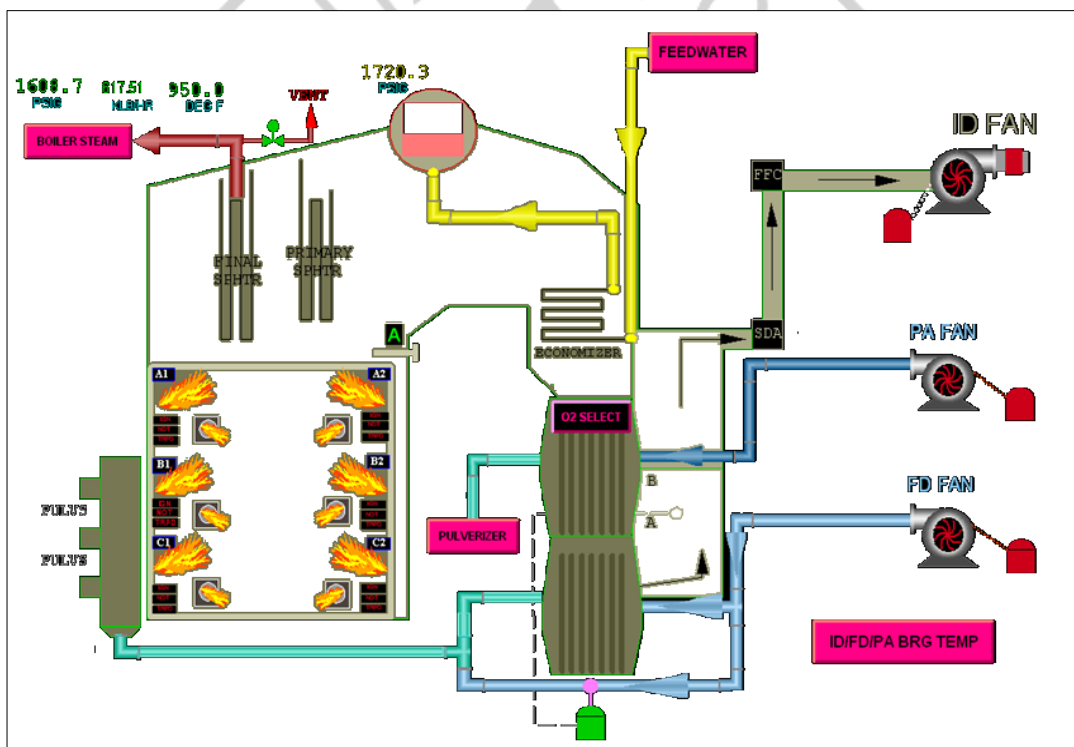


BAB II LANDASAN TEORI

2.1. PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang seporos dengan turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik dari uap panas/kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar seperti batu bara dan minyak diesel jenis HSD (*High Speed Diesel*).



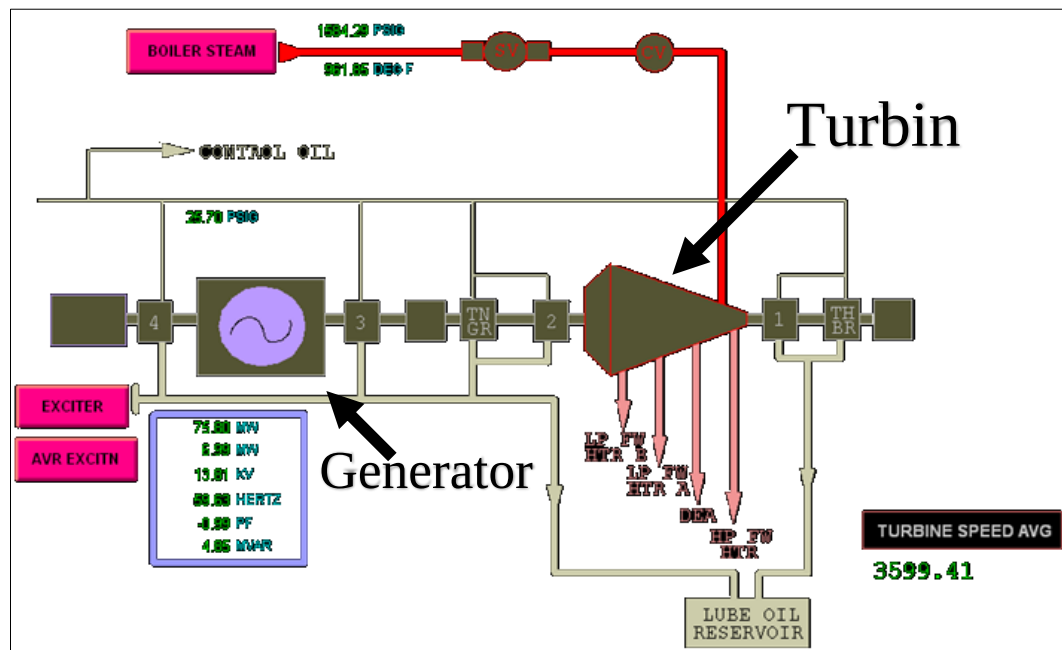
Gambar 2.1. Boiler PLTU

Sumber : Monitor DCS PID Control Room

Pada proses konversi energi pada PLTU berlangsung melalui tiga tahapan, yaitu:

- Pertama, energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas melalui proses pembakaran seperti terlihat pada gambar 2.1 kemudian digunakan untuk memanaskan air yang menyebabkan air berubah wujud menjadi uap.
- Kedua, energi panas (uap) diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran di turbin uap seperti terlihat pada gambar 2.2
- Ketiga, energi mekanik kemudian diubah menjadi energi listrik di Generator

terlihat pada gambar 2.2 Turbin dikopel dengan rotor generator untuk menghasilkan energi listrik.



Gambar 2.2. Turbine dan Generator PLTU
Sumber : Monitor DCS PID Ruang Kontrol PT. XYZ

PLTU menggunakan fluida kerja yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Urutan sirkulasinya secara singkat adalah sebagai berikut:

- Pertama, air diisi ke dalam boiler hingga mengisi penuh seluruh pipa boiler. Di dalam boiler, air ini dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran, bahan bakar dengan udara hingga air berubah menjadi uap.
- Kedua, uap hasil produksi boiler dengan tekanan dan temperatur tertentu diarahkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran.
- Ketiga, rotor generator yang dikopel langsung dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik sebagai hasil dari perputaran medan magnet dalam kumparan, sehingga ketika turbin berputar dihasilkan energi listrik dari terminal *output* generator.
- Keempat, uap bekas keluar turbin masuk ke kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin agar berubah kembali menjadi air yang disebut air kondensat. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi

sebagai air pengisi boiler.

Demikian siklus ini berlangsung terus menerus dari point pertama hingga ke empat dan berulang-ulang (Mufti, 2022).

2.1.1 Turbin Uap

Turbin uap digunakan sebagai penggerak utama untuk peralatan penggerak seperti *blower*, pompa dan kompresor, tetapi penggunaan utamanya adalah menggerakkan generator untuk memproduksi listrik. Turbin uap dapat diklasifikasikan secara umum sebagai: (a) unit besar digunakan sebagai penggerak generator untuk memproduksi listrik; (b) unit yang lebih kecil untuk pembangkit listrik pembantu dan industri; dan (c) unit industri kecil yang digunakan untuk peralatan penggerak seperti pompa, *blower*, dan kompresor.



Gambar 2.3. Turbin Uap
Sumber : PLTU XYZ

Pada gambar 2.3 terlihat sistem turbin uap yang dikopel dengan generator. Pada unit yang besar, beroperasi pada kecepatan yang bergantung pada frekuensi sistim kelistrikan, misalnya, 1500 atau 3000 putaran/menit untuk sistim 50 Hz dan 1800 atau 3600 putaran per menit untuk sistim 60 Hz. Sistim turbin pada dasarnya terdiri dari bagian-bagian yang masing-masing membutuhkan pelumasan seperti turbin dan generator. Tujuan dasar pelumasan adalah meminimalkan gesekan dan keausan. Biasanya, pelumas diperlukan untuk melakukan berbagai fungsi tambahan, misalnya pendinginan atau pembersihan. Gesekan didefinisikan sebagai gaya yang menahan gerakan ketika dua permukaan dipindahkan relatif satu sama lain. Gaya ini adalah hasil dari interaksi antar sifat tergantung pada apakah gerakannya bersifat meluncur atau bergulir. Dalam sistem yang dilumasi,

mekanisme ini akan dikurangi dengan lapisan cairan yang terkait diberikan antara permukaan dan gaya tambahan, tetapi lebih kecil dan bergantung pada viskositas cairan.

Bantalan utama turbin uap adalah bantalan jurnal logam *babit* bantalan yang dilumasi secara hidrodinamis dengan memberikan lapisan minyak bertekanan antara poros dan *babit* bantalan. Pada saat *start-up*, bantalan turbin menerima beban yang besar sehingga tekanan hidrostatik pelumasan digunakan untuk mengangkat poros dari dasar bantalan. Ini akan membentuk lapisan film hidrodinamik dan mencegah terjadinya keausan karena gesekan.

Pada semua mesin kecuali yang digabungkan langsung, kopling fleksibel digunakan untuk menyambung bagian poros individual, dan ini membutuhkan pelumasan secara terus menerus untuk mencegah keausan yang parah. Ini dapat dicapai dengan memasukkan minyak dari ujung bantalan untuk kopling yang bersebelahan dengan casing bantalan (Hayler dan Wilson, 2020).

Persyaratan pelumasan dari unit penggerak sering kali dikhususkan, unit yang digerakkan seperti alternator dan generator memiliki persyaratan yang mirip dengan turbin itu sendiri, dengan bantalan jurnal dan *trust-bearing* serta minyak perapat yang umum sebagai persyaratan. Pelumasan dilakukan dengan menempatkan minyak di antara permukaan untuk mencegah atau setidaknya meminimalkan kontak, baik secara keseluruhan ataupun sebagian, selama kondisi operasi normal.

Oleh karena itu penting untuk menetapkan suatu prosedur pengoperasian pada *start-up*, pengaturan beban, dan penghentian yang benar untuk mengoperasikan pembangkit listrik dengan lancar. Meskipun turbin dapat menahan operasi sesaat yang berlebihan, tetapi ini dapat mempersingkat masa pakainya, karena tekanan internal yang tidak menguntungkan, menyebabkan deformasi termal dan distorsi operasi. Oleh karena itu, pada pengoperasian awal setelah pemasangan turbin, perlu untuk mengoperasikan sistem dengan kecepatan *start-up* dan pembebanan yang bertahap, lebih lambat dari yang ditentukan dalam buku manual hingga turbin sesuai dengan berbagai kondisi, bahkan setelah dioperasikan secara normal, laju, prosedur, dan pembebanan pemuatan didesain sesuai dengan yang diperlukan.

Pada saat *start-up*, standar umum pada setiap penyalaan turbin dan setiap alat

bantu harus diperiksa selama putaran lambat seperti kebisingan, getaran, dan tekanan yang tidak normal serta suhu uap dan oli juga dipantau. Operator turbin harus memperhatikan indikasi pada instrumen pemantauan, dan mengambil tindakan yang tepat untuk memperpanjang waktu putar dan waktu mulai, hingga indikasi mencapai nilai yang diperbolehkan.

Pada tabel 2.1 berikut terlihat bahwa penyebab kerusakan turbin yang disebabkan oleh kegagalan pompa pelumasan darurat meskipun frekuensi terjadinya kecil tetapi dapat mengakibatkan *downtime* unit yang sangat lama.

Tabel 2.1. Kategori Penyebab Kerusakan Turbin
Sumber : Electric Power Research Institute (EPRI)

Failure Category	Number of Incidents				Four Year Summary				
	Year				Total Incidents		Total Outage Hour		
	1976	1977	1978	1979	No.	(Pct.)	Hours/ Incident	Total Hours	(% F.O.H)
Contamination in Oil Sistem	17	19	14	9	59	(39%)	350	20650	(54%)
Failure of Backup Oil Pumping Sistem	4	6	1	2	13	(9%)	1000	13000	(34%)
Inadequate Repair or Installation	7	2	5	1	15	(10%)	130	1950	(5%)
Bearing Wipes Due to Oil Instability	5	8	5	2	20	(13%)	40	800	(2%)
Other Bearing Failure	4	7	3	0	14	(9%)	100	1400	(3,5%)
Other (Mainly, Misc. Componen Failures)	6	8	9	7	30	(20%)	20	600	(1,5%)
Total	43	50	37	21	151	(100%)	254 (avg)	38400	(100%)

2.1.2 Generator

Generator adalah sebuah alat sumber tegangan listrik yang didapatkan dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Cara kerja generator berpedoman pada prinsip kerja induksi elektromagnetik, dengan cara memutarakan suatu medan magnet pada lilitan tembaga sehingga menimbulkan GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi. Generator listrik menghasilkan energi listrik dari perubahan

suatu sumber energi mekanik, biasanya dengan cara menggunakan sebuah induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal dengan cara kerja pembangkitan listrik. Sumber energi mekanik ini dapat berupa turbin mesin uap ataupun *resiprokating*, kincir air ataupun air yang jatuh pada sebuah turbin, mesin pembakaran dalam, engkol tangan, turbin angin, energi matahari atau energi surya, udara yang dipadatkan dan dimampatkan, atau berbagai sumber energi mekanik lainnya.

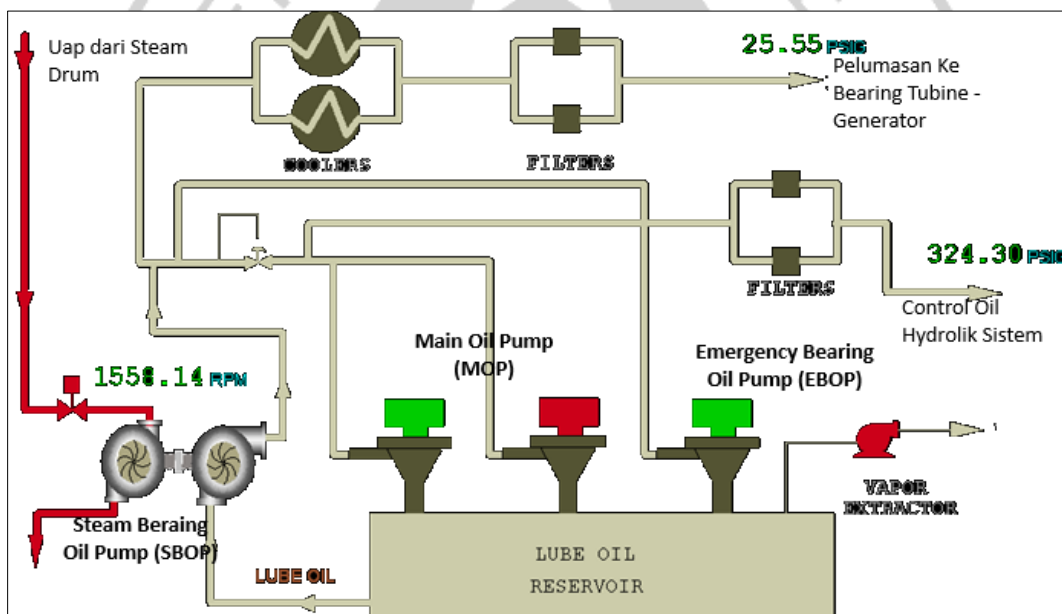
Generator arus bolak-balik (AC) adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat pembangkitan tegangan pada generator). Kumparan medan pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator.

Bagian-bagian utama dari generator sinkron adalah :

1. Stator adalah bagian dari generator yang tidak ikut berputar/diam yang terdiri dari rangka stator, inti stator, dan gabungan kawat pada bagian inti stator. Pada inti stator dibuat alur-alur dalam arah aksial dan pada alur-alur tersebut ditempatkan kumparan stator. Dari kumparan stator dihasilkan arus bolak-balik tiga fasa. Kumparan stator dibuat dari tembaga yang diisolasi. Inti stator menyalurkan medan magnet yang polaritasnya selalu berubah sesuai dengan fungsi frekuensi arus bolak-balik. Untuk mengurangi arus pusar dan panas yang timbul, maka inti stator dibuat dari lempengan baja tipis dan diisolasi satu terhadap yang lain.
2. Rotor konstruksi stator ada dua bentuk rotor yang sering dipakai bentuk kutub menonjol (*salient*) dan bentuk silinder halus (*non-salient*). Rotor bentuk kutub menonjol sering dipakai pada generator yang berkecepatan rendah dan sedang, bentuk diameternya besar dan mempunyai poros yang pendek. Kutub dan sepatu kutub terdiri dari lapisan lempengan besi guna memperkecil pemanasan akibat arus *eddy* (arus pusar). Rotor bentuk silinder halus banyak dipakai pada generator yang berkecepatan tinggi, yang digerakkan oleh turbin uap atau turbin *turbo*. Terbuat dari besi yang keras dan halus berbentuk silinder. Kutub tidak menonjol melebihi rotor. Rotor jenis silinder ini mempunyai karakteristik berdiameter kecil dan poros yang panjang.

2.1.3 Pompa Oli Utama (Main Oil Pump)

Pompa oli utama adalah salah satu yang menyalurkan semua kebutuhan pelumasan untuk generator turbin pada tekanan tinggi selama normal operasi. Ini digerakkan langsung dari poros turbin dan mungkin terletak di ujung poros turbin atau generator. Pada turbin yang besar diperlukan kuantitas dan tekanan pompa yang digunakan yaitu pompa tipe sentrifugal namun masih digerakkan oleh poros turbin atau motor listrik AC. Pada PT. XYZ, sistem oli kontrol dan oli pelumas dilengkapi dengan dua buah pompa yaitu pompa oli utama (MOP), dan satu pompa pompa oli darurat (EOP). Pompa oli utama digerakkan oleh motor AC. Salah satu MOP memompa sejumlah minyak pelumas yang dibutuhkan dari penampungan minyak pelumas saat turbin sedang digunakan.



Gambar 2.4. Sistem Pelumasan Turbin Generator
Sumber : Monitor DCS PID Control Room

Pada gambar 2.4 memperlihatkan peralatan-peralatan sistem pelumasan, seperti pompa oli utama, pompa oli darurat, bantalan turbin dan generator. Di sisi lain, pompa oli utama yang *standby* digunakan ketika tekanan keluaran pompa oli utama rendah. Saat tekanan keluaran oli dari pompa oli utama cukup tinggi, pompa oli utama lain tidak perlu dihidupkan, tetapi saat tekanan minyak pelumas yang diberikan oleh pompa oli utama adalah 17.3 psig atau kurang, secara otomatis akan jalan melalui *switch* tekanan. Tentu saja pompa oli utama lainnya dapat dijalankan secara manual. *Check valve* pada keluaran masing-masing pompa oli utama

disediakan untuk mencegah aliran balik dari pompa oli utama yang lain. Pompa oli darurat yang digerakkan oleh motor DC yang terhubung ke sumber listrik darurat. Pompa pelumasan darurat digunakan ketika turbin dihentikan dan pompa oli utama tidak dapat dijalankan karena listrik komersial AC mati. Ketika tekanan oli pelumas turun menjadi 15 psig atau kurang, pompa pelumasan darurat secara otomatis beroperasi melalui *switch*. Pompa pelumasan darurat juga bisa dijalankan secara manual. *Check valve* pada keluaran pompa pelumasan darurat disediakan untuk mencegah aliran balik dari pompa oli utama (Instruction Manual for Steam Turbin, 1997).

2.1.4 Pompa Pelumasan Darurat Penggerak Motor DC

Waktu yang dibutuhkan turbin untuk turun dari kecepatan operasi hingga berhenti biasanya dari 20 hingga 45 menit. Jika bantalan tidak menerima pelumasan selama periode ini, maka suhu bantalan akan meningkat dan mengakibatkan kerusakan bantalan selama penurunan beban turbin kecuali jika turbin dilengkapi dengan sumber pelumasan bantalan. Satu-satunya metode perlindungan adalah menyediakan pompa oli pelumas cadangan dalam jumlah yang cukup untuk memastikan semua aliran oli pelumas tidak hilang.



Gambar 2.5. Pompa Pelumasan
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada gambar 2.5 terlihat pompa oli pelumasan tambahan cadangan dengan pompa pelumasan darurat penggerak motor DC yang biasa disebut EBOP. Pompa ini secara otomatis akan memberikan aliran minyak pelumas ke saluran utama pelumas bantalan. Pompa oli pelumasan darurat bukan merupakan pompa aliran penuh atau tekanan penuh dan tidak akan memasok kebutuhan oli pelumas selama

operasi. Pompa oli pelumas darurat umumnya mengeluarkan tekanan yang tidak mencukupi, oleh karena itu perlu memastikan oli pelumasan dengan menjaga katup penghenti darurat dan katup pengatur uap tetap terbuka. Hilangnya tekanan oli pelumas utama dan tambahan pompa akan membuat turbin berhenti.

Pompa pelumasan darurat penggerak motor DC dirancang untuk memberikan pelumasan kepada turbin dan bantalan generator jika terjadi kehilangan daya AC secara total. Motornya diukur pada 20 HP, 125 VDC, dan 156 ampere. Biasanya, kontrol sirkuit motor DC pompa pelumasan ada dalam mode *standby*. Saklar kontrol yang terletak di panel kontrol *auxiliary* merupakan saklar 3-posisi dengan pengembalian pegas, dilengkapi lampu untuk menunjukkan mode operasi.

Pompa pelumasan darurat penggerak motor DC dapat di start secara manual dengan memindahkan saklar kontrol ke posisi *start* atau memindahkan saklar kontrol motor DC ke posisi *stop* akan menghentikan pompa pelumasan darurat penggerak motor DC. Penggerak motor DC akan tetap berhenti jika tidak terjadi salah satu dari dua kondisi untuk start otomatis di atas. Jika tidak, pompa darurat pelumasan penggerak motor DC akan menyala kembali jika saklar dilepaskan ke posisi tengah. (Operating and Maintenance Manual Foster Wheeler Ltd, 1997).

2.1.5 Sistem 125 VDC

Sistem baterai 125 VDC terdiri dari sebuah baterai, pengisi baterai dan DC panel kontrol. Baterai dan pengisi terhubung ke panel kontrol melalui sirkuit *breaker* 800-A. Pengisi baterai ini memberikan :

1. Pengisian mengambang atau penyeragam pengisian ke baterai
2. Tenaga ke semua beban DC yang terkait ke panel sirkuit DC.

Pengisian baterai dipantau oleh sebuah voltmeter yang ada di panel sirkuit DC dan tersambung ke DC *Bus* melalui sirkuit *breaker* 15 ampere. Jika baterai diisi secara *floating*, tegangan DC *Bus* menjadi kurang lebih 131 volt DC dari positif ke negatif untuk baterai modular tersegel yang digunakan. Sebuah relai tegangan rendah dan relai *groundfault* dihubungkan ke bus melalui *breaker* 15 ampere yang sama. Kontak *alarm* dari relai ini disambung ke *alarm master* yang tersambung ke DCS.

Inverter dirancang dengan fitur *redundansi* daya, dalam kondisi di mana sumber daya DC utama mengalami kegagalan, sakelar *bypass* statik akan secara

otomatis beralih ke sumber daya AC alternatif. Sumber AC alternatif ini umumnya diambil dari salah satu unit. Sebagai langkah mitigasi risiko terhadap gangguan daya yang lebih luas, sistem dilengkapi dengan sakelar *transfer* manual. Sakelar ini memungkinkan untuk secara manual memindahkan beban ke sumber daya AC unit yang lainnya.

2.1.5.1 Baterai

Baterai adalah sebuah sel listrik yang didalamnya berlangsung proses elektrokimia yang *reversibel* (dapat berbalikan) dengan efisiensinya yang tinggi. Pada proses elektrokimia *reversibel*, di dalam baterai berlangsung proses pengubahan kimia menjadi tenaga listrik (proses pengosongan), dan sebaliknya dari tenaga listrik menjadi tenaga kimia, pengisian kembali dengan cara regenerasi dari elektroda yang dipakai, yaitu dengan melewati arus listrik dalam arah (polaritas) yang berlawanan di dalam sel. Jenis sel baterai ini disebut juga baterai *storage*, adalah suatu baterai yang dapat digunakan berulang kali pada keadaan sumber listrik arus bolak-balik (AC) terganggu (Abimanyu, 2021).

Waktu Pemakaian baterai dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut (Hutagaol, Dkk.2022) :

$$\text{Waktu pemakaian baterai} = \frac{\text{Kapasitas baterai (Ampere.Jam)}}{\text{Arus Motor (Ampere)}} \quad (1)$$



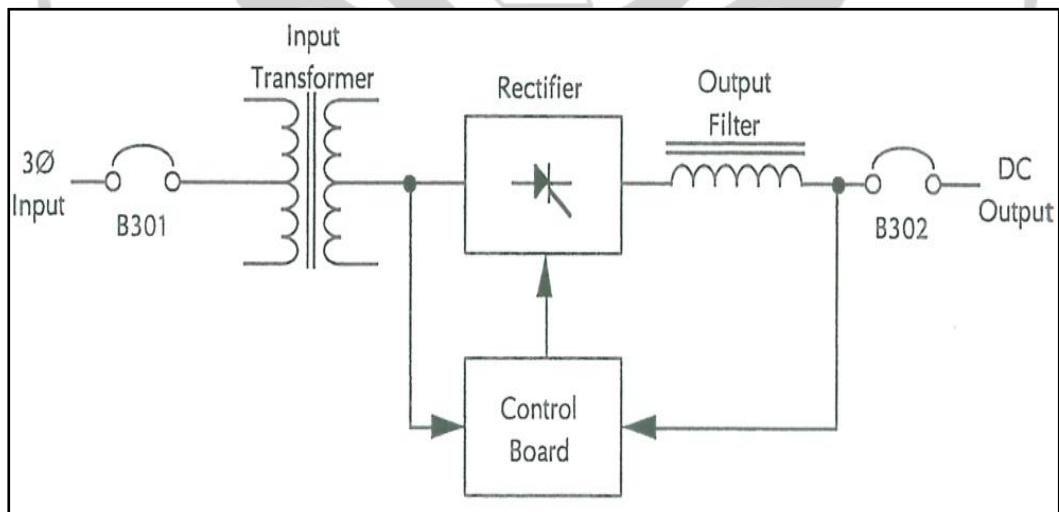
Gambar 2.6. Baterai *Emergency*
Sumber: PLTU XYZ

Baterai darurat PLTU PT. XYZ seperti terlihat pada gambar 2.6 pada setiap unit, terdiri dari 58 sel dengan tegangan 125 VDC, tipe baterai yang digunakan AT-27P (*Lead-calsium battery*), kapasitas 1560 AH/10 jam dan tegangan setiap sel 1.75 V.

2.1.5.2 Baterai Charger

Charger yang sering juga disebut konverter adalah suatu rangkaian peralatan listrik yang digunakan untuk mengubah arus listrik bolak balik (AC) menjadi arus listrik searah (DC), yang berfungsi untuk pasokan DC daya baik ke peralatan-peralatan yang menggunakan sumber DC maupun untuk mengisi baterai agar kapasitasnya tetap terjaga penuh sehingga keandalan unit pembangkit tetap terjamin. Dalam hal ini baterai harus selalu tersambung ke *rectifier*. Kapasitas *rectifier* harus disesuaikan dengan kapasitas baterai yang terpasang, setidaknya kapasitas arusnya harus mencukupi untuk pengisian baterai sesuai jenisnya yaitu untuk baterai alkali adalah $0,2 C$ ($0,2 \times$ kapasitas) sedangkan untuk baterai asam adalah $0,1C$ ($0,1 \times$ kapasitas) ditambah beban statis (tetap) pada unit pembangkit. Sumber tegangan AC untuk baterai pengisi tidak boleh padam atau mati. Untuk itu pengecekan tegangan harus secara rutin dan periodik dilakukan baik tegangan masukannya (AC) maupun tegangan keluarannya (DC) (Abimanyu, 2021).

, Diagram baterai *charger* pada gambar 2.7, pada PT. XYZ memiliki tegangan masuk $480 V_{AC}$ 3 fasa, 60 Hz, *Max* 118 Amps, tegangan keluar 400 A, 130 VDC nominal dengan arus terbatas pada 125%.



Gambar 2.7. Diagram Baterai *Charger*
Sumber: Solidstate Control, Inc. Operation Manual Book

Transformator daya tiga fasa menerima arus listrik bolak-balik (AC) dari sumber utama dan mengubahnya menjadi tegangan AC yang lebih rendah. Tegangan ini kemudian diubah menjadi arus searah (DC) melalui penyearah gelombang penuh tiga fasa yang menggunakan komponen SCR (B301-302). SCR

diatur dengan presisi untuk menjaga stabilitas arus DC yang keluar, meskipun ada fluktuasi pada arus AC yang masuk. Kumputan sekunder transformator menyediakan daya untuk sinkronisasi dan kontrol, sementara sekering daya melindungi SCR dari kerusakan. (Solidstate Control, Inc. Operation Manual, 1997)

Proses *charging* baterai terdiri dari 2 jenis yaitu:

1. *Floating*

Floating adalah jenis pengisian ke baterai untuk menjaga keadaan baterai dalam keadaan terisi penuh dan baterai tidak mengeluarkan maupun menerima arus listrik saat mencapai tegangan *floating* dan baterai tetap tersambung ke baterai dan beban. Pada Gardu Induk umumnya menggunakan sistem *floating*, bila sumber AC hilang atau pengisi daya baterai terganggu, maka beban langsung disuplai dari baterai.

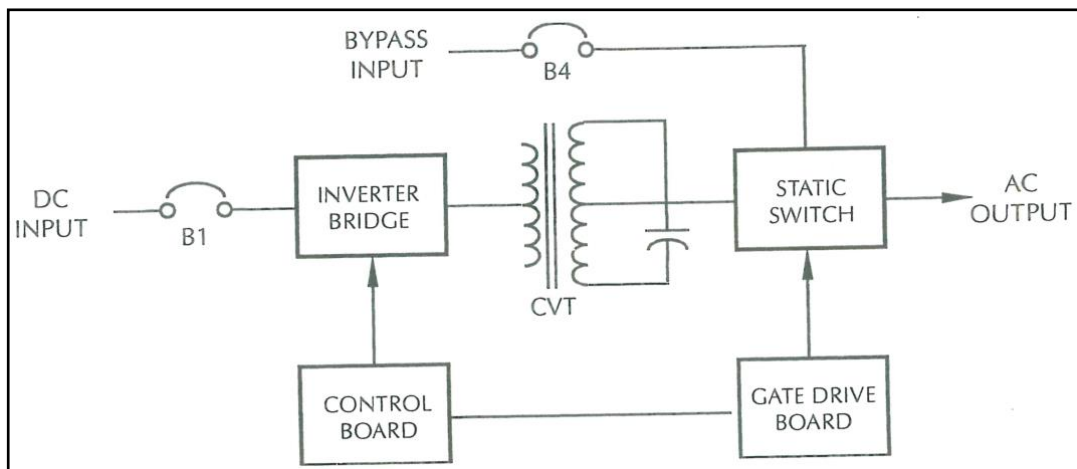
2. *Equalizing*

Equalizing adalah jenis pengisian baterai untuk menyamakan/meratakan tegangan karena terjadi perbedaan tegangan setiap sel. *Equalizing* adalah jenis pengisian baterai untuk menyamakan/meratakan tegangan karena terjadi perbedaan tegangan setiap sel. Baterai yang disusun seri memungkinkan terjadinya ketidakseimbangan antar sel dikarenakan perbedaan karakteristik kimia dan kelistrikan pada setiap selnya. Ketidakseimbangan antar sel baterai ini dapat mengurangi total kapasitas dan umur dari baterai. Oleh karena itu, diperlukan *equalizer* pengisi untuk mengatasi hal tersebut. *Equalizing* diperlukan agar tidak terjadi perbedaan kapasitas pengisi pada setiap sel baterai. Dengan adanya *equalizing* ketika proses *charging* maka salah satu baterai tidak ada yang mengalami *overcharged* karena perbedaan kapasitas terisi (Arifin, 2020).

2.1.5.3 Inverter

Inverter berfungsi mengubah arus DC (*Direct Current*) menjadi AC (*Alternating Current*). Sistem AC Vital 120 VAC ini terdiri dari daya panel distribusi yang memberi tenaga ke DCS dan beban AC vital lainnya. Tenaga ke panel ini biasanya disuplai dari *inverter* melalui kontrol panel DC dan baterai. Terlihat pada Gambar 2.8, arus searah yang disuplai melalui input DC dialirkan menuju jembatan *inverter* setelah melewati sakelar utama. Di bawah kendali *panelboard*, *inverter* mengubah arus searah menjadi arus bolak-balik. Tegangan

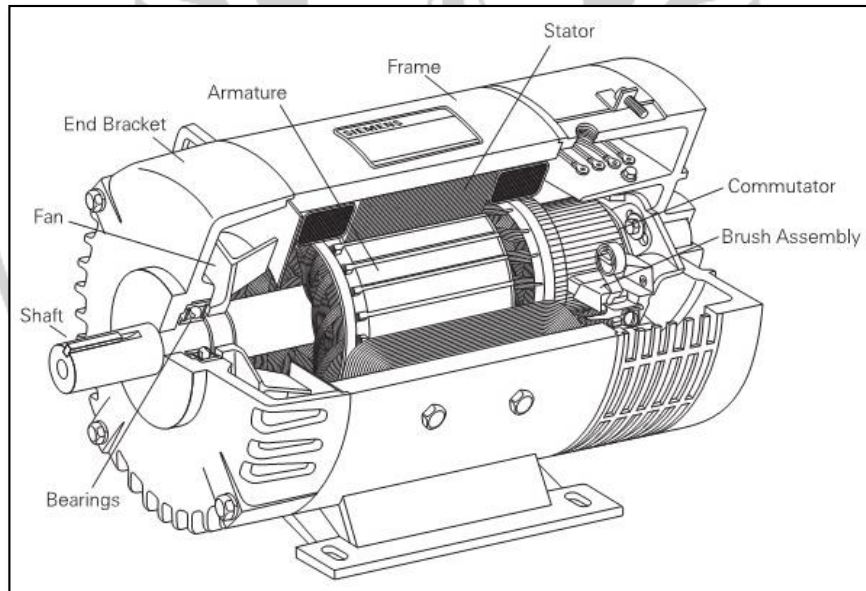
AC yang dihasilkan kemudian distabilkan oleh transformator tegangan konstan sebelum disalurkan ke beban melalui keluaran AC.



Gambar 2.8. Diagram Alur Sistem Inverter
Sumber: Solidstate Control, Inc. Operation Manual Book

2.1.5.4 Motor DC

Motor DC memerlukan suplai tegangan searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Kumparan medan pada motor DC disebut stator



Gambar 2.9. Motor DC
Sumber: Automation Indonesia <https://automation.or.id>

(bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar) seperti pada gambar 2.9. Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam pada medan magnet, maka akan timbul tegangan (GGL) yang berubah-ubah arah pada setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan bolak-balik.

Prinsip kerja motor DC yaitu ketika tegangan diterapkan pada kumparan stator sebuah elektromagnet dengan kutub utara dan selatan dibuat. Medan magnet yang dihasilkan adalah statis (tidak berputar). Untuk menjelaskan, stator akan direpresentasikan oleh magnet permanen. Motor *Direct Current* (DC) adalah perangkat elektromagnet yang mengonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Desain awal perangkat ini diperkenalkan oleh Michael Faraday. Motor DC digunakan dalam aplikasi khusus yang memerlukan torsi awal yang tinggi atau percepatan yang konstan. (Santosa dan Nugroho, 2021).

Hubungan daya dan motor :

$$P = V \times I \quad (2)$$

Dimana :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Ampere (A)

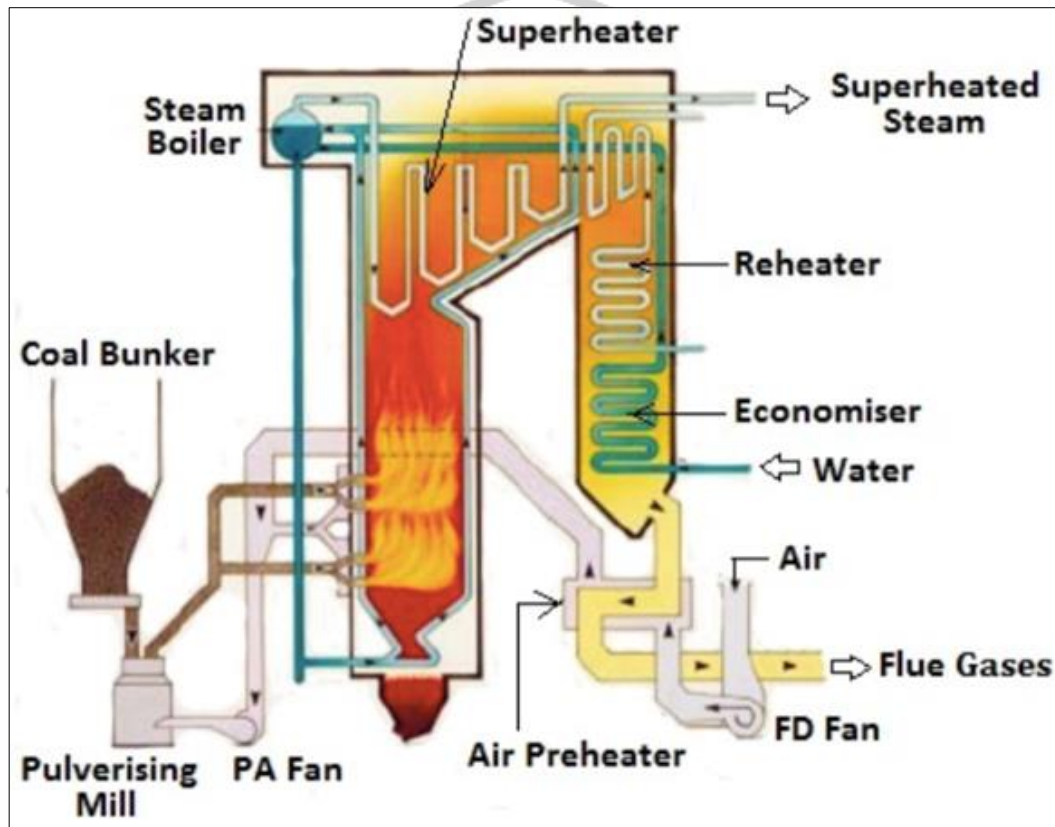
Motor DC berputar sebagai hasil dari dua medan magnet yang berinteraksi satu dengan lainnya. Medan magnet yang pertama dari *field* yang terdapat pada kumparan stator. Medan magnet kedua terdapat pada *armature*. Ketika arus mengalir melalui konduktor, medan magnet dihasilkan di sekeliling konduktor.

2.1.6 Boiler

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau uap. Mekanisme kerja boiler dapat dilihat pada Gambar 2.10. Air panas atau uap pada tekanan tertentu digunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Sistem boiler terdiri dari: sistim air umpan, sistim uap, dan sistim bahan bakar. Sistim air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan uap. Sistim uap mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam boiler. Pada keseluruhan sistem, tekanan uap diatur menggunakan katup dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem. Air yang disuplai ke boiler untuk diubah menjadi uap disebut air umpan. Dua sumber air umpan adalah :

- (1) Kondensat atau uap yang mengembun yang kembali dari proses
- (2) Air *make up* (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang *boiler* dan proses pengolahan air *demineralizer*.

Untuk mendapatkan efisiensi boiler yang lebih tinggi, digunakan *economizer* untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang sehingga didapatkan efisiensi yang maksimal.



Gambar 2.10. Boiler Steam PLTU
Sumber: <https://pttensar.com>

Boiler PT. XYZ berkapasitas 600,000 lb/jam menggunakan Pulverized Coal (P.C.) (Operating and Maintenance Manual Foster Wheeler Ltd, 1997). “*Coal Fired Steam Generating Units*” diproduksi oleh Foster Wheeler Limited. Komponen-komponen boiler sebagai berikut:

1. Economizer

Economizer diproduksi oleh Eco Inc. Panjang alat ini 33,833 ft dengan tinggi 18 ft dan lebar 11,667 ft dengan laju alir gas buang 756.790 lb/jam. *Economizer* dilengkapi dengan 1776 tabung dengan ukuran diameter luar 2,0 inci untuk total area penukar panas sebesar 27.897 ft². Air ini masuk ke *inlet header* untuk distribusikan ke pipa (*tube*) dan akan keluar dari *outlet header* di bagian atas unit

ini. Gas buang boiler akan disalurkan ke bagian atas dan keluar dari bagian bawahnya.

2. *Drum Uap*

Drum uap merupakan komponen krusial dalam sistim boiler yang berfungsi sebagai pemisah antara fase cair (air) dan fase uap. Komponen ini berbentuk silinder dengan panjang 20 kaki dan diameter dalam 66 inci. Di dalam *drum* uap, terdapat pemisah yang membagi ruang menjadi zona air dan zona uap. Tingkat air dalam *drum* dijaga konstan pada ketinggian 4 inci di bawah garis tengah. Untuk menjaga kualitas air boiler, sistem pengolahan kimia secara terus-menerus menginjeksikan bahan kimia tertentu. Proses *blowdown* dilakukan secara berkala untuk membuang padatan terlarut seperti silika dan kontaminan lainnya. Uap jenuh yang dihasilkan dalam *drum* uap kemudian dialirkan ke separator uap dan *chevron dryer* untuk menghilangkan kandungan air. Uap kering hasil pengeringan selanjutnya disalurkan ke *superheater* primer untuk dinaikkan suhunya. Sebagai sistem pengaman, *drum* uap dilengkapi dengan katup pengaman yang akan terbuka secara otomatis jika tekanan dalam *drum* uap melebihi batas yang telah ditetapkan.

3. *Tube Sections*

Setiap bagian tabung akan diisi dari sebuah *inlet header* dan uap atau air akan keluar dari bagian tersebut melalui sebuah *outlet header*. Air dari *drum* uap akan mengisi tabung-tabung di dinding depan, samping dan belakang dimana semuanya akan kembali ke bagian atas *drum* uap. Uap saturated dari *drum* uap tersebut akan dialirkan ke *primary superheater*, yang selanjutnya akan mengisi atau lanjut ke final atau *secondary superheater* untuk dipanaskan.

4. *Boiler Uap Outlet Line*

Boiler uap *outlet line* dihubungkan ke *outlet* di bagian final *superheater*, saluran ini berfungsi untuk mengarahkan uap ke katup henti turbin. Ada sebuah *vent valve*, *check valve* untuk mencegah aliran balik, katup pengaman diatur pada tekanan 1745 psig dan PARV (*Power Actuated Relief Valve*) untuk mencegah *safety valve* beroperasi serta mengendalikan tekanan yang berlebihan kepada operator. Saluran ini akan beroperasi dengan tekanan 1680 psig bila disetel ke *mode* AUTO. Tekanan *transmitter* di dekat turbin akan menyuplai sinyal untuk kontrol turbin/generator berdasarkan pada tekanan masuk. Ada sebuah perangkat saluran

(*drain assembly*) untuk membuang uap air dari titik-titik rendah pada perangkat pipa. Sebuah *motor operated valve* (MOV) disediakan pada perangkat saluran tersebut untuk menghangatkan pipa selama pengaktifan unit ini.

2.1.6.1 Padam Total dan Proses *Start-up Boiler*

2.1.6.1.1 Padam Total

Padam total atau *blackout* adalah gangguan kehilangan daya pembangkitan yang tidak diinginkan tetapi tidak dapat dihindarkan. Apabila terjadi padam total, unit pembangkit mengalami *trip* (keluar dari operasi) sehingga kemampuan pembangkitan akan sangat menurun dan mengakibatkan terjadinya pelepasan beban (*shedding load*) yang mungkin bisa mencapai 100% (Samsurizal dkk, 2021). Padam total juga disebabkan oleh kegagalan unit dan akibat *force majeure* sehingga harus ada langkah untuk menormalkan sistem dalam arti memulihkan kemampuan pembangkitan dan melayani para pemakai tenaga listrik secara normal kembali.

Pada saat terjadi padam total, uap yang tertinggal di dalam boiler masih mengandung energi yang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E_{\text{uap}} = m_{\text{uap}} \times h_{\text{uap}} \quad (3)$$

Dimana :

E_{Uap} : Energi Uap (BTU/Hr)

M_{Uap} : Massa Uap (Klb/Hr)

H_{Uap} : Entalpi Uap (BTU/Klb)

Untuk pemulihan sistem tenaga listrik setelah padam total secara garis besar diperlukan langkah mengidentifikasi permasalahan yang mengakibatkan padam total, sambil menunggu suplai daya, operator akan mempersiapkan peralatan-peralatan yang akan jalan saat pembangkit untuk melakukan *start-up (blackstart)* dan menutup semua katup yang menyebabkan kehilangan tekanan dan penurunan temperatur.

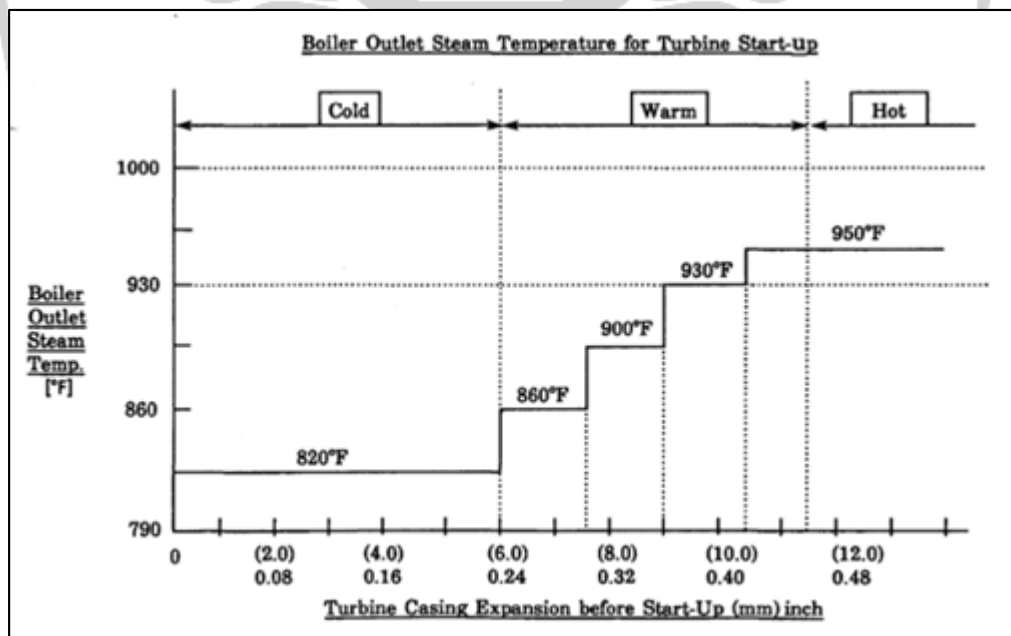
2.1.6.1.2. *Start-up*

Pada proses pembangkitan, bahan bakar utama yang digunakan pada PLTU sebagian besar menggunakan batu bara, tetapi pada proses penyalaan awal boiler tidak bisa langsung menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya, karena temperatur di ruang bakar masih rendah. Untuk menaikkan temperatur ruang bakar

pada saat *start-up* unit, PLTU PT. XYZ menggunakan HSD (*High Speed Diesel*) sebagai bahan bakarnya. Pada gambar 2.11 memperlihatkan *mode start-up* dan *set poin* temperatur uap utama yang dipersyaratkan untuk memutar turbin utama pada PLTU PT. XYZ. Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan *start-up* pada mode dingin sekitar 8-12 jam, untuk mode hangat sekitar 6 jam sedangkan mode panas sekitar 2 jam.

Mode *start-up* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) biasanya dilakukan dalam beberapa situasi khusus, seperti :

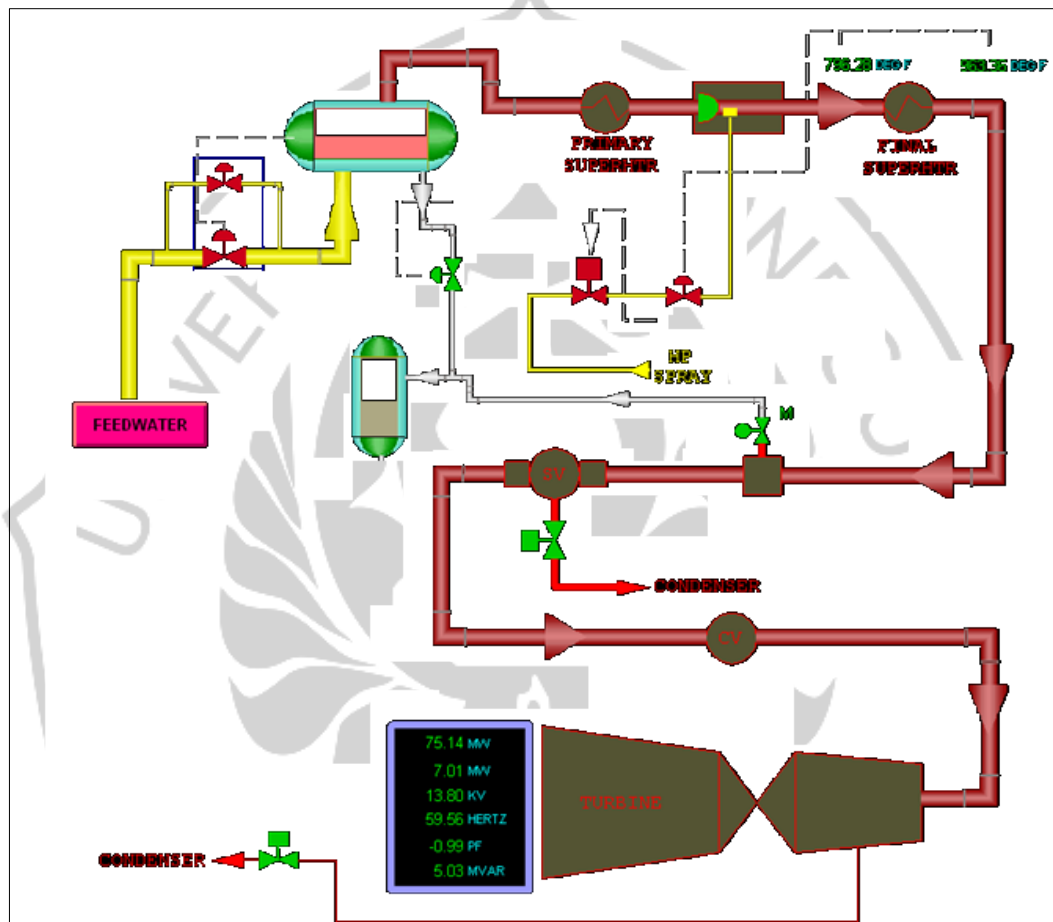
- Ketika PLTU telah selesai menjalani perawatan atau perbaikan, mode *start-up* diperlukan untuk memulai operasi kembali.
- Jika PLTU telah dimatikan, baik karena alasan darurat atau penjadwalan, mode *start-up* akan diaktifkan untuk menghidupkan kembali pembangkit.
- Saat PLTU pertama kali dioperasikan atau setelah periode tidak aktif yang panjang, mode *start-up* digunakan untuk memulai proses produksi listrik.
- Jika sistem keamanan PLTU mendeteksi masalah dan melakukan *trip* (memutus aliran listrik secara otomatis), *mode start-up* diperlukan setelah masalah tersebut diatasi.



Gambar 2.11. Pemuaian Turbin Casing vs Temperatur uap utama (Main Steam)
Sumber: Instruction Manual for Steam Turbine Duke/Fluor Daniel

2.1.7 Pompa Pelumasan Darurat Berpenggerak Turbin Uap Mini

Ketika terjadi padam total tiba-tiba, uap akan tertahan di dalam drum uap. Uap tersebut tidak dibuang, melainkan dipanaskan kembali saat proses *start-up* dilakukan. Terlihat pada gambar 2.12 skema alur uap sebelum dimodifikasi dengan penambahan aliran ke uap turbin penggerak motor DC.



Gambar 2.12. Sistem Aliran Uap sebelum dimodifikasi
Sumber: PID PLTU XYZ

Uap yang tersisa di dalam drum uap dirancang untuk mengalir ke turbin mini yang dikopel dengan pompa pelumasan darurat. Sistem ini digunakan untuk menggerakkan turbin mini, yang dikopel dengan pompa oli pelumas darurat seperti pada gambar 2.12 berikut, dengan modifikasi penambahan sistem pompa pelumasan darurat penggerak turbin uap.

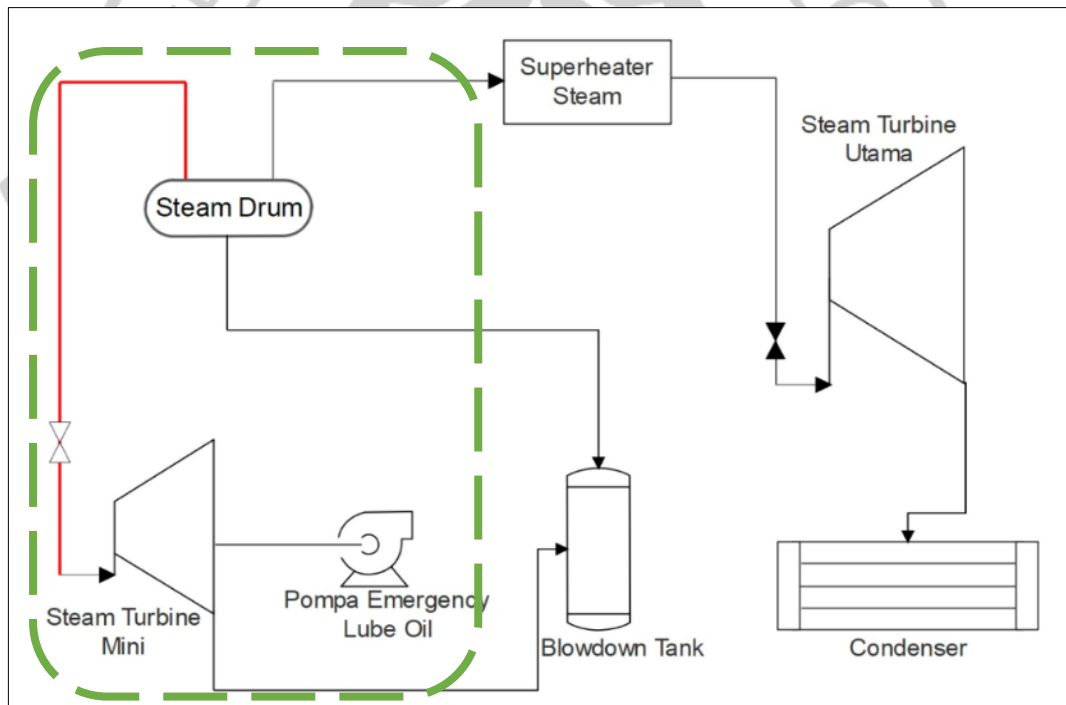
Sistem pompa oli pelumas darurat akan memberikan perlindungan untuk sistem oli pelumas turbin dan generator. Jika sistem utama mengalami gangguan, sistem pompa oli ini akan secara otomatis aktif untuk mencegah kerusakan pada

turbin akibat kekurangan oli pelumasan.

Sistem ini akan mulai beroperasi secara otomatis dalam kondisi berikut:

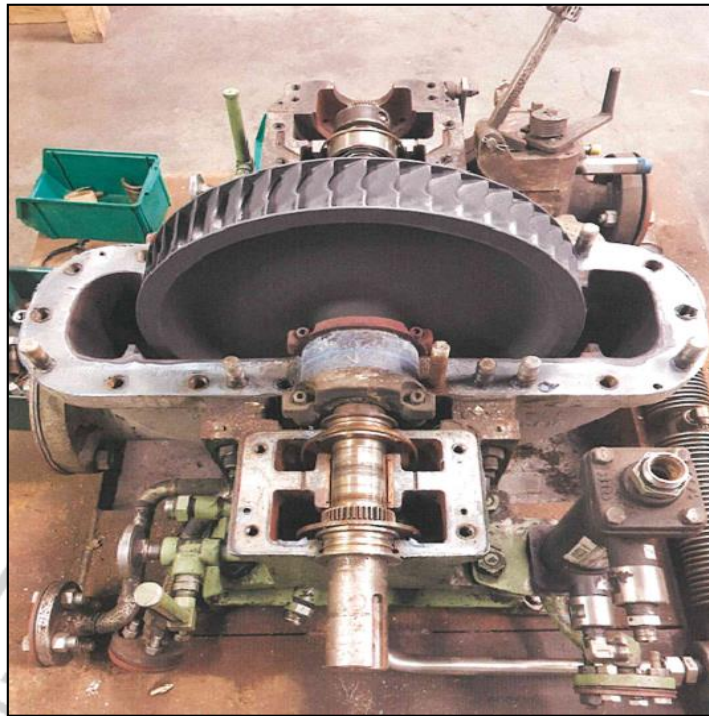
- Ketika kedua pompa AC yang biasanya digunakan tidak berfungsi.
- Jika tekanan oli di pipa utama yang mendistribusikan oli ke seluruh sistem terlalu rendah.
- Ketika pasokan listrik AC atau udara instrumen terputus, sehingga seluruh unit tidak dapat beroperasi.

Seperti terlihat pada gambar 2.13 berikut ini, ketika terjadi padam total maka sebuah katup kontrol akan membuka dan mengalirkan uap ke turbin mini dan akan berputar pada suatu poros yang kemudian dikopel dengan sebuah pompa pelumasan darurat.



Gambar 2.13. Sistem Pompa Pelumasan Darurat Penggerak Turbin uap
Sumber: PLTU XYZ

Turbin satu tingkat dengan desain roda solid TERRY seperti terlihat pada gambar 2.14. Turbin ini dirancang untuk kondisi masuk uap dengan tekanan 600 psig dan suhu 650°F, serta tekanan keluar 20 psig.



Gambar 2.14. Turbin Uap Model 18 ZS-1
Sumber: PLTU XYZ

Turbin ini akan menghasilkan daya 13 HP pada putaran konstan 1800 rpm. Kecepatan turbin akan diatur secara otomatis dengan batas putaran maksimum 2174 rpm (115% dari kecepatan maksimum normal), seperti turbin uap dapat dilihat pada tabel 2.2.

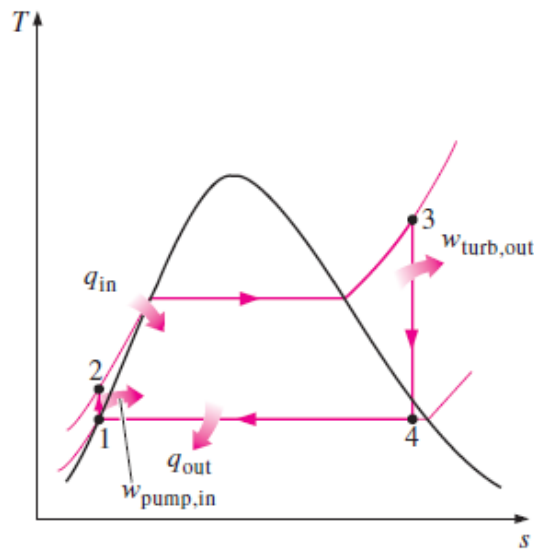
Tabel 2.2. Spesifikasi turbin uap penggerak pompa pelumasan darurat
Sumber: Terry Kunhert & Tubodyne, 2007

Spesifikasi	Satuan	Rated	Normal
Coupling Output	HP	15,7	15,7
Turbin Speed	RPM	1800	1800
Inlet Pressure	PSIg	600	600
Inlet Temperature	°F	650	650
Exhaust Pressure	PSIg	20,0	20,0
Exhaust temperature	°F	487	487

Untuk memahami dan mengoptimalkan proses konversi energi panas menjadi energi mekanik diperlukan analisa termodinamika pada turbin uap menggunakan siklus Rankine, yang terdiri dari 2 jenis siklus yaitu:

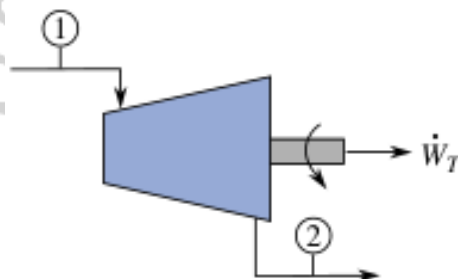
- 1) Siklus terbuka, dimana sisa uap dari turbin langsung dipakai untuk keperluan proses.

- 2) Siklus tertutup, dimana uap bekas dari turbin dapat digunakan kembali dengan cara mendinginkannya dengan menggunakan kondensor, kemudian akan dihasilkan titik-titik air yang dialirkan menuju kolam penampungan untuk dipompakan menuju boiler kembali.



Gambar 2.15. Diagram Temperatur (T) - Enthalpy (s) siklus Rankine
Sumber : Chenges, Y.A., & Boles M.A., Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th edition

Pada gambar 2.15 terdapat beberapa proses pada siklus Rankine sederhana, yaitu: 1-2 : Proses pemompaan isentropik pada pompa, 2-3 : Proses pemanasan pada tekanan konstan dalam ketel uap, 3-4 : Proses ekspansi isentropik di dalam turbin, 4-1 : Proses pengeluaran kalor pada tekanan konstan (Santoso, 2018) Pada studi kasus pompa pelumasan darurat penggerak turbin uap, analisis menggunakan siklus terbuka karena uap turbin langsung dipakai dan dibuang ke tanki *blowdown*.



Kerja yang dihasilkan oleh turbin uap dapat dihitung dengan persamaan :

$$W_T = m \times (h_1 - h_2) \quad (4)$$

dimana :

- W_T = Kerja Turbin (BTU)
- m = Massa Steam (Klb)
- h_1 = Entalpi Uap Masuk Turbin (BTU/Klb)
- h_2 = Entalpi Uap keluaran turbin (BTU/Klb)

Persamaan ini didasarkan pada prinsip konservasi energi. Energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, hanya dapat diubah bentuknya. Dalam kasus ini, energi mekanik yang kita berikan diubah menjadi energi laten uap. Energi laten uap adalah energi yang diserap oleh suatu zat ketika berubah fase dari cair menjadi gas tanpa adanya perubahan suhu. Persamaan ini secara sederhana menyatakan bahwa jumlah uap yang dibutuhkan untuk suatu proses sebanding dengan jumlah energi yang kita berikan dan berbanding terbalik dengan jumlah energi yang dibutuhkan untuk mengubah satu *pound* (lb) air menjadi uap. Semakin besar energi yang kita berikan, semakin banyak uap yang dibutuhkan. Sebaliknya, semakin besar energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air, semakin sedikit uap yang dibutuhkan untuk jumlah energi yang sama. (Roberth T. Balmer, 2011).

2.2. Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi merupakan cara untuk mengetahui indikator penilaian investasi, apakah layak dijalankan atau tidak, serta memberikan informasi waktu pengembalian modal cepat atau lama. Hal ini diperlukan untuk menyiapkan investasi agar dapat mengetahui risiko yang akan terjadi serta penanggulangannya. Investasi pada sistem yang sudah ada berupa penambahan perangkat ataupun penambahan sistem baru yang bisa mempertahankan atau menambah keandalan suatu sistem membutuhkan pertimbangan matang, baik dari sisi teknis maupun ekonomi. Untuk itu, diperlukan kerangka acuan analisis tekno ekonomi yang komprehensif. Analisis ini akan mengkaji teknik baru, dan mengevaluasi aspek ekonominya

Penilaian investasi juga diperlukan sebagai prediksi keuntungan dalam jangka waktu yang akan datang, peneliti menggunakan beberapa metode analisis ekonomi yang umum digunakan yaitu :

1. CAPEX (*Capital Expenditure*)

Capital expenditure (CAPEX) adalah rencana pengeluaran atau investasi terhadap aset-aset yang akan digunakan perusahaan untuk membeli atau meningkatkan aset jangka panjang untuk operasional bisnis dan meminimalkan resiko. Aset jangka panjang berupa aset fisik seperti properti, pabrik, gedung, kendaraan, atau peralatan. Pengeluaran CAPEX dicatat sebagai aset tetap pada laporan keuangan neraca dan dapat didepresiasi selama masa manfaatnya. Biaya depresiasi ini dikurangkan dari pendapatan untuk menghasilkan laba bersih.

2. OPEX (*Operational Expenditure*)

Operational Expenditure (OPEX) merupakan pengeluaran yang berkaitan dengan biaya operasional dan kegiatan sehari-hari bisnis. OPEX mempengaruhi laporan keuangan pada laporan laba rugi, Pengeluaran OPEX dicatat sebagai biaya operasional pada laporan keuangan laba rugi dan dikurangkan dari pendapatan untuk menghasilkan laba bersih.

3. Analisis biaya manfaat

Analisis biaya-manfaat dilakukan dengan membandingkan investasi yang diperlukan untuk pemasangan pompa pelumasan darurat penggerak turbin uap dengan kemungkinan kerugian yang ditimbulkan jika terjadi kegagalan pada sistem pelumasan darurat. Hal ini membantu dalam menentukan apakah investasi tersebut layak dilakukan dengan mempertimbangkan potensi keuntungan dan penghematan biaya yang dapat diperoleh.

2.3. Analisis Statistik

Uji-t sampel berpasangan merupakan teknik inferensial yang lazim digunakan dalam analisis statistik untuk membandingkan rata-rata dua kelompok data yang saling berpasangan. Pasangan data ini umumnya diperoleh dari pengukuran yang dilakukan pada subjek yang sama pada dua kondisi berbeda (misalnya, sebelum dan sesudah suatu *intervensi*) atau pada pasangan subjek yang memiliki karakteristik yang serupa (misalnya, kembar identik).

Uji-t sampel berpasangan memiliki beberapa karakteristik dan asumsi yang perlu diperhatikan :

- Data berpasangan : Setiap observasi dalam satu kelompok memiliki pasangan yang unik pada kelompok lainnya.
- Distribusi normal : Perbedaan antara nilai-nilai dalam setiap pasangan diasumsikan mengikuti distribusi normal. Asumsi ini penting untuk validitas uji statistik.
- Varians konstan : Varians dari perbedaan antara pasangan data diasumsikan konstan.

Tujuan utama dari uji-t sampel berpasangan adalah untuk menguji hipotesis nol (H_0) yang menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antara kedua kelompok data. Dengan kata lain, uji ini bertujuan untuk mengidentifikasi apakah terdapat efek yang signifikan dari suatu perlakuan atau perubahan kondisi terhadap variabel yang diukur.

Hipotesis yang umum diajukan dalam uji-t sampel berpasangan adalah sebagai berikut:

- Hipotesis nol (H_0) : $\mu_1 - \mu_2 = 0$ (Tidak ada perbedaan rata-rata antara kedua kelompok)
- Hipotesis alternatif (H_1) : $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ (Terdapat perbedaan rata-rata antara kedua kelompok)
 - μ_1 : Rata-rata populasi kelompok pertama
 - μ_2 : Rata-rata populasi kelompok kedua
- Jika nilai p yang diperoleh dari uji-t lebih kecil dari tingkat signifikansi yang telah ditentukan (misalnya, $\alpha = 0.05$), maka hipotesis nol ditolak. Hal ini mengindikasikan adanya bukti yang cukup kuat untuk menyimpulkan bahwa terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antara kedua kelompok data.

