

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Panas Bumi

Energi panas bumi adalah energi panas yang tersimpan dalam bentuk batuan atau fluida yang terkandung di bawah permukaan bumi. Energi panas bumi telah dimanfaatkan untuk pembangkit listrik di Italia sejak tahun 1913 dan di Selandia Baru sejak tahun 1958. Pemanfaatan energi panas bumi untuk sektor non listrik (*direct use*) telah berlangsung di Islandia sekitar 70 tahun lalu. Meningkatnya kebutuhan akan energi serta meningkatnya harga minyak, khususnya pada tahun 1973 dan 1979 telah memacu negara-negara lain, termasuk Amerika Serikat untuk mengurangi ketergantungan mereka pada minyak dengan cara memanfaatkan energi panas bumi. (El-Wakil, 1985)

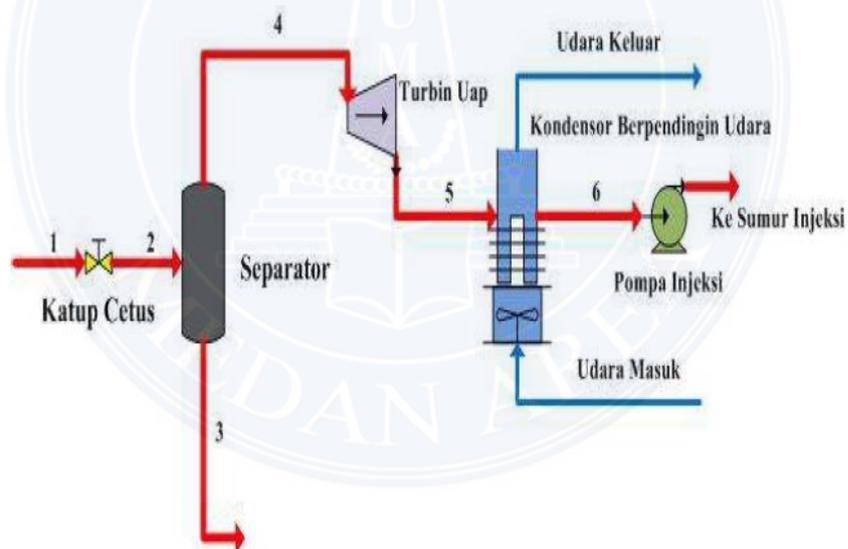
Indonesia memiliki potensi sumber daya panas bumi yang sangat besar yaitu sekitar 28,5 GWe. Potensi ini setara dengan 12 milyar barel minyak bumi untuk masa pengoperasian 30 tahun. Hal ini menempatkan Indonesia sebagai salah satu negara terkaya potensi energi yang ramah lingkungan ini. (Badan Geologi, 2009)

Berdasarkan proses pengolahan fluida panas bumi, sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi dapat dibagi menjadi beberapa macam siklus [1], namun dalam tugas akhir ini tidak akan seluruhnya dibahas, yang akan dibahas adalah

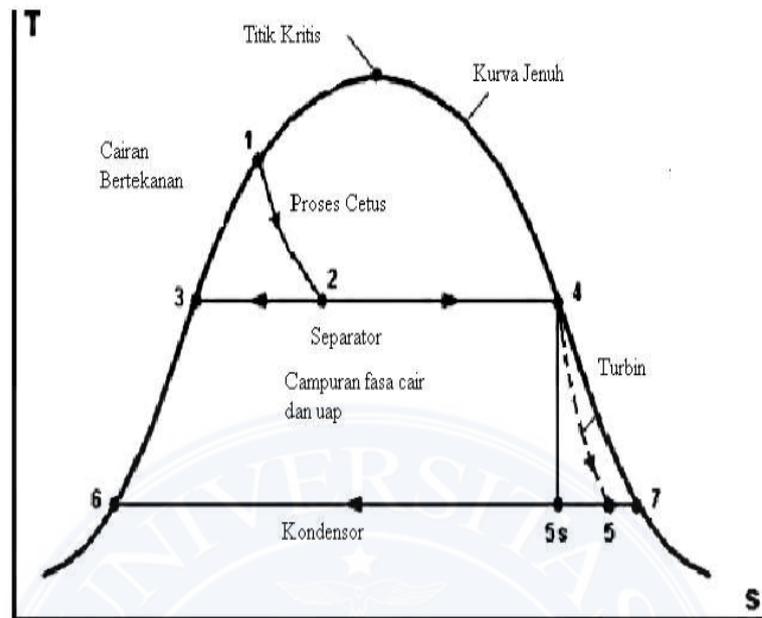
1. Siklus Uap Cetus Tunggal (*Single Flash Steam Cycle*)
2. Siklus Biner (*Binary Cycle*)
3. Siklus Kombinasi (*Combined Cycle*)

3.1.1. Siklus Uap Cetus Tunggal

Siklus ini paling banyak digunakan untuk kondisi sumur produksi yang didominasi oleh fasa cair. Zat cair tersebut diekspansi dengan katup (sistem *flash*), sehingga tekanannya akan turun dan terbentuk fasa campuran uap dan cair. Kemudian campuran tersebut dimasukkan dalam separator untuk dipisahkan, fasa uap digunakan untuk menggerakkan turbin uap dan zat cair (*brine*) sisanya disuntikkan kembali ke dalam sumur injeksi. Skema dari cetus tunggal sederhana ditunjukkan oleh Gambar 3.1, sedangkan proses yang terjadi digambarkan pada diagram T-s yang ada pada gambar 3.2



Gambar 3.1 : Skema siklus uap cetus tunggal sederhana

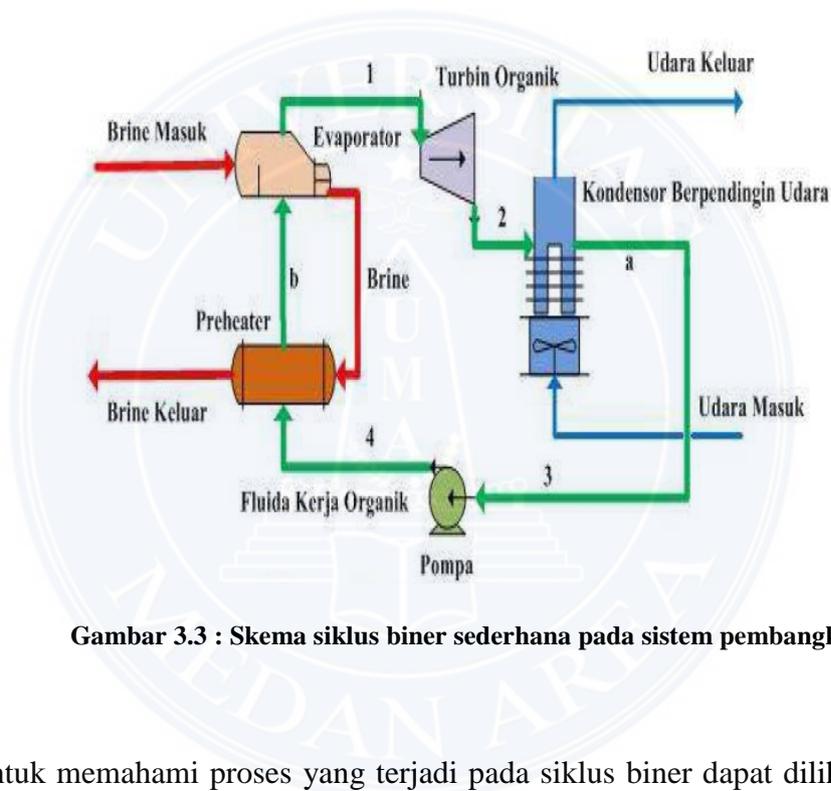


Gambar 3.2 : Skema siklus uap cetus tunggal sederhana. [1]

3.1.2. Siklus Biner

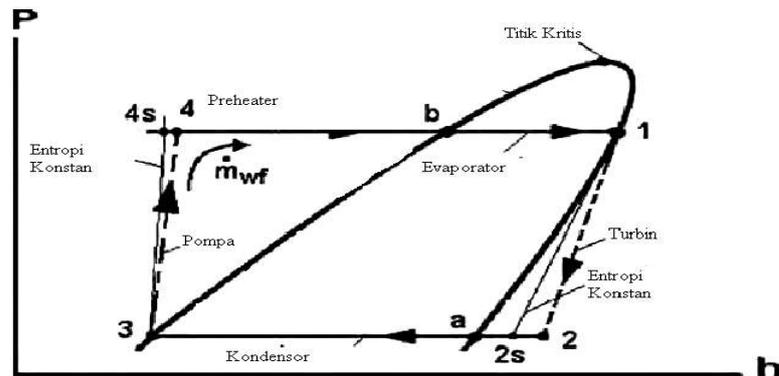
Siklus ini digunakan apabila sumur produksi memiliki temperatur yang tidak terlalu tinggi ($125-225^{\circ}\text{C}$), sehingga kurang efektif dan ekonomis biladigunakan untuk temperatur sumber yang tinggi (Badan Geologi, 2010). Denganmemanfaatkan temperatur yang tidak terlalu tinggi, diperlukan fluida kerja lainyang memiliki titik didih di bawah titik didih air, sehingga fluida kerja yang tepatuntuk digunakan adalah fluida kerja organik. Fluida kerja organik memilikitemperatur didih yang rendah, sehingga panas yang tidak terlalu tinggi dapatdimanfaatkan untuk menghasilkan uap. Uap tersebut digunakan untukmenggerakkan turbin yang ada di PLTP, yang umum disebut sebagai siklus biner.

Prinsip kerja siklus biner dengan memanfaatkan adanya penukar panas (*heat exchanger*), panas yang dimiliki oleh *brine* dapat dimanfaatkan oleh fluidakerja organik untuk menggerakkan turbin dan pada akhirnya dapat menghasilkan listrik. Pada Gambar 3.3 ditampilkan gambar skematik dari siklus biner.



Gambar 3.3 : Skema siklus biner sederhana pada sistem pembangkit.

Untuk memahami proses yang terjadi pada siklus biner dapat dilihat dengan digram P-h seperti Gambar 3.4 dibawah ini. Pada digram P-h dapat dilihat juga perubahan fasa yang terjadi dalam siklus biner.

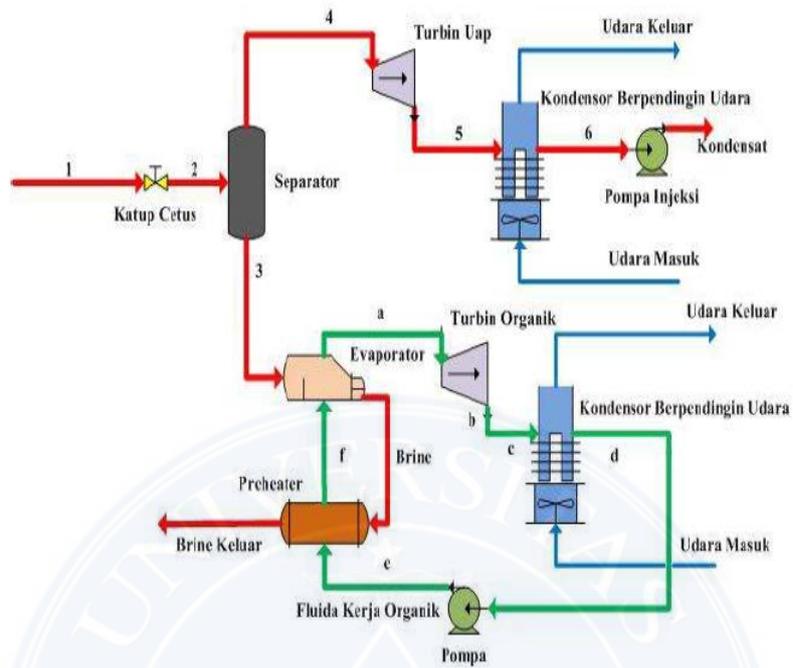


Gambar 3.4 : Diagram T-s untuk siklus biner sederhana [1].

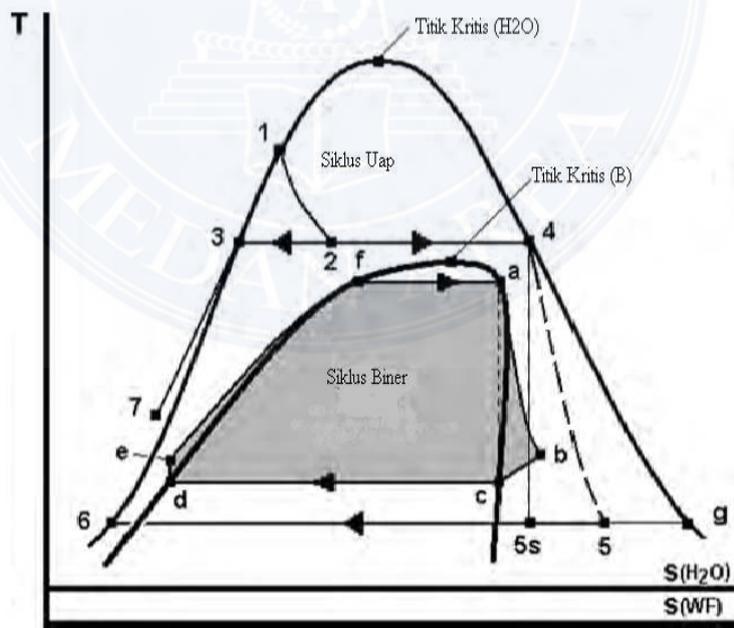
3.1.3. Siklus Kombinasi

Siklus kombinasi merupakan gabungan dari siklus cetus dan biner. Padaprinsipnya, *brine* sisa yang didapatkan dari separator masih memiliki temperature yang cukup tinggi. *Brine* tersebut dapat digunakan sebagai cairan pemanasan untuk memanaskan fluida kerja pada siklus biner, tentunya dengan perantaraan penukaran panas (*heat exchanger*). Dengan memanfaatkan prinsip kerja tersebut, daya listrik yang dapat dihasilkan pada siklus kombinasi ini akan lebih besar dibandingkandengan siklus cetus tunggal ataupun siklus biner.

Untuk lebih memahami komponen apa saja yang digunakan pada siklus cetus-biner dapat dilihat gambar skematik dari siklus cetus-biner pada Gambar 3.5, sedangkan proses kerjanya dapat dilihat dari diagram T-s pada Gambar 3.6



Gambar 3.5 : Skema siklus kombinasi sederhana pada sistem pembangkit



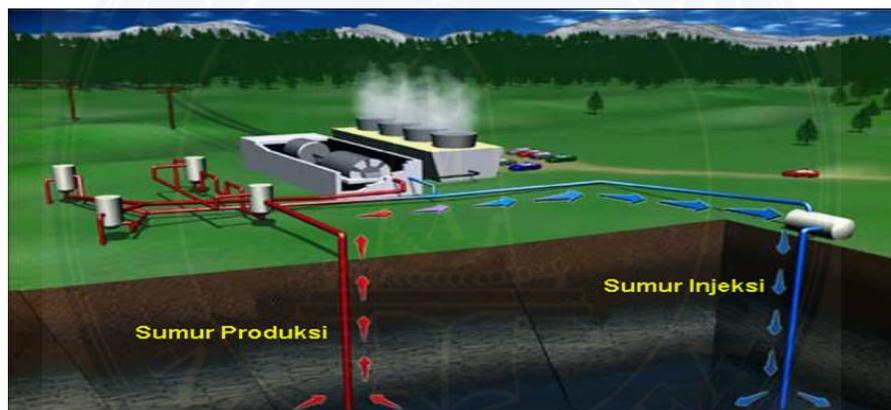
Gambar 3.6 : Diagram T-S siklus kombinasi sederhana [1].

3.2. Peralatan Penting Pada Sistem Pembangkit Tenaga Panas Bumi

Komponen utama suatu sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan siklus cetus-biner terdiri dari: Sumur produksi, tabung pengumpul uap sementara, pelepas uap, separator, demister, turbin, generator, trafo, switch yard, kondensor, main cooling water pump, cooling tower,

3.2.1. Sumur Produksi

Digunakan untuk mengambil panas bumi yang berada pada zona geothermal lalu mengalirkan panas tersebut ke dalam PLTP.



Gambar 3.7: Sumur Produksi

3.2.2. Tabung Pengumpul Uap (*Steam Receiving Header*)

Merupakan suatu tabung yang berfungsi sebagai pengumpul uap sementara dari beberapa sumur produksi sebelum didistribusikan ke turbin. *Steam receiving header* dilengkapi dengan sistem pengendalian kestabilan tekanan (katup) dan rupture disc yang berfungsi sebagai pengaman dari tekanan lebih dalam sistem aliran uap. Dengan adanya *steam receiving header* ini pasokan uap

tidak akan mengalami gangguan meskipun terdapat perubahan pasokan uap dari sumur produksi.



Gambar 3.8 : Steam Receiving Header

3.2.3. Pelepas Uap (*Vent Structure*)

Merupakan bangunan pelepas uap dengan peredam suara. *Vent structure* terbuat dari beton bertulang berbentuk bak persegi panjang, bagian bawahnya disekat dan bagian atasnya diberi tumpukan batu agar pada saat pelepasan uap ke udara tidak mencemari lingkungan. Dengan menggunakan *nozzle diffuser* maka getaran dan kebisingan dapat diredam. *Vent structure* dilengkapi dengan katup-katup pengatur yang sistem kerjanya pneumatic. Udara bertekanan yang digunakan untuk membuka dan menutup katup diperoleh dari dua buah kompresor yang terdapat di dalam rumah *vent structure*. Pengoperasian *vent structure* dapat dioperasikan dengan cara manual ataupun otomatis (*system remote*) yang dapat dilakukan dari panel ruangan kontrol (*control room*).

Adapun fungsi dari *vent structure* adalah sebagai berikut:

- Sebagai pengatur tekanan (agar tekanan uap masuk turbin selalu konstan)

- Sebagai pengaman yang akan membuang uap bila terjadi tekanan lebih di steam receiving header
- Membuang kelebihan uap jika terjadi penurunan beban atau unit stop.



Gambar 3.9 :Vent Structure

3.2.4. Separator (Komponen Pemisahan Fasa Fluida)

Separator berfungsi untuk memisahkan dua jenis fasa fluida (uap dan cair) yang dihasilkan pada proses cetus/ flashing dengan katup. Dengan diagram T-s pada Gambar 3.2, dapat dilihat proses yang berlangsung pada separator. Proses dari titik 2 ke 4 merupakan proses terbentuknya fasa uap jenuh, sedangkan proses dari titik 2 ke 3 merupakan proses terbentuknya fasa cair jenuh. Kualitas/fraksi dari campuran akibat proses flashing didekati dengan persamaan.

$$X_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3}$$

Separator yang dipakai adalah jenis cyclone berupa silinder tegak dimana pipa tempat masuknya steam dirancang sedemikian rupa sehingga membentuk arah aliran sentrifugal.

Uap yang masuk separator akan berputar akibat adanya perbedaan berat jenis, maka kondensat dan partikel-partikel padat yang ada dalam aliran uap akan

terpisah dan jatuh ke bawah dan ditampung dalam dust collector sampai mencapai maksimum atau sampai waktu yang telah ditentukan. Sedangkan uap yang lebih bersih akan keluar melalui pipa bagian atas dari separator. Kotoran yang ada dalam dust collector di-drain secara berkala baik otomatis ataupun manual. Hal ini dilakukan untuk menghindari terjadinya korosi, erosi dan pembentukan kerak pada turbin.



Gambar 3.10 : Seperator

3.2.5. Demister

Demister adalah sebuah alat yang berbentuk tabung silinder yang didalamnya terdapat kisi-kisi baja yang berfungsi untuk mengeliminasi butir-butir air yang terbawa oleh uap dari sumur-sumur panas bumi. Di bagian bawahnya terdapat kerucut yang berfungsi untuk menangkap air dan partikel-partikel padat lainnya yang lolos dari separator, sehingga uap yang akan dikirim ke turbin merupakan uap yang benar benar uap yang kering dan bersih. Karena jika uap yang masuk ke turbin tidak kering dan kotor, akan menyebabkan terjadinya

vibrasi, erosi dan pembentukan kerak pada turbin. Uap masuk dari atas demister langsung menabrak kerucut, karena perbedaan tekanan dan berat jenis maka butiran air kondensat dan partikel-partikel padat yang terkandung dalam di dalam uap akan jatuh. Uap bersih akan masuk ke saluran keluar yang sebelumnya melewati saringan terlebih dahulu dan untuk selanjutnya diteruskan ke turbin.

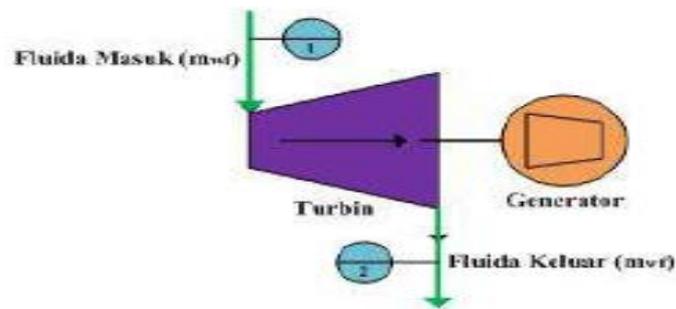
Demister ini dipasang pada jalur uap utama setelah alat pemisah akhir (*final separator*) yang ditempatkan pada bangunan rangka besi yang sangat kokoh dan terletak di luar gedung pembangkit.



Gambar 3.11 : Demister

3.2.6. Turbin

Turbin merupakan komponen yang penting pada sistem pembangkit listrik, dimana kerja yang dihasilkan oleh turbin digunakan untuk memutar generator. Generator tersebut dikelilingi oleh kumparan, sehingga akan menghasilkan energi listrik.

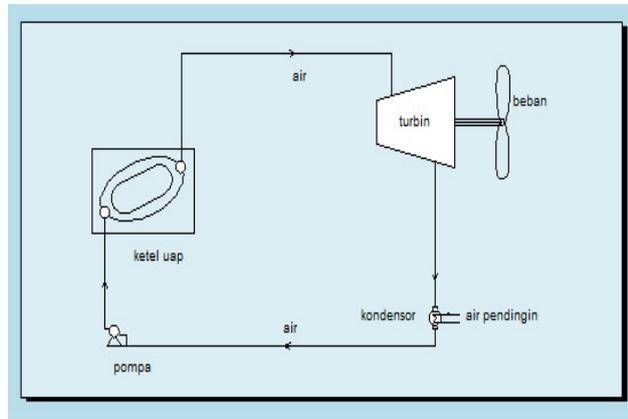


Gambar 3.12 : Turbin-generator untuk siklus biner

3.2.6.1. Prinsip Kerja Turbin Uap

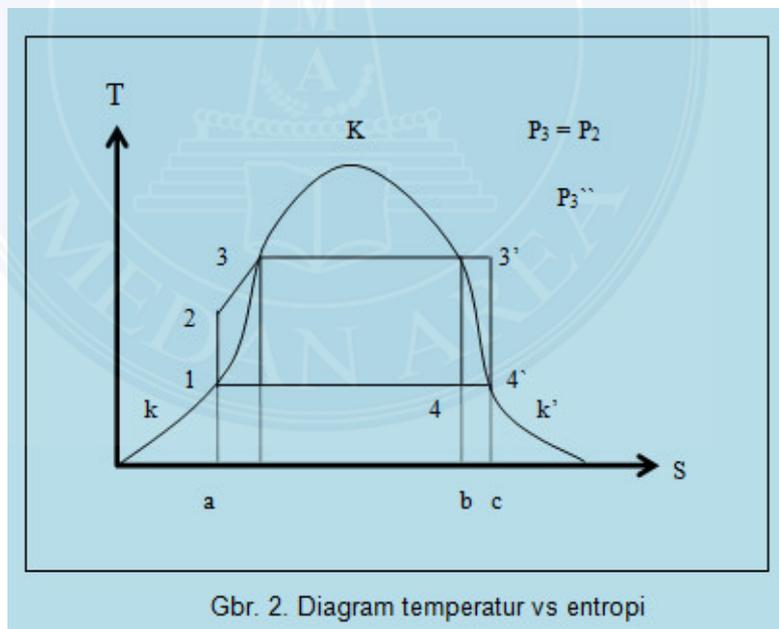
Skema dari sebuah sistem turbin uap tertutup dapat dilihat pada gambar 1. Sistem tersebut terdiri dari beberapa komponen utama yaitu *ketel uap*, *turbin* yang menggerakkan beban, *kondensor* dan *pompa air ketel*. Dengan demikian turbin hanya merupakan salah satu komponen saja dari suatu sistem tenaga. Di dalam turbin, tekanan dan temperatur uap turun, selama itu uap meninggalkan turbin dan masuk ke dalam kondensor. Kondensor adalah suatu alat yang berfungsi untuk mengembunkan uap dengan jalan mendinginkannya.

Air pengembunan yang terjadi didalam kondensor disebut kondensat. Dengan pertolongan sebuah pompa air dari kondensor dialirkan ke ketel uap. Pompa tersebut biasanya diletakkan lebih rendah atau di bawah kondensor, oleh karena pada umumnya kondensor bekerja dengan tekanan vakum. Oleh karena ada kemungkinan kebocoran uap, maka perlu dimasukkan air tambahan (*make up water*), sebanyak 3-4 % kapasitas produksi uap atau lebih, sesuai dengan sistem yang dipergunakan.



Gambar 3.13 : Skema sistem turbin uap

Siklus ideal dari suatu sistem turbin uap sederhana adalah siklus *Rankine tertutup* yang dapat digambar pada diagram T vs s atau pada diagram h vs s seperti terlihat pada gambar 2 dan 3.



Gambar 3.14 : Diagram temperature vs entropi

Daerah dibawah garis lengkung k - K - k' pada diagram T - s dan h - s merupakan daerah campuran fasa cair dan uap. Uap di dalam daerah tersebut

biasanya juga dinamakan basah. Garis k, K dinamai garis cair (jenuh), dimana pada dan di sebelah kiri daerah tersebut air ada di fasa cair. Sedangkan garis K - k' dinamai garis uap jenuh, di mana pada dan di sebelah kanan garis tersebut air ada dalam fasa uap (gas). Uap dimana temperatur dan tekanan pada titik tersebut berturut-turut dinamai temperatur kritis dan tekanan kritis.

Pada titik kritis keadaan cair jenuh dan uap jenuh adalah identik. Untuk air, tekanan kritisnya $P_c = 218,3 \text{ atm}$ ($3206,2 \text{ psia}$) dan temperatur kritisnya adalah $T_c = 374,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($7045,4 \text{ }^\circ\text{F}$). Pada tekanan lebih tinggi dari P_c tidak dapat diketahui dengan pasti bilamana dan di mana perubahan dari fasa cair ke fasa uap. Tetapi dalam hal tersebut biasanya dikatakan bahwa air ada dalam fasa cair apabila temperaturnya di bawah T_c dan ada dalam fasa uap apabila temperaturnya lebih tinggi dari pada T_c .

Siklus Rankine tertutup terdiri dari beberapa proses sebagai berikut :

1--->2, Proses pemompaan isentropis di dalam pompa.

2--->3, Proses pemasukan kalor atau pemanasan pada tekanan konstan didalam ketel.

3--->4, Proses ekspansi isentropik di dalam turbin atau mesin uap lainnya.

4 --->1, Proses pengeluaran kalor atau pengembunan pada tekanan konstan didalam kondensor.

Meskipun demikian, masih banyak variasi dari siklus Rankine tersebut di atas. Misalkan kemungkinan diadakannya pemanasan lanjut dari 3 ---> 3' sehingga siklusnya menjadi 1 ---> 2 ---> 3---> 3' ---> 4' ---> 1.

Menurut hukum termodinamika, kerja yang dihasilkan oleh suatu proses

siklus adalah sama dengan jumlah perpindahan kalor pada fluida kerja selama proses siklus tersebut berlangsung. Selanjutnya, secara singkat prinsip kerja turbin uap adalah sebagai berikut:

Uap masuk ke dalam turbin melalui nosel. Di dalam nosel energi panas dari uap dirubah menjadi energi kinetis dan uap mengalami pengembangan. Tekanan uap pada saat keluar dari nosel, lebih kecil dari pada saat masuk ke dalam nosel, akan tetapi sebaliknya kecepatan uap keluar nosel lebih besar dari pada saat masuk kedalam nosel. Uap yang memancar keluar dari nosel diarahkan ke sudu-sudu turbin yang berbentuk lengkung dan dipasang di sekeliling roda turbin. Uap yang mengalir melalui celah-celah di antara sudu-sudu turbin itu dibelokkan arahnya mengikuti lengkungan dari sudu turbin. perubahan kecepatan uap ini menimbulkan gaya yang mendorong sudu dan kemudian memutar roda dan poros turbin. Jika uap masih mempunyai kecepatan saat meninggalkan sudu turbin, berarti hanya sebagian energi kinetis dari uap yang diambil oleh sudu-sudu turbin yang berjalan. Supaya energi kinetis yang tersisa saat meninggalkan sudu turbin dapat dimanfaatkan, maka pada turbin umumnya dipasang lebih dari satu baris sudu gerak. Sebelum memasuki baris kedua sudu gerak, arah kecepatan uap harus dirubah lebih dahulu. Maka di antara baris pertama dan baris kedua sudu gerak dipasang satu baris sudu tetap (*guide blade*) yang berguna untuk mengubah arah kecepatan uap, supaya uap dapat masuk ke baris kedua sudu gerak dengan arah yang tepat. Kecepatan uap saat meninggalkan sudu gerak yang terakhir harus dapat dibuat sekecil mungkin, agar energi kinetis

yang tersedia dapat dimanfaatkan sebanyak mungkin. Dengan demikian efisiensi turbin menjadi lebih tinggi karena kehilangan energi relatif kecil.

3.2.6.2. Komponen-komponen Turbin Uap

Casing yaitu sebagai penutup bagian-bagian utama turbin.

Rotor yaitu bagian turbin yang berputar terdiri dari:

1. Poros
Berfungsi sebagai komponen utama tempat dipasangnya cakram cakram sepanjang sumbu.
2. Sudu turbin atau deretan sudu
Berfungsi sebagai alat yang menerima gaya dari energi kinetik uap berupa nosel.
3. Cakram
Berfungsi sebagai tempat sudu-sudu dipasang secara radial pada poros
4. Nosel
Berfungsi sebagai media ekspansi uap yang merubah energi potensial menjadi energi kinetik.
5. Bantalan (*Bearing*)
Merupakan bagian yang berfungsi untuk menyokong kedua ujung poros dan banyak menerima beban
6. Perapat (*Seal*)

Berfungsi untuk mencegah kebocoran uap, perapatan ini dipasang mengelilingi poros dan perapat yang digunakan adalah Labyrinth packing dan Gland packing

7. Kopling

Berfungsi sebagai penghubung antara mekanisme turbin uap dengan mekanisme yang digerakkan.

3.2.7. Generator

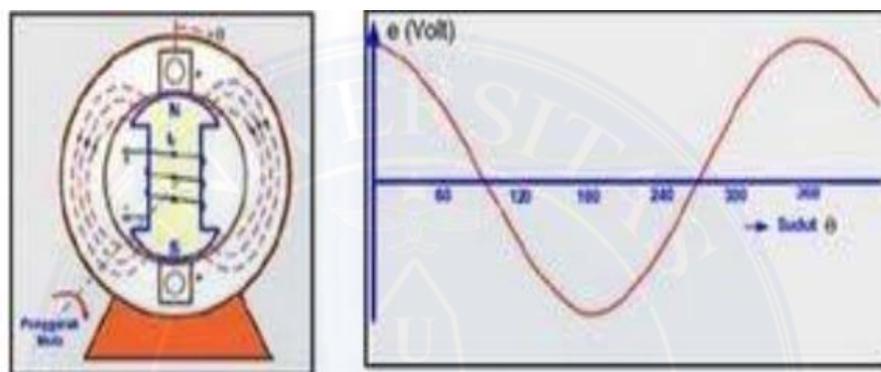
Generator adalah sebuah alat yang berfungsi untuk merubah energi mekanik putaran poros turbin menjadi energi listrik. Perputaran pada generator tersebut akan menghasilkan perpotongan gaya gerak magnet yang menghasilkan energi listrik. Generator yang dikoneksikan ke bus sistem atau generator lain harus disinkronisasi dahulu. Disinkronisasi berarti:

1. Frekuensi generator sama dengan frekuensi sistem.
2. Tegangan generator sama dengan tegangan sistem.
3. Tegangan generator se-fase dengan tegangan sistem.
4. Urutan fase generator sama dengan urutan fase sistem.

3.2.7.1. Prinsip Kerja Generator

Prinsip kerja generator sinkron dapat dianalisis melalui pengoperasian generator dalam kondisi berbeban, tanpa beban, menentukan reaktansi dan resistansi dengan melakukan percobaan tanpa beban (beban nol), percobaan hubung-singkat

dan percobaan resistansi jangkar. Kecepatan rotor dan frekuensi dari tegangan yang dibangkitkan oleh suatu generator sinkron adalah berbanding secara langsung. Gambar 3.15 akan memperlihatkan prinsip kerja dari sebuah generator AC dengan dua kutub, dan dimisalkan hanya memiliki satu lilitan yang terbuat dari dua penghantar secara seri.



Gambar 3.15 : Diagram Generator AC Satu Fasa Dua Kutub.

Lilitan seperti disebutkan di atas disebut “lilitan terpusat”, dalam generator sebenarnya terdiri dari banyak lilitan dalam masing-masing fasa yang terdistribusi pada masing-masing alur stator dan disebut “lilitan terdistribusi”. Diasumsikan rotor berputar searah jarum jam, maka fluks medan rotor bergerak sesuai lilitan jangkar.

Satu putaran rotor dalam satu detik menghasilkan satu siklus perdetik atau 1 Hertz (Hz). Bila kecepatannya 60 Revolution per menit (Rpm), frekuensi 1 Hz. Maka untuk frekuensi $f = 60$ Hz, rotor harus berputar 3600 Rpm. Untuk kecepatan rotor n rpm, rotor harus berputar pada kecepatan $n/60$ revolution per detik (rps). Bila rotor mempunyai lebih dari 1 pasang kutub, misalnya P kutub maka masing-

masing revolution dari rotor menginduksikan $P/2$ siklus tegangan dalam lilitan stator. Frekuensi dari tegangan induksi sebagai sebuah fungsi dari kecepatan rotor, dan diformulasikan dengan :

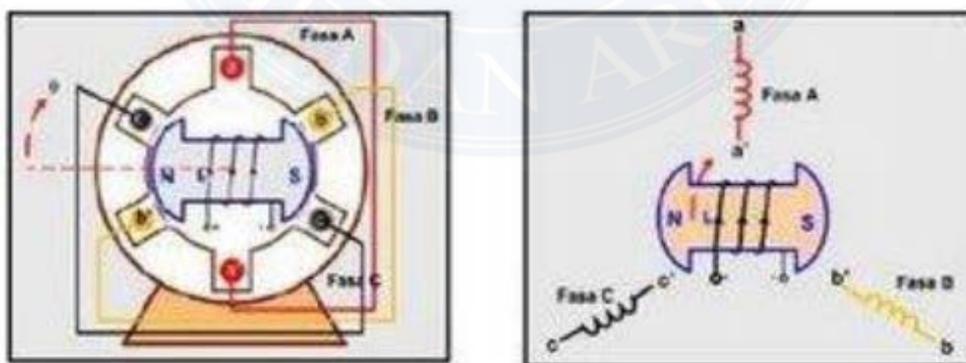
$$f = \frac{P}{2} \times \frac{n}{60(\text{Hertz})}$$

Untuk generator sinkron tiga fasa, harus ada tiga belitan yang masing masing terpisah sebesar 120° listrik dalam ruang sekitar keliling celah udara seperti diperlihatkan pada kumparan $a - a'$, $b - b'$ dan $c - c'$ pada gambar 2.21. Masing-masing lilitan akan menghasilkan gelombang fluks sinus, dimana satu dengan lainnya berbeda 120° . Dalam keadaan seimbang besarnya fluks sesaat :

$$\phi_A = \phi_m \sin \omega t$$

$$\phi_B = \phi_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$\phi_C = \phi_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$



Gambar 3.16: Diagram Generator AC Tiga Fasa Dua Kutub.

Besarnya fluks resultan adalah jumlah vektor ketiga fluks tersebut adalah :

$$\ddot{O}T = \ddot{O}A + \ddot{O}B + \ddot{O}C$$

yang merupakan fungsi tempat (\ddot{O}) dan waktu (t), maka besarnya fluks total adalah:

$$\ddot{O}T = \ddot{O}m \cdot \sin \dot{u}t + \ddot{O}m \cdot \sin(\dot{u}t - 120^\circ) + \ddot{O}m \cdot \sin(\dot{u}t - 240^\circ) \cdot \cos \ddot{o} - 240^\circ$$

Dengan memakai transformasi trigonometri dari :

$$\sin \acute{a} \cdot \cos \hat{a} = \frac{1}{2} \cdot \sin (\acute{a} + \hat{a}) + \frac{1}{2} \sin (\acute{a} - \hat{a})$$

maka dari persamaan diatas diperoleh :

$$\ddot{O}T = \frac{1}{2} \cdot \ddot{O}m \cdot \sin (\dot{u}t + \ddot{o}) + \frac{1}{2} \cdot \ddot{O}m \cdot \sin(\dot{u}t - \ddot{o}) + \frac{1}{2} \cdot \ddot{O}m \cdot \sin (\dot{u}t + \ddot{o} - 240^\circ) + \frac{1}{2} \cdot \ddot{O}m \cdot \sin (\dot{u}t - \ddot{o}) + \frac{1}{2} \cdot \ddot{O}m \cdot \sin (\dot{u}t + \ddot{o} - 480^\circ)$$

Dari persamaan diatas, bila diuraikan maka suku kesatu, ketiga, dan kelima akan saling menghilangkan. Dengan demikian dari persamaan akan di dapat fluks total sebesar,

$$\ddot{O}T = \frac{3}{2} \ddot{O}m \cdot \sin (\dot{u}t - \ddot{O}) \text{ Weber}$$

Jadi medan resultan merupakan medan putar dengan modulus $\frac{3}{2} \ddot{O}$ dengan sudut putar sebesar \dot{u} . Maka besarnya tegangan masing -masing fasa adalah :

$$E_{maks} = B_m \cdot \ell \cdot \dot{u} \cdot r \text{ Volt}$$

dimana : B_m = Kerapatan Fluks maksimum kumparan medan rotor (Tesla)

ℓ = Panjang masing-masing lilitan dalam medan magnetik (Weber)

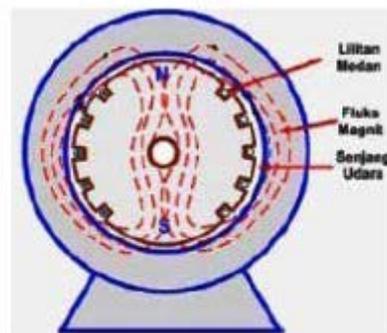
\dot{u} = Kecepatan sudut dari rotor (rad/s)

r = Radius dari jangkar (meter)

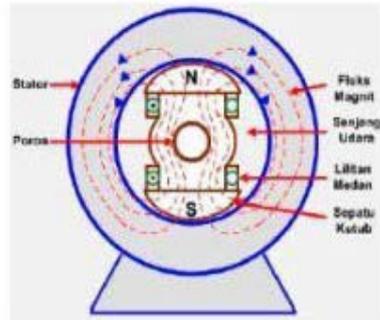
3.2.7.2. Konstruksi Generator Sinkron

Pada dasarnya konstruksi dari generator sinkron adalah sama dengan konstruksi motor sinkron, dan secara umum biasa disebut mesin sinkron . Ada dua struktur kumparan pada mesin sinkron yang merupakan dasar kerja dari mesin tersebut, yaitu kumparan yang mengalirkan penguatan DC atau disebut kumparan medan dan sebuah kumparan atau disebut kumparan jangkar tempat dibangkitkannya GGL arus bolak-balik. Hampir semua mesin sinkron mempunyai kumparan jangkar berupa stator yang diam dan struktur medan magnet berputar sebagai rotor. Kumparan DC pada struktur medan yang berputar dihubungkan pada sumber DC luar melalui cincin geser (slip ring) dan sikat arang (carbon brush), tetapi ada juga yang tidak mempergunakan sikat arang yaitu sistem brushless excitation.

Untuk medan rotor yang digunakan tergantung pada kecepatan mesin, mesin dengan kecepatan tinggi seperti turbo generator mempunyai bentuk silinder seperti pada gambar 3.17a, sedangkan mesin dengan kecepatan rendah seperti Hydroelectric(PLTA) atau Generator Listrik Diesel mempunyai rotor kutub menonjol seperti pada gambar 3.17b.

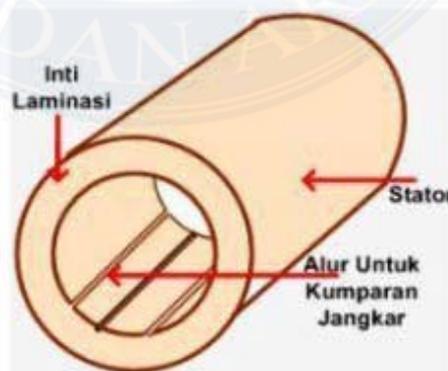


Gambar 3.17a: Bentuk rotor kutub silinder.



Gambar 3.17b : Bentuk Stator.

Stator dari Mesin Sinkron terbuat dari bahan ferromagnetik, yang berbentuk laminasi agar dimaksudkan untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar. Dengan inti ferromagnetik yang bagus berarti mengandung bahan yang memiliki permeabilitas dan resistivitas tinggi. Gambar 3.18 memperlihatkan alur stator yang terdapat kumparan jangkar. Kumparan/belitan jangkar pada stator yang umum digunakan oleh mesin sinkron tiga fasa, ada dua tipe yaitu : a. Belitan satu lapis (*Single Layer Winding*). b. Belitan berlapis ganda (*Double Layer Winding*).



Gambar 3.18 : Inti Stator dan Alur pada Stator.

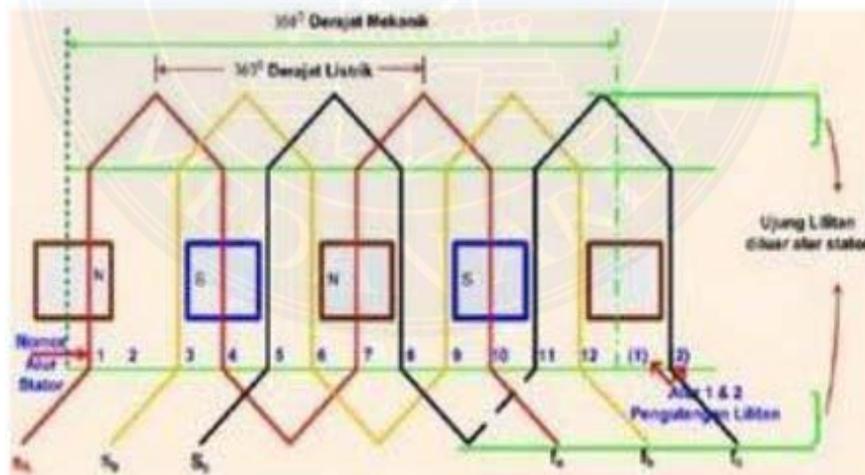
2.2.7.3. Bentuk Stator Satu lapis (*Single Layer Winding*)

Bila kumparan tiga fasa dimulai pada S_a , S_b , dan S_c dan berakhir di F_a , F_b , dan F_c bisa disatukan dalam dua cara, yaitu hubungan bintang dan segitiga. Antar kumparan fasa dipisahkan sebesar 120° . Untuk menunjukkan arah dari putaran rotor seperti ditunjukkan oleh gambar 2.22 (searah jarum jam), urutan fasa yang dihasilkan oleh suplay tiga fasa adalah ABC disebut urutan fasa positif, dengan demikian tegangan maksimum pertama terjadi dalam fasa A, diikuti fasa B, dan kemudian fasa C. Sedangkan kebalikan arah putaran (berlawanan arah jarum jam) dihasilkan dalam urutan ACB, atau disebut urutan fasa negatif. Jadi GGL yang dibangkitkan sistem tiga fasa secara simetris adalah :

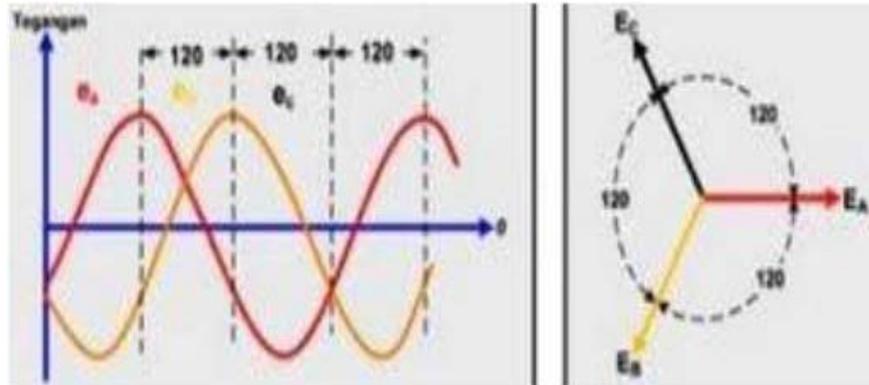
$$E_A = E_m \sin \omega t \text{ Volt}$$

$$E_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ) \text{ Volt (2.5)}$$

$$E_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) \text{ Volt}$$



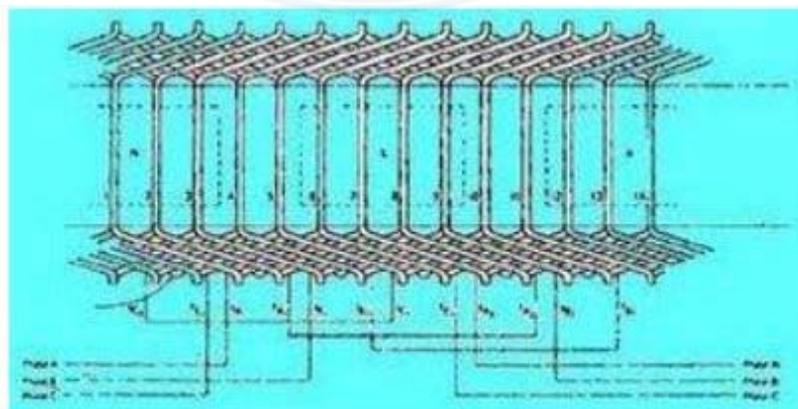
Gambar 3.19 : Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa.



Gambar 3.20 : Urutan fasa ABC.

3.2.7.4. Belitan Berlapis Ganda (*Double Layer Winding*)

Generator praktisnya mempunyai kumparan terdistribusi dalam beberapa alur perkutub perfasa. Pada masing-masing alur ada dua sisi lilitan dan masing-masing lilitan memiliki lebih dari satu putaran. Bagian dari lilitan yang tidak terletak kedalam alur biasanya disebut *winding overhang*, sehingga tidak ada tegangan dalam *winding overhang*



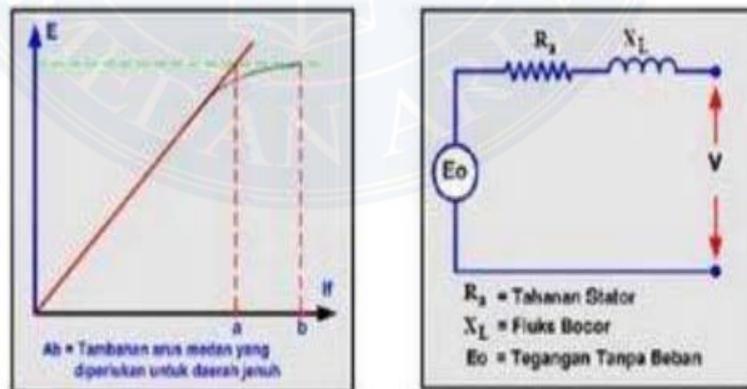
Gambar 3.21 : Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron Tiga Fasa.

3.2.7.5. Generator Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai generator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_o), yaitu sebesar:

$$E_o = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi_m \cdot T \text{ Volt}$$

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Bila besarnya arus medan dinaikkan, maka tegangan keluaran juga akan naik sampai titik saturasi (jenuh), seperti diperlihatkan pada gambar 3.22. Kondisi generator tanpa beban bisa digambarkan rangkaian ekuivalennya seperti diperlihatkan pada gambar 3.17b.



Gambar 3.22. a dan b : Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban

3.2.7.6. Generator Berbeban

Bila generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V akan berubah-ubah pula, hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada :

a. Resistansi Jangkar

Resistansi jangkar/fasa R_a menyebabkan terjadinya kerugian tegangan jatuh/fasa dan $I \cdot R_a$ yang sefasa dengan arus jangkar.

b. Reaktansi Bocor Jangkar

Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluks yang terjadi tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan.

c. Reaksi Jangkar

Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat generator dibebani akan menimbulkan fluks jangkar ($\dot{\Phi}_A$) yang berintegrasi dengan fluks yang dihasilkan pada kumparan medan rotor ($\dot{\Phi}_F$), sehingga akan dihasilkan suatu fluks resultan.

3.2.7.7. Sistem Eksitasi pada Generator Sinkron

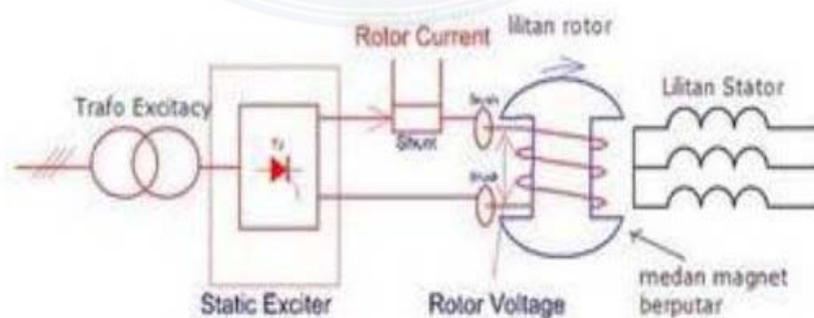
Sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besar arus eksitasinya. Sistem ini merupakan sistem yang vital

pada proses pembangkitan listrik dan pada perkembangannya, sistem eksitasi pada generator listrik ini dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu:

3.2.7.7.1. Sistem Eksitasi dengan menggunakan Sikat (*Brush Excitation*)

Pada Sistem Eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*.

Jika menggunakan sumber listrik listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan Permanent Magnet Generator (PMG) medan magnetnya adalah magnet permanen. Dalam lemari penyearah, tegangan listrik arus bolak balik diubah atau disearahkan menjadi tegangan arus searah untuk mengontrol kumparan medan eksiter utama (*main exciter*). Untuk mengalirkan arus eksitasi dari main exciter ke rotor generator digunakan cincin geser (*slip ring*) dan sikat arang (*carbon brush*), demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot exciter ke main exciter.



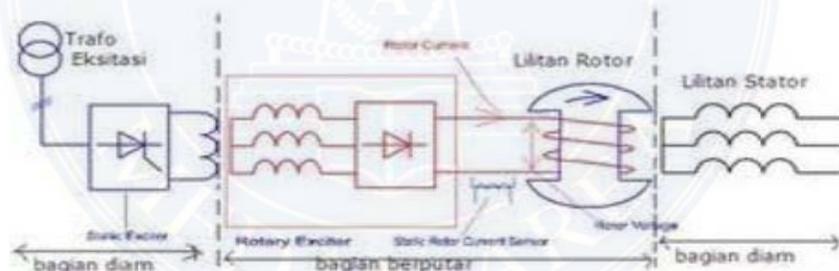
Gambar 3.23 : Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*).

Prinsip Kerja Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*) adalah sebagai berikut: Generator penguat yang pertama, adalah generator arus searah hubungan shunt yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (*exciter*) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya. Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer ini mengatur arus eksitasi generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus eksitasi generator utama. Dengan cara ini arus eksitasi yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar. PMT arus eksitasi generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus eksitasi generator utama harus dibuang ke dalam tahanan. Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama, oleh generator penguat kedua tidak memerlukan slip ring karena penyearah ikut berputar bersama poros generator. Slip ring digunakan untuk menyalurkan arus dari generat or penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua. Nilai arus eksitasi kecil sehingga penggunaan slip ring tidak menimbulkan masalah. Pengaturan besarnya arus eksitasi generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis supaya nilai tegangan klem generator konstan. Pengaturan

tegangan otomatis ini pada awalnya berdasarkan prinsip mekanis, tetapi sekarang sudah menjadi elektronik menggunakan Automatic Voltage Regulator (AVR).

3.2.7.7.2. Sistem Eksitasi tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Perkembangan sistem eksitasi pada generator sinkron dengan sistem eksitasi tanpa sikat, karena sikat dapat menimbulkan loncatan api pada putaran tinggi. Untuk menghilangkan sikat digunakan dioda berputar yang dipasang pada jangkar. Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).



Gambar 3.24 : Sistem Eksitasi tanpa sikat (*Brushless Excitation*).

Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat, antara lain adalah:

1. Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya tinggi .
2. Biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi tanpa sikat tidak terdapat sikat arang, komutator dan slip ring.

3. Pada sistem eksitasi tanpa sikat tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang.
4. Mengurangi kerusakan (*trouble*) akibat udara buruk (*bad atmosfere*) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup .
5. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat arang, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
6. Pemutus medan generator (*generator field breaker*), field generator dan bus exciter atau kabel tidak diperlukan lagi .
7. Biaya pondasi berkurang, sebab alir an udara dan bus exciter atau kabel tidak memerlukan pondasi.

Prinsip kerja sistem Eksitasi tanpa sikat (*Brushless Excitation*) adalah sebagai berikut: Generator penguat pertama disebut pilot exciter dan generator penguat kedua disebut *main exciter* (penguat utama). *Main exciter* adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros *main exciter* (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus eksitasi generator utama. *Pilot exciter* pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator.

Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator main exciter. Besar arus searah yang mengalir ke kutub *main exciter* diatur oleh

pengatur tegangan otomatis (Automatic Voltage Regulator atau AVR). Besarnya arus eksitasi berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan main exciter, maka besarnya arus main exciter juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama. Pada sistem eksitasi tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi. Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit.

3.2.8. Trafo Utama

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh. Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban; untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain; dan untuk menghambat arus searah melalukan atau

mengalirkan arus bolak-balik. Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan menjadi:

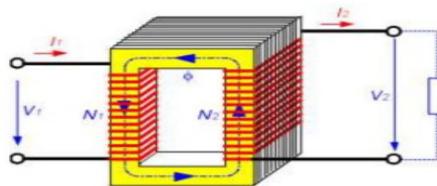
- Frekuensi daya, 50 sampai 60Hz
- Frekuensi pendengaran, 50Hz sampai 20kHz
- Frekuensi radio, diatas 30kHz.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

- Transformator daya
- Transformator distribusi
- Transformator pengukuran, yang terdiri dari atas transformator arus dan Transformator tegangan.

3.2.8.1. Konstruksi Transformator

Gambar dibawah memperlihatkan bentuk fisik dari transformator, dimana tegangan masukan (V_1) berbentuk sinusioda dihubungkan pada gulungan primer (N_1). Arus masukan (I_1) mengakibatkan aliran fluk (ϕ) pada gulungan (N_1) maupun gulungan (N_2). Fluk pada gulungan sekunder (N_2) menyebabkan aliran arus (I_2) dan tegangan (V_2).



Gambar 3.25 : Kontruksi Transformator

3.2.8.1.1. Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja dari sebuah transformator adalah sebagai berikut. Ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, perubahan arus listrik pada kumparan primer menimbulkan medan magnet yang berubah. Medan magnet yang berubah diperkuat oleh adanya inti besi dan diantarkan inti besi ke kumparan sekunder, sehingga pada ujung-ujung kumparan sekunder akan timbul ggl induksi. Efek ini dinamakan induktansi timbal-balik (*mutual inductance*).

Berdasarkan perbandingan antara jumlah lilitan primer dan jumlah lilitan sekunder transformator ada dua jenis yaitu:

1. Transformator *step up* yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak-balik rendah menjadi tinggi, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan sekunder lebih banyak daripada jumlah lilitan primer ($N_s > N_p$).
2. Transformator *step down* yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak-balik tinggi menjadi rendah, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan sekunder ($N_p > N_s$).

Pada transformator (trafo) besarnya tegangan yang dikeluarkan oleh kumparan sekunder adalah:

1. Sebanding dengan banyaknya lilitan sekunder ($V_s \sim N_s$).
2. Sebanding dengan besarnya tegangan primer ($V_s \sim V_p$).

3. Berbanding terbalik dengan banyaknya lilitan primer,

$$\left(V_s \sim \frac{1}{N_p} \right) \text{ Sehingga dapat dituliskan } V_s = \frac{N_s}{N_p} \times V_p$$

3.2.8.2. Bagian-bagian dari Transformator

3.2.8.2.1. Bagian Utama Transformator

a) Inti Besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy (Eddy Current).

b) Kumparan Transformator

Terdiri dari beberapa lilitan berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat seperti karton, pertinax, dan lain-lain.

Umumnya pada trafo terdapat kumparan primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/ arus bolak-balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi. Fluksi ini akan menginduksikan tegangan, dan bila pada rangkaian sekunder ditutup (bila ada rangkaian beban) maka akan menghasilkan arus pada kumparan ini. Jadi kumparan sebagai alat transformasi tegangan dan arus.

c) Minyak Transformator

Minyak transformator disini berfungsi sebagai pengisolasi (isolator) dan pendingin. Minyak sebagai isolator berfungsi mengisolasi kumparan di dalam transformator supaya tidak terjadi loncatan bunga api listrik akibat tegangan tinggi. Minyak sebagai pendingin berfungsi mengambil panas yang ditimbulkan saat transformator berbeban lalu melepaskannya dan melindungi komponen di dalamnya terhadap oksidasi dan korosi.

d) Bushing

Hubungan antara transformator ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator

e) Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian-bagian transformator yang terendam minyak trafo ditempatkan di dalam tangki. Untuk menampung pemuaiian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.

3.2.8.2.2. Peralatan Bantu Transformator

a) Pendingin

Pada inti besi dalam kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi besi dan rugi tembaga. Apabila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi di dalam trafo. Untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan, maka perlu dilengkapi dengan alat pendingin/sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Media yang dipakai pada pendingin dapat berupa :

Udara/gas

Minyak

Air

b) Tap Changer (Perubah Tap)

Tap changer adalah alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang diinginkan dari jaringan tegangan primer yang berubah-ubah. Tap changer yang bisa beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban disebut Off Load Tap Changer dan hanya dapat dioperasikan secara manual. Tap changer yang dapat beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan berbeban disebut On Load Tap Changer dan dapat dioperasikan secara manual maupun otomatis.

c) Alat Pernafasan (Dehydrating Breather)

Akibat pernafasan transformator tersebut maka permukaan minyak akan selalu bersinggungan dengan udara luar. Udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah hal tersebut pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernafasan berupa tabung berisi kristal zat higroskopis.

d) Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator sebagai berikut :

Indikator suhu minyak

Indikator permukaan minyak

Indikator suhu winding

Indikator kedudukan tap

3.2.9. Switch Yard

Switch yard adalah perangkat yang berfungsi sebagai pemutus dan penghubung aliran listrik yang berada di wilayah PLTP.



Gambar 3.26 : Switch Yard

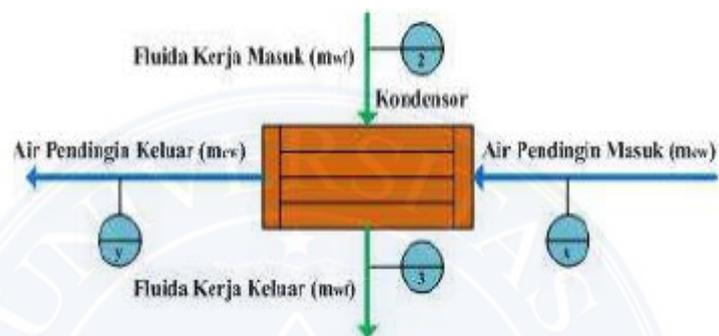
3.2.10. Kondensor

Umumnya kondensor yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi adalah kondensor berpendingin air [1]. Dengan bantuan diagram T-s pada Gambar 2.2 di atas dapat dilihat bahwa proses kondensasi yang berlangsung adalah dari titik 5 ke 6, dimana jumlah air pendingin yang diperlukan dapat diperoleh dengan persamaan

$$\dot{m}_{cw} = X_2 \dot{m}_{total} \left[\frac{h_5 - h_6}{\bar{c}(T_6 - T_{cw})} \right]$$

Dengan C = konstanta kalor spesifik (4200 J/kg.K)

Prinsip kerja dari kondensor memanfaatkan kesetimbangan kalor yang terjadi antara fluida kerja panas dengan fluida kerja dingin. Proses yang berlangsung pada kondensor dapat dilihat pada Gambar 2.8, dengan persamaan kalor untuk fluida kerja panas

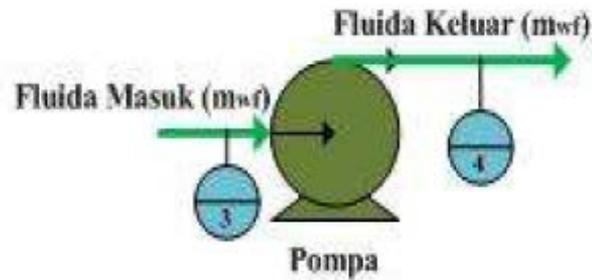


Gambar 3.27 : Kondensor dengan pendingin air.

Dari Gambar 3.8 di atas juga, didapatkan persamaan kesetimbangan energi untuk kondensor.

3.2.11. Pompa (Feedwater Pump)

Pompa digunakan untuk menaikkan tekanan/head dari fluida yang dialirkan. Dari gambar skematik pada Gambar 3.9 dapat diketahui bahwa kerja yang diperlukan oleh pompa adalah



Gambar 3.28 : Pipa untuk kondensat.

3.2.12. Cooling Tower

Air yang dipompakan dari kondensor didistribusikan ke dalam bak (hot water basin) yang terdapat di bagian atas cooling tower. Bak tersebut juga dilengkapi dengan noozle yang berfungsi untuk memancarkan air sehingga menjadi butiran butiran halus dan didinginkan dengan cara kontak langsung dengan udara pendingin. Setelah terjadi proses pendinginan, air akan turun karena gaya gravitasi untuk seterusnya menuju bak penampung air (cool water basin) yang terdapat di bagian bawah cooling tower dan seterusnya dialirkan ke kondensor yang sebelumnya melewati 4 buah screen untk menyaring kotoran - kotoran yang terdapat dalam air.

Aliran udara yang melewati tiap ruang pendingin dihisap ke atas dengan kipas hisap paksa tipe aksial. Setiap kipas digerakkan oleh motor listrik induksi dengan perantaraan gigi reduksi (reduction gear). Cooling tower dilengkapi dengan sistem pembasah (wetting pump system) yang gunanya untuk

memompakan air dari cool water basin dan disemprotkan ke semua bagian dari cooling tower agar kondisi kayu tetap basah.

3.3. Pemilihan Fluida Kerja

Faktor pemilihan fluida kerja pada siklus biner memiliki peran yang penting dalam penentuan performansi sistem pembangkit.

Ada banyak jenis fluida yang dapat dijadikan fluida kerja dalam siklus biner, tetapi harus diperhatikan juga batasan-batasan yang ada, misalnya sifat termodinamika fluida, faktor kesehatan, faktor keamanan, serta faktor lingkungan.

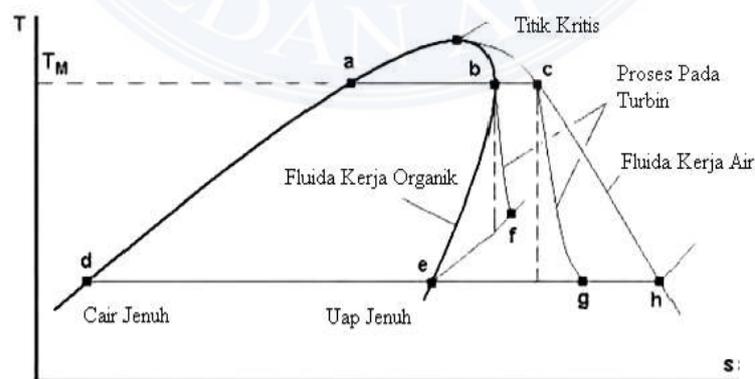
3.3.1. Sifat Termodinamika

Faktor yang penting dalam pemilihan jenis fluida kerja adalah tekanan dan temperatur kritisnya harus lebih rendah dari air. Temperatur kritis fluida kerja yang rendah memungkinkan terjadinya perubahan fasa dari fluida kerja karena proses pemanasan oleh *brine*. Fluida kerja yang memiliki fasa uap dapat digunakan untuk menggerakkan turbin, sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Dari Tabel 3.2 di bawah ini, dapat diketahui perbandingan temperatur dan tekanan kritis antara berbagai jenis fluida kerja yang umum digunakan pada siklus biner.

Tabel 3.1: Sifat Thermodinamika Beberapa Fluida Kerja Untuk Siklus Biner

No	Jenis Fluida	Rumus Kimia	T _c °C	T _c °F	P _c Mpa	P _c lbf/in ²	P _s @ 300 K Mpa	P _s @ 400 K Mpa
1	Propana	C ₃ H ₈	96,95	206,50	4,236	614,4	0,993500	n.a.
2	i-Butana	i-C ₄ H ₁₀	135,92	276,70	3,685	534,4	0,372700	3,20400
3	n-Butana	C ₄ H ₁₀	150,80	303,40	3,718	539,2	0,255900	2,48800
4	i- Pentana	i-C ₅ H ₁₂	187,80	370,10	3,409	494,4	0,097590	1,23800
5	n-Pentana	C ₅ H ₁₂	193,90	380,90	3,240	469,9	0,073760	1,03600
6	Ammonia	NH ₃	133,65	272,57	11,627	1686,3	1,061000	10,30000
7	Air	H ₂ O	374,14	705,45	22,089	3203,6	0,003536	0,24559

Karakteristik penting lain yang dimiliki oleh fluida kerja organik adalah bentuk diagram Temperatur-Entropi (T-s) yang sedikit berbeda dengan air. Perbedaannya terdapat pada garis uap jenuh yang dimiliki. Garis uap jenuh pada air memiliki kemiringan (*slope*) bernilai negatif, sedangkan untuk fluida kerja organik kemiringannya bernilai positif. Perbedaannya dapat dilihat pada Gambar 3.12 di bawah ini.



Gambar 3.29 : Diagram T-s untuk fluida kerja organik. [1]

3.3.2. Faktor Kesehatan, Keamanan dan Lingkungan

Faktor yang juga perlu diperhatikan dalam proses pemilihan fluida kerja adalah faktor kesehatan, keamanan dan lingkungan. Ketiga faktor tersebut akan mempengaruhi satu dengan yang lainnya. Berikut akan diberikan Tabel 2.3 yang berisi sifat-sifat yang berhubungan dengan kesehatan, keamanan, dan lingkungan untuk beberapa jenis fluida kerja.

Tabel 3.2 : Sistem keamanan dan Lingkungan Untuk Beberapa jenis Fluida Kerja.

No	Jenis Fluida Kerja	Rumus Kimia	Sifat Beracun	Sifat Keterbakaran	ODP	GWP
1	R-12	CCl_2F_2	Tidak Beracun	Tidak Terbakar	1,0	4500
2	R-114	$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$	Tidak Beracun	Tidak Terbakar	0,7	5850
3	Propana	C_3H_8	Rendah	Sangat Tinggi	0	3
4	i-butana	$\text{i-C}_4\text{H}_{10}$	Rendah	Sangat Tinggi	0	3
5	n-butana	C_4H_{10}	Rendah	Sangat Tinggi	0	3
6	i-pentana	$\text{i-C}_5\text{H}_{12}$	Rendah	Sangat Tinggi	0	3
7	n-pentana	C_5H_{12}	Rendah	Sangat Tinggi	0	3
8	Ammonia	NH_3	Beracun	Rendah	0	0
9	Air	H_2O	Tidak Beracun	Tidak Terbakar	0	-

Nilai Ozone Depletion Potential (ODP) merupakan nilai perbandingan antara zat yang memiliki kandungan yang dapat merusak ozon dengan zat yang merupakan acuan, dimana umumnya bernilai 1 untuk R-11 dan R-12.

Sedangkan nilai Global Warming Potential (GWP) merupakan ukuran dari berapa besar massa yang diberikan dari zat penghasil gas efek rumah kaca yang diperkirakan akan berkontribusi terhadap pemanasan global dibandingkan dengan zat yang merupakan acuan, dimana umumnya bernilai 1 untuk karbondioksida.

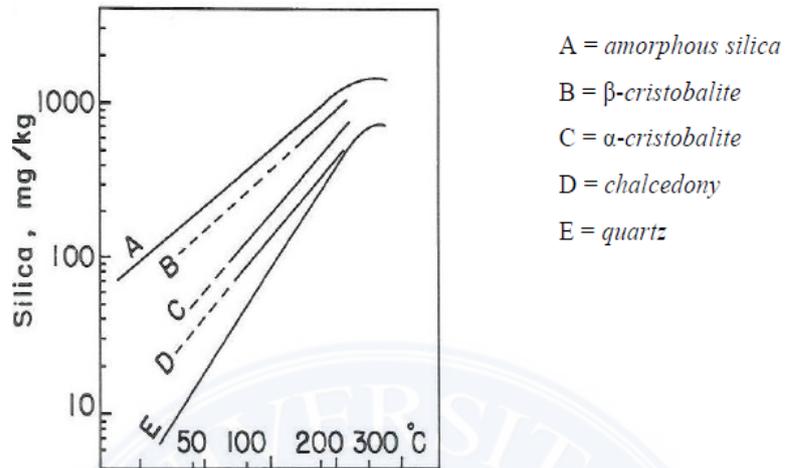
3.4. Pembentukan Kerak (*Scaling*)

Hal lain yang menjadi masalah serius pada siklus PLTP adalah masalah pembentukan kerak (*scaling*). Masalah *scaling* dapat dianalogikan seperti terbentuknya kolestrol di dalam pembuluh darah manusia yang setiap saat dapat menimbulkan masalah serius. Sama seperti itu, kerak akan menyebabkan tersumbatnya aliran fluida yang melewati pipa/tube, mengurangi kemampuan perpindahan panas, dan pada akhirnya akan mengganggu kinerja PLTP.

Salah satu penyebab terbentuknya kerak (*Scale*) adalah adanya kandungan silika (SiO_2). Senyawa silika memiliki empat bentuk, yaitu *quartz*, *amorphous*, *chalcedony*, dan *crystalite*. Yang menjadi pusat perhatian pada siklus PLTP adalah fasa silika dalam bentuk *quartz* dan *amorphous*, karena kedua fasa ini menunjukkan sifat kelarutan silika yang memiliki sifat paling mudah larut dan paling sulit larut.

Sifat-sifat yang mempengaruhi konsentrasi silika adalah temperatur, kadar garam (salinitas), dan nilai keasaman (pH). Faktor yang paling mempengaruhi konsentrasi silika adalah temperatur, sehingga persamaan yang ada banyak didekati sebagai fungsi dari temperatur [2].

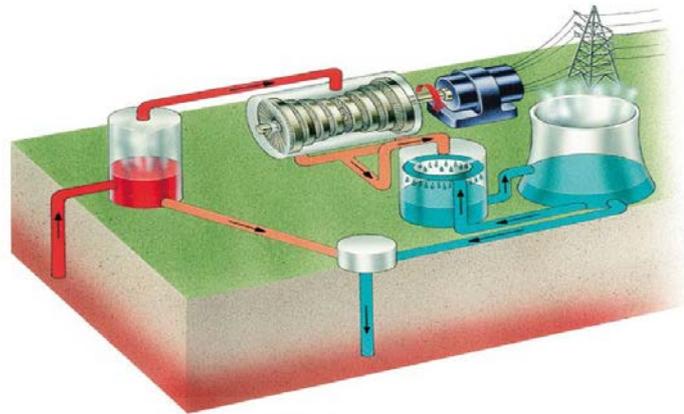
Pada Gambar 2.13 akan diperlihatkan tingkat kelarutan dari berbagai bentuk silika, dari yang mudah larut (E) sampai yang sulit larut (A).



Gambar 3.30 : Kelarutan berbagai bentuk silica. [3]

Dalam menganalisis proses terbentuknya kerak, ada tiga metode yang biasa digunakan, yaitu metode Founier, DiPippo, dan Silica Scaling Index (SSI). Ketiga metode tersebut akan dijelaskan pada sub-bab di bawah ini, dimana yang ingin diperoleh adalah temperatur minimum keluar brine supaya tidak terbentuk kerak.

3.5. Skema PLTP



Gambar 3.31: Skema PLTP

Uap dari sumur produksi mula-mula dialirkan ke *steam receiving header* (menampung uap panas bumi). Pada steam receiving terdapat *Vent structure* (katup pelepas uap) yang berfungsi menjaga tekanan pasokan uap ke pembangkit bila terjadi perubahan pasokan dari sumur uap atau pembebanan dari pembangkit. Karena uap panas bumi dari sumur uap tidak murni uap maka uap kemudian disalurkan ke separator yang berfungsi memisahkan partikel padat yang terbawa bersama uap. Dari separator, masuk ke deminister (memisahkan butiran air dari uap panas bumi, untuk menghindari terjadinya vibrasi, erosi, dan pembentukan kerak pada sudu dan nozzle turbine). Uap yang sudah bersih dialirkan menuju turbine melalui *main steam valve*. Uap akan menggerakkan turbin dan memutar generator dengan kecepatan 3000 rpm. Keluaran generator berupa energi listrik dengan arus 3 fasa, frekuensi 50 Hz, dan tegangan misalkan 11,8 kV. Agar bisa dipararelkan dengan sistem distribusi, tegangan listrik dinaikan hingga 150 kV melalui step-up transformer. Uap bekas memutar turbin dikondensasikan di dalam kondenser. Proses kondensasi terjadi akibat penyerapan panas oleh air pendingin yang diinjeksikan lewat spray-nozzle. level air kondensat dijaga dalam kondisi

normal oleh cooling water pump, lalu didinginkan di cooling tower sebelum disirkulasi kembali. Kelebihan air kondensat akan diinjeksikan kembali (reinjeksi) ke dalam reservoir melalui injection well. Reinjeksi dilakukan untuk mengurangi pengaruh pencemaran lingkungan, mengurangi ground subsidence, menjaga tekanan, serta *recharge water bagi reservoir*

3.6. Kelebihan dan kekurangan PLTP

Kelebihan

- a) Biaya operasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) lebih rendah dibandingkan dengan biaya operasi pembangkit listrik yang lain. Ramah lingkungan, energi yang clean. Mampu berproduksi secara terus menerus selama 24 jam, sehingga tidak membutuhkan tempat penyimpanan energi (energy storage). Tingkat ketersediaan (availability) yang sangat tinggi yaitu diatas 95%. Bebas emisi (binary-cycle). Tidak memerlukan bahan bakar. Harga yang kompetitive.

- b) PLTP merupakan pembangkit listrik paling bersih dan minim emisi , sehingga bertujuan untuk mengurangi emisi yang mencemari lingkungan

Bersih

PLTP tidak menggunakan bahan bakar untuk menghasilkan uap panas guna memutar turbin serta menghemat pemanfaatan bahan bakar fosil yang tidak bisa diperbaharui. Kita mengurangi emisi yang merusak atmosfer kita

- c) Mengoptimalkan pendayagunaan energy panas bumi nasional sebagai sumber energy terbarukan yang memiliki potensi sangat banyak jumlahnya di Indonesia
- d) Mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil
- e) PLTP Flash System dengan analisa exergy dan tinjauan thermodinamika diharapkan mampu merealisasikan suatu pembangkit dengan unjuk kerja optimal disesuaikan dengan kondisi karakteristik sumur

Kekurangan

- a) Tidak bisa diekspor (*unexportable resources*). Cairan bersifat korosif. Effisiensi agak rendah, namun karena tidak perlu bahan bakar, sehingga effisiensi tidak merupakan faktor yang sangat penting. Untuk teknologi dry steam dan flash masih menghasilkan emisi walau sangat kecil.
- b) Penurunan stabilitas tanah yang akan berakibat pada bahaya erosi dan akan mempengaruhi pada kegiatan operasional
- c) Menyusut atau menurunnya debit maupun kualitas sumber mata air tanah maupun danau-danau di sekitar area pembangunan yang akan menyebabkan gangguan pada kehidupan biota perairan dan menurunnya kemampuan tanah untuk menahan air
- d) Berubahnya tata guna lahan, perubahan dan ancaman kebakaran hutan dimana diperlukan waktu antara 30-50 tahun untuk mengembalikan fungsi hutan lindung seperti semula.