggunakan SI menjadi MJ/h atau Kcal/H). output dari pembangkit

ditunjukkan pada sumbu “x”, merupakan daya listrik yang memiliki batas-batas berupa daya maksimum dan daya minimum yang mampu dibangkitkan (Saadat, 1999).



**Gambar 2.19** Kurva Karakteristik *Input-Output* Unit Termal  
 Sumber : Rosyadi, 2008

Cara untuk mendapatkan persamaan karakteristik input output pembangkit listrik tenaga *thermal* berdasarkan data operasi adalah sebagai berikut : (Syam, 2020)

1. Mencatat pemakaian bahan bakar  $H_i$  untuk menghasilkan daya listrik sebesar  $P_{ti}$ .
2. Mengulangi langkah diatas untuk beberapa harga  $H_i$  dan  $P_{ti}$ .
3. Data yang diperoleh diatas diolah menggunakan metode kuadrat terkecil untuk mendapatkan persamaan *input output* pembangkit listrik tenaga termal.

Metode kuadrat terkecil digunakan untuk menyusun suatu persamaan pendekatan menjadi suatu fungsi yang dihasilkan dari data pengamatan. Cara penyelesaiannya dengan menggunakan metode kuadrat terkecil, sebagai berikut : (Syam, 2020)

$$J = \sum_{i=1}^N [\alpha_i + \beta_i P_{ti} + \gamma_i P_{ti}^2 - H_i]^2 \quad (2.3)$$

Ket :

$i = 1, 2, 3, \dots, N = \text{jumlah data.}$

Penyelesaiannya diperoleh dengan mengatur turunan J terhadap  $\alpha, \beta, \gamma$  menjadi nol, hasilnya adalah sebagai berikut : (Syam, 2020)

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^N 2[\alpha_i + \beta_i P_{ti} + \gamma_i P_{ti}^2 - H_i] = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^N 2P_{ti}[\alpha_i + \beta_i P_{ti} + \gamma_i P_{ti}^2 - H_i] = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \gamma} = \sum_{i=1}^N 2P_{ti}^2[\alpha_i + \beta_i P_{ti} + \gamma_i P_{ti}^2 - H_i] = 0 \quad (2.6)$$

Selanjutnya :

$$(N)\alpha + \left(\sum_{i=1}^N P_{ti}\right)\beta + \left(\sum_{i=1}^N P_{ti}^2\right)\gamma = \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.7)$$

$$\left(\sum_{i=1}^N P_{ti}\right)\alpha + \left(\sum_{i=1}^N P_{ti}^2\right)\beta + \left(\sum_{i=1}^N P_{ti}^3\right)\gamma = \sum_{i=1}^N P_{ti}H_i \quad (2.8)$$

$$\left(\sum_{i=1}^N P_{ti}^2\right)\alpha + \left(\sum_{i=1}^N P_{ti}^3\right)\beta + \left(\sum_{i=1}^N P_{ti}^4\right)\gamma = \sum_{i=1}^N P_{ti}^2H_i \quad (2.9)$$

Yang dalam bentuk matriks adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N P_{ti} & \sum_{i=1}^N P_{ti}^2 \\ \sum_{i=1}^N P_{ti} & \sum_{i=1}^N P_{ti}^2 & \sum_{i=1}^N P_{ti}^3 \\ \sum_{i=1}^N P_{ti}^2 & \sum_{i=1}^N P_{ti}^3 & \sum_{i=1}^N P_{ti}^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N H_i \\ \sum_{i=1}^N P_{ti}H_i \\ \sum_{i=1}^N P_{ti}^2H_i \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Jadi,

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N P_{ti} & \sum_{i=1}^N P_{ti}^2 \\ \sum_{i=1}^N P_{ti} & \sum_{i=1}^N P_{ti}^2 & \sum_{i=1}^N P_{ti}^3 \\ \sum_{i=1}^N P_{ti}^2 & \sum_{i=1}^N P_{ti}^3 & \sum_{i=1}^N P_{ti}^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N H_i \\ \sum_{i=1}^N P_{ti}H_i \\ \sum_{i=1}^N P_{ti}^2H_i \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

## 2.8 Fungsi Biaya Bahan Bakar

*Operation cost* pada suatu pembangkit tenaga listrik merupakan biaya terbesar dalam pengoperasian pembangkit. Biaya pokok yang dikeluarkan oleh perusahaan listrik terbagi dua, yaitu biaya operasi (*operation cost*) dan biaya investasi (*investastion cost*). Besarnya biaya investasi hanya bergantung pada besar kapasitas daya yang akan terpasang. Biaya investasi termasuk di dalamnya biaya

pembangunan pusat pembangkit listrik, jaringan transmisi dan distribusi serta peralatan sistem lainnya. Sedangkan biaya operasi berupa biaya bahan bakar, biaya perawatan pembangkit, dan gaji untuk karyawan (Saadat, 1999)

## 2.9 Metode Lagrange

Metode Lagrange merupakan metode konvensional yang banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah penjadwalan ekonomis atau *economic dispatch*. Metode Lagrange terbagi menjadi dua yaitu mengabaikan dan memperhitungkan *losses* (Syah et al, 2013).

Sebuah sistem terdiri dari “N” unit pembangkit *thermal* yang terhubung pada sebuah *bus-bar* yang menerima beban listrik  $P_{load}$ . Input dari setiap unit ditunjukkan sebagai  $F_i$  mewakili harga dasar setiap unit. *Output* dari setiap unit ditunjukkan sebagai  $P_i$ , mewakili pembangkitan daya listrik oleh unit tertentu. Harga total tarif dasar dari sistem ini tentu saja merupakan penjumlahan dari setiap harga individual dari unit pembangkit. Hal-hal yang perlu dibatasi pada pengoperasian sistem ini merupakan jumlah dari daya *output* harus sama dengan permintaan beban (Wood & Bruce, 1996).

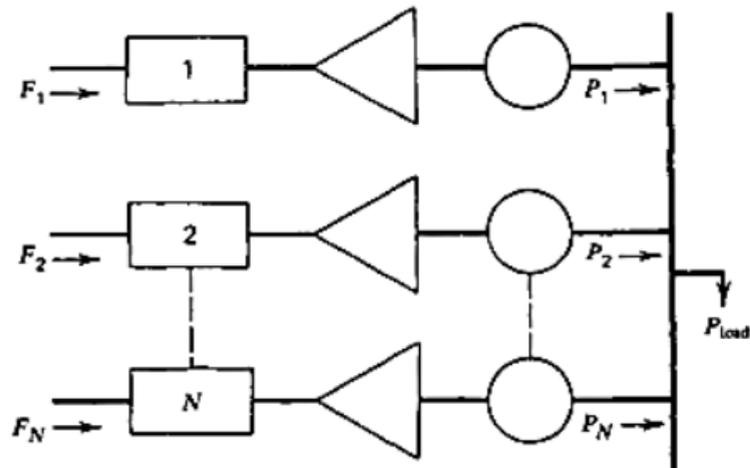
Adapun fungsi objektif yang digunakan adalah  $F_T$  yang merupakan total harga yang disuplai ke beban. Permasalahan yang harus diselesaikan adalah untuk meminimalisir  $F_T$  yang dibatasi oleh jumlah dari daya yang dibangkitkan harus sama dengan daya yang diterima beban. Sebagai catatan bahwa rugi-rugi saluran diabaikan dan batas pengoperasiannya tidak dinyatakan pada formula ini. Adapun formula sebagai berikut : (Wood & Bruce, 1996)

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N \quad (2.12)$$

$$= \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (2.13)$$

$$\phi = 0 = P_{load} - \sum_{i=1}^N P_i \quad (2.14)$$

\*Unit pembangkit mengkonsumsi bahan bakar pada tingkat tertentu (misalnya, MBtu/h), yang dapat dikonversi menjadi R/h ditunjukkan sebagai tarif dasar.



**Gambar 2.20** N Unit Termal Bekerja Untuk Melayani Beban  $P_{load}$   
 Sumber : Wood & Bruce, 1996

Pembatasan permasalahan optimasi ini dapat diselesaikan secara formal menggunakan metode kalkulus lanjutan yang dapat diselesaikan dengan fungsi Lagrange. Untuk menetapkan kondisi yang dibutuhkan untuk sebuah nilai ekstrim dari sebuah fungsi objektif setelah fungsi *constraint* dikalikan oleh sebuah pengali yang tidak ditentukan. Berikut persamaan fungsi Lagrange, sebagai berikut : (Wood & Bruce, 1996).

$$\mathcal{L} = F_T + \lambda \phi \quad (2.15)$$

Kondisi yang dibutuhkan untuk nilai ekstrim dari hasil fungsi objektif ketika kita mengambil turunan pertama dari fungsi Lagrange terhadap variabel independent dan menyamakannya dengan nilai nol. Pada kasus ini, terdapat variabel  $N + 1$ , dimana nilai  $N$  merupakan daya keluaran,  $P_i$  ditambah dengan pengali Lagrange yang tidak ditentukan,  $\lambda$ . *Derivative* dari fungsi Lagrange yang memenuhi pengali yang tidak ditentukan sebelumnya akan dikembalikan lagi pada fungsi konstrain. Dengan kata lain, fungsi  $N$  merupakan hasil ketika kita mengambil bagian *derivative* dari fungsi Lagrange yang memenuhi nilai daya *output* pada waktu yang diatur pada persamaan berikut : (Wood & Bruce, 1996).

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0 \quad (2.16)$$

$$0 = \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad (2.17)$$

Adapun kondisi yang penting untuk adanya harga minimum dalam kondisi operasi pada sistem daya termal dimana kenaikan tarif dari semua unit sama dengan beberapa nilai yang tidak ditentukan sebelumnya, yaitu  $\lambda$ . Tentu saja, dalam kondisi penting ini kita harus menambahkan persamaan konstrain yang merupakan jumlah dari daya keluaran yang sama dengan daya yang diminta oleh beban. Dalam penjumlahannya, terdapat dua pertidaksamaan yang dibentuk dari setiap unit yaitu daya *output* dari setiap unit yang harus lebih besar atau sama dengan daya minimum yang diperbolehkan dan juga harus kurang dari atau sama dengan daya maksimum yang diperbolehkan dari setiap unit. Kondisi ini dan pertidaksamaannya dapat disingkat seperti persamaan yang ditunjukkan pada persamaan berikut : (Wood & Bruce, 1996).

$$\begin{aligned} \frac{dF_i}{dP_i} &= \lambda \text{ (N Persamaan)} \\ P_{i.\min} &\leq P_i \leq P_{i.\max} \text{ (2N Pertidaksamaan)} \\ \sum_{i=1}^N P_i &= P_{load} \text{ (1 Konstrain)} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Ketika kita sudah mengenal pertidaksamaan konstrain, kemudian kondisi terpenting yang perlu dikembangkan sedikit demi sedikit sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut : (Wood & Bruce, 1996).

$$\begin{aligned} \frac{dF_i}{dP_i} &= \lambda \text{ (for } P_{i.\min} < P_i < P_{i.\max}) \\ \frac{dF_i}{dP_i} &\leq \lambda \text{ (for } P_i = P_{i.\max}) \\ \frac{dF_i}{dP_i} &\geq \lambda \text{ (for } P_i = P_{i.\min}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

$\lambda$  adalah karakteristik laju panas atau *incremental rate* yang dapat juga dikatakan sebagai karakteristik kenaikan biaya. Karakteristik ini merupakan suatu kemiringan (*slope*) dari karakteristik *input-output* atau turunan pertama dari karakteristik *input-output*. (Pratama et al, 2016). Pendistribusian beban berdasarkan

nilai  $\lambda$  atau *incremental rate* antara setiap unit pembangkit adalah dengan mempertimbangkan untuk menaikkan beban salah satu unit sementara beban unit lain diturunkan dengan jumlah yang sama, yang akan mengakibatkan kenaikan atau penurunan pada total biaya operasi pembangkit (Saadat, 1999).

## 2.10 IBM SPSS

SPSS merupakan program komputer yang digunakan untuk membuat analisis statistika. SPSS dipublikasikan oleh SPSS Inc pada tahun 1968. SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences* atau Paket Statistik untuk Ilmu Sosial). (Pusat Data dan Statistik Pendidikan KEMENDIKBUD, 2014). Semula SPSS hanya diperuntukkan untuk ilmu sosial saja, namun seiring perkembangannya kini SPSS digunakan oleh berbagai disiplin ilmu sehingga kepanjangannya berubah menjadi “*Statistical Product and Service Solution*” (Nisfiannoor, 2009).

Kemampuan statistic dasar software SPSS adalah sebagai berikut : (Pusat Data dan Statistik Pendidikan KEMENDIKBUD, 2014).

1. Statistik Deskriptif : Tabulasi Silang, Frekuensi, Detugas akhir, Penelusuran, Stastistik, Detugas akhir Rasio.
2. Statistik Bivariat : Rata-rata, T-test, ANOVA, Korelasi (bivariat, parsial, jarak), *Nonparametric tests*.
3. Prediksi Hasil Numerik : Regresi Linear.
4. Prediksi untuk mengidentifikasi kelompok : Analisis Faktor, Analisis *Cluster (twostep, K-means, hierarkis)*, Diskriminan.

SPSS mampu membaca berbagai jenis data atau memasukkan data secara langsung melalui SPSS Data Editor. Bagaimanapun struktur dari data mentahnya, data yang diinput ke dalam Data Editor SPSS harus berbentuk baris (*cases*) dan kolom (*variables*). *Cases* berisi informasi untuk satu unit analisis, sedangkan *variable* adalah informasi yang dikumpulkan dari masing-masing kasus. Hasil-hasil analisis akan muncul dalam SPSS *Output Navigator*. (Pusat Data dan Statistik Pendidikan KEMENDIKBUD, 2014).

## 2.11 MATLAB

MATLAB adalah singkatan dari *MATrix LABoratory* yang awalnya bertujuan untuk menyediakan akses yang lebih mudah dalam perangkat lunak matriks yang dikembangkan oleh proyek *LINKPACK* (paket sistem linier) dan *EISPACK* (paket sistem Eigen). MATLAB mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan lingkungan pemrograman. MATLAB juga memiliki struktur data yang canggih, berisi alat pengeditan dan *debugging tools*, dan pemrograman pendukung berorientasi objek. MATLAB memiliki keunggulan dibandingkan dengan Bahasa computer konvensional (seperti C, Fortran). Secara komersil MATLAB tersedia sejak tahun 1984, dan saat ini merupakan program standar yang digunakan oleh banyak universitas dan industry di seluruh dunia (Houcque, 2005).

MATLAB terdiri dari 5 bagian utama, yaitu : (MathWorks, 2015).

1. *Development environment*, merupakan set peralatan yang kebanyakan berupa GUI (*Graphical User Interfaces*), termasuk didalamnya adalah MATLAB *desktop*, *command window*, *command history*, *editor*, dan *debugger*.
2. MATLAB *mathematical function library*, merupakan kumpulan algoritma mulai dari fungsi dasar seperti penjumlahan, sinus, kosinus, dan aritmetika hingga fungsi yang lebih rumit seperti invers matriks, transformasi Fourier dan fungsi Bessel.
3. MATLAB *language*, merupakan bahasa array tingkat tinggi yang memiliki fitur pemrograman yang berguna untuk membuat program kecil hingga program besar yang kompleks.
4. Grafik, dapat menampilkan vektor dan matriks sebagai grafik, serta menganotasi dan mencetaknya. Juga dapat memvisualisasikan data dalam bentuk dua dimensi maupun tiga dimensi, memproses Gambar, animasi dan grafik presentasi.
5. *Application Program Interface* (API), merupakan *library* yang memungkinkan untuk menulis bahasa C dan Fortran, juga memiliki fasilitas *dynamic linking* atau memanggil rutinitas dari MATLAB serta membaca dan menulis MAT-file.