

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 SIKLUS TERMODINAMIKA

Termodinamika merupakan siklus yang sumber utamanya dari fluida cair yang dipanaskan hingga menjadi uap dan diproses hingga menjadi energi listrik, dalam ilmu termodinamika sistem memainkan peran penting dalam perubahan energi dan massa. Sistem termodinamika dibagi menjadi tiga jenis utama, yaitu sistem terbuka, sistem tertutup, dan sistem terisolasi[3].

1. Sistem Terbuka

Pada sistem ini terjadi pertukaran massa dan energi antara sistem dan lingkungannya, dalam sistem terbuka energi dan massa dapat melintasi batas sistem dan berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya[4].

2. Sistem Tertutup

Dalam sistem ini terjadinya pertukaran energi tetapi tidak dengan pertukaran massa antara sistem dan lingkungannya, sistem ini memungkinkan perubahan energi dalam bentuk kerja tetapi tidak memungkinkan pertukaran massa antara sistem dan lingkungan[4].

3. Sistem Terisolasi

Sistem termodinamika yang satu ini tidak ada pertukaran energi atau massa antara sistem dan lingkungannya, seperti pada tabung gas yang terisolasi yang dimana pada tabung gas tersebut tidak memungkinkan terjadinya pertukaran energi atau massa dengan lingkungan sekitarnya[4].

Pada ilmu termodinamika terdapat serangkaian hukum yang dapat mengatur perilaku sistem yang terkait dengan energi dan perubahan suhu. Pondasi utama dari hukum termodinamika yaitu hukum awal atau *zeroth law*, yang menjadi dasar bagi tiga bentuk hukum termodinamika lainnya yaitu:

1. *Zeroth Law of Thermodynamics*

Hukum ini menyatakan bahwa ketika dua sistem berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem ketiga, maka mereka berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain[5].

Dalam konteks sistem *organic rankine cycle*, hukum ini memastikan bahwa semua komponen seperti Evaporator, turbin, kondensor, dan pompa berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain saat beroperasi pada kondisi stabil yang berfungsi untuk memastikan energi panas yang ditransfer kedalam komponen-komponen tersebut secara efisien dan konsisten.

2. *First Law of Thermodynamics*

Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnakan, hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya[3], [6].

3. *Second Law of Thermodynamics*

Hukum ini menyatakan bahwa entropi suatu sistem yang tidak dalam keseimbangan termal akan meningkat, dalam sistem *organic rankine cycle* dapat dijelaskan bahwa tidak semua energi panas dapat diubah menjadi energi mekanik dan sebagian energi akan selalu hilang sebagai panas buangan[7].

4. *Third Law of Thermodynamics*

Dalam hukum ini dapat dinyatakan bahwa entropi dari suatu sistem yang mendekati nol saat suhu mendekati nol absolut, hukum ini tidak langsung mempengaruhi kegiatan sehari-hari[7].

2.2 KONSEP DASAR ORGANIC RANKINE CYCLE

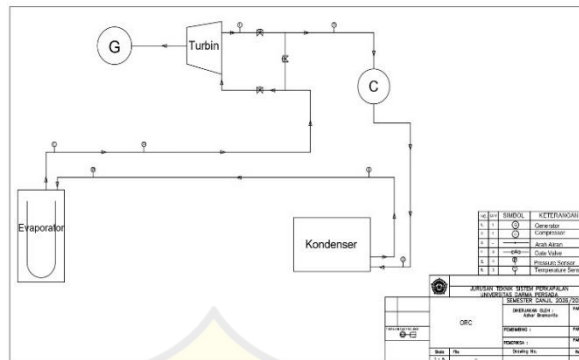


Gambar 2. 1 permodelan organic rankine cycle
Sumber: dokumen pribadi

Organic rankine cycle merupakan siklus termodinamika yang digunakan untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanik melalui fluida kerja yang mengalami proses pemanasan, ekspansi, kondensasi, dan kompresi, sistem ini digunakan dalam pembangkit listrik karena memanfaatkan panas dari pembakaran fluida cair untuk menghasilkan daya secara efisien dan terus menerus[8]. Pada proses siklus rankine terdiri atas:

- Kompresi isentropik (pompa)
- Pemanasan isobarik (Evaporator)
- Ekspansi isentropik (turbin)
- Kondensasi isobarik (kondensor)

2.2.1 KOMPONEN UTAMA ORGANIC RANKINE CYCLE



Gambar 2. 2 komponen utama ORC
Sumber: dokumen pribadi

Komponen-komponen *organic rankine cycle* berfungsi sebagai model operasi mesin uap panas yang digunakan untuk pembangkit listrik pada turbin. Komponen *organic rankine cycle* seperti Evaporator, turbin, kondenser, dan pompa.

1. Evaporator

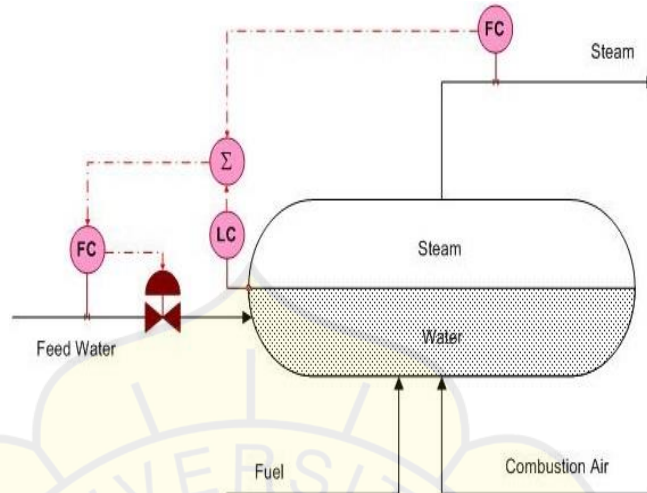


Gambar 2. 3 evaporator
Sumber: dokumen pribadi

Evaporator merupakan salah satu alat bantu yang memiliki fungsi untuk memanaskan fluida cair sampai menguap. Fungsi dari evaporator adalah menghasilkan uap ke turbin listrik untuk diubah menjadi tenaga listrik. Untuk

menjalankan fungsinya, Evaporator memiliki beberapa komponen penting seperti:

- Drum ketel



Gambar 2. 4 Drum ketel
Sumber: www.chekaproject.wordpress.com

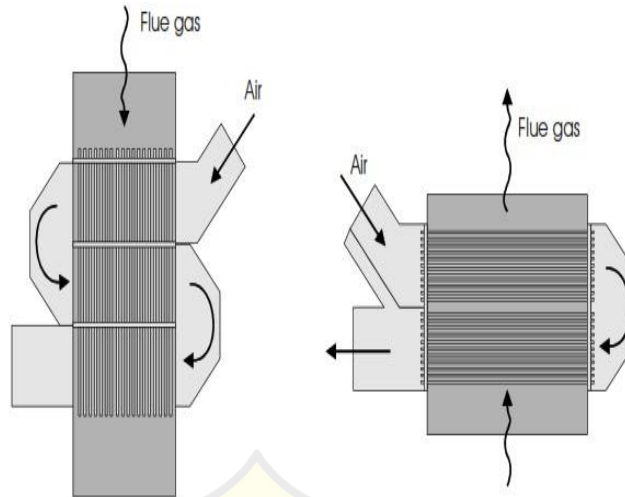
Drum ketel memiliki fungsi sebagai reservoir air panas dan sebagai tempat pembangkit uap, yang didalamnya berisi steam dan air jenuh.

- *Furnace* (Tungku Pengapian)

Furnace atau tungku pengapian terbagi menjadi dua bagian, yang terdiri dari ruang pertama dan ruang kedua. Pada chamber pertama pemanas langsung disediakan oleh sumber panas yang diserap oleh pipa sedangkan pada chamber kedua, panas yang diserap di bagian atas berasal dari udara panas hasil proses pembakaran yang terjadi di chamber pertama[9].

Pada ruang pemanas kedua berfungsi sebagai menyerap limbah dari ruang pemanas pertama sehingga energi panas yang dihasilkan di ruang pertama tidak terbuang dengan percuma dan dapat mengatur suhu cairan yang telah dipanaskan di ruang pertama[9].

- *Airheater*

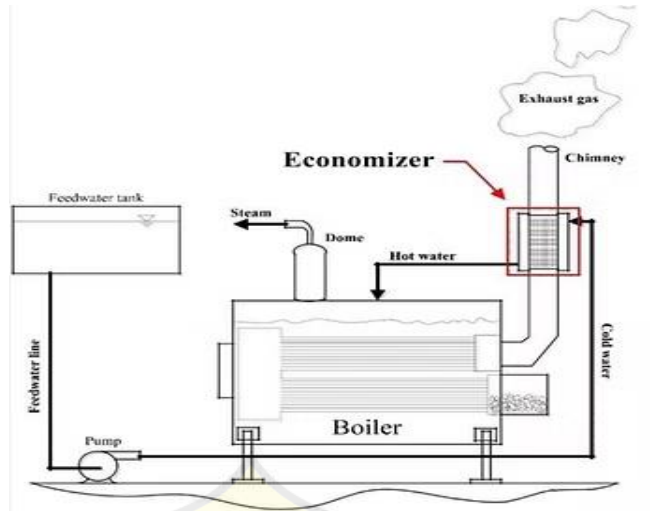


Gambar 2. 5 Airheater
Sumber: www.pttensor.com

Komponen ini memiliki dua fungsi pada Evaporator untuk mendinginkan gas sebelum lepas ke atmosfer sehingga dapat meningkatkan efisiensi, serta dapat menaikkan suhu udara pembakaran yang masuk, *airheater* dapat dianggap salah satu jenis Evaporator regeneratif.

Pada *airheater* regenerative menggunakan rotor yang berputar perlahan untuk mentransfer kalor, rotor yang berputar akan dipanaskan secara bergantian didalam aliran gas buang dan didinginkan dalam aliran udara, dengan cara ini *airpreheater* dapat mengurangi kecenderungan korosi, khususnya Evaporator yang memiliki kandungan bahan bakar belerang. *Airpreheater* ini juga dapat dibersihkan dengan mudah dengan cara menyemburkan uap diatas celas dari lembaran logam[10].

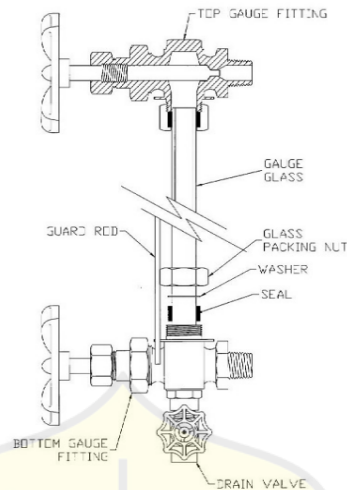
- *Economizer*



Gambar 2. 6 *ecomizer*
Sumber: www.researchgate.net

Dalam komponen ini memiliki fungsi sebagai alat pemindahan panas berbentuk tubular yang dapat digunakan untuk memanaskan air sebelum masuk ke *steam drum*. Cara kerja dari komponen ini cukup sederhana yaitu pada bagian bawah terdapat sakuran pipa yang masuk secara horizontal yang dilalui air dengan suhu yang normal kedalam *economizer*, dan pipa lainnya yang terpasang diatas bagian *economizer*. Kedua pipa tersebut dihubungkan malalui sekelompok pipa vertical, pada katup yang terpasang di pipa horizontal atas digunakan untuk memasok air panas ke Evaporator[11].

- *Sight Glass* (Gelas Penduga)



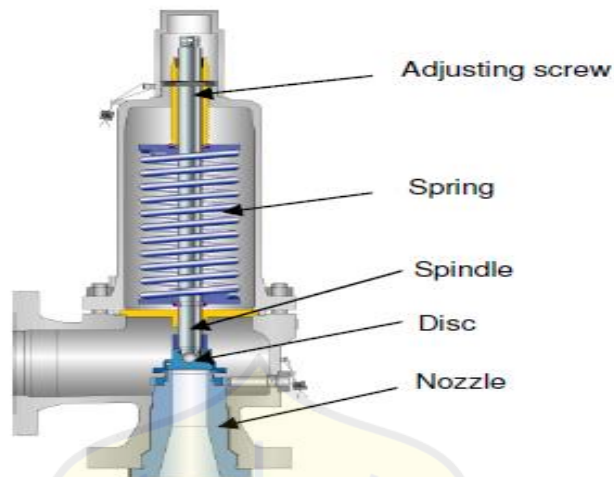
Gambar 2. 7 Skema Sight Glass (Gelas Penduga)

Sumber: www.sightflow.com

Sight Glass pada sistem Evaporator memiliki beberapa fungsi yaitu untuk memantau level air dengan adanya fungsi itu operator dapat melihat level air didalam Evaporator, hal ini sangat penting dikarenakan level air yang tepat sangat diperlukan untuk menjaga kinerja optimal dan mencegah kerusakan pada Evaporator, dan juga dapat menjaga level air untuk tetap stabil.

Sight Glass pada sistem Evaporator biasanya terdiri dari pipa kaca yang transparan dan dipasang secara horizontal atau vertical pada sisi Evaporator, dimana air di dalam Evaporator menciptakan tekanan yang akan mendorong air ke dalam kaca penglihatan. Untuk menentukan level air dalam Evaporator dapat dilihat dari perbedaan tinggi antara kedua ujung kaca penglihatan[12].

- Safety Valve (Katup Pengaman)



Gambar 2. 8 Skema Safety Valve
Sumber: Arian, 2021

Safety Valve (katup pengaman) memiliki peran yang sangat penting untuk melindungi Evaporator dari tekanan berlebih yang dapat menyebabkan kerusakan serius atau bahkan ledakan dengan cara membuka untuk melepaskan tekanan dan kemudian menutup kembali setelah kondisi Evaporator sudah kembali normal. *Safety valve* memiliki 3 bagian utama yaitu outlet, disc, dan pegas yang dimana bagian tersebut mempunyai fungsi masing-masing, uap bertekanan masuk melalui valve melewati nozzle dan masuk kedalam Evaporator. Disc memiliki fungsi untuk penutup atau membuka sesuai dengan tekanan di dalam Evaporator, sedangkan pegas lah yang mengatur tekanan, ketika tekanan dalam Evaporator terlalu tinggi[13].

2. Turbin



Gambar 2. 9 turbin
Sumber: dokumen pribadi

Turbin adalah komponen yang berfungsi untuk mengubah energi panas dari uap menjadi energi mekanik (putaran) sebagai penggerak untuk menghasilkan energi listrik.

Prinsip kerja dari turbin ini yaitu uap yang masuk kedalam turbin melalui nozel untuk mengubah energi panas dari uap menjadi energi kinetis. Tekanan uap yang keluar dari nozel cenderung kecil tetapi kecepatan uap yang keluar dari nozel lebih besar dari pada saat uap masuk kedalam nozel.

Uap yang mengalir melalui celah turbin dapat mempengaruhi perubahan kecepatan uap, dari perubahan kecepatan uap tersebut dapat menimbulkan gaya yang mendorong dan kemudian memutar poros turbin yang dapat menghasilkan energi mekanik[14].

3. Kondensor



Gambar 2. 10 kondensor
Sumber: www.abangbenerin.com

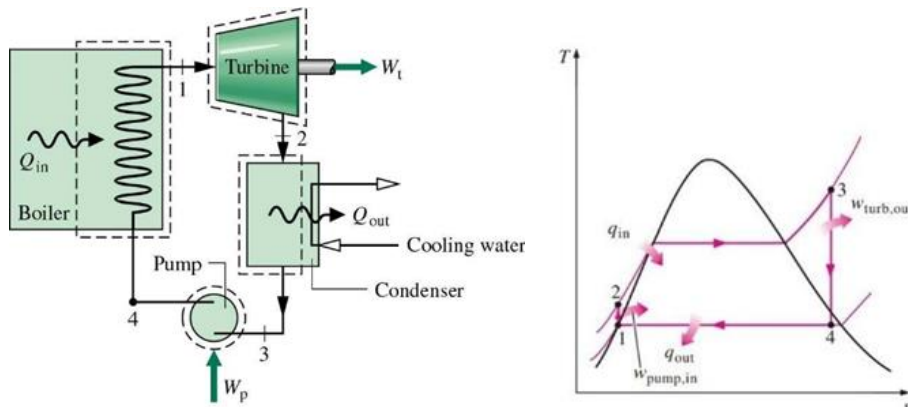
Kondenser merupakan bagian dari *refrigerasi* yang menerima uap tekanan tinggi dari kompresor dan menghilangkan panas pengembunan dengan cara mendinginkan uap panas ke titik embunnya dengan cara menghilangkan panas pada media yang di dinginkan[15].

4. Pompa

Pompa adalah suatu alat yang digunakan untuk memindahkan suatu cairan/fluida dari suatu tempat ke tempat lain dengan cara menaikkan tekanan cairan yang berfungsi untuk mengatasi hambatan-hambatan pada saat pengaliran. Hambatan-hambatan pada pengaliran tersebut dapat berupa perbedaan tekanan, perbedaan ketinggian atau hambatan gesek[16].

2.2.2 KONSEP DASAR ORGANIC RANKINE CYCLE

Siklus Rankine merupakan salah satu jenis siklus termodinamika yang digunakan untuk memanfaatkan perubahan panas menjadi energi mekanik.



Gambar 2. 11 Diagram alir dan Diagram T-s Siklus Rankine Ideal Sederhana

Sumber: Thermodynamics and Engineering Approach, (Cengel (2007))

Siklus rankine sederhana dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan.

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_e - h_l$$

Persamaan tersebut merupakan penyederhanaan dari *steady-flow energy equation* per satuan massa dengan menganggap bahwa perubahan energi kinetik dan potensial dari uap sangat kecil dan dapat diabaikan.

Untuk proses yang terjadi pertama yaitu dengan air masuk kedalam pompa sebagai cairan jenuh yang dikemudai dikompresi secara isentropis hingga tekanannya naik menjadi tekanan kerja Evaporator. Penambahan tekanan tersebut menyebabkan volume spesifik dan temperature air menjadi naik.

$$W_{pump,in} = h_2 - h_1 \text{ (pompa)}$$

$$W_{pump.in} = v (P_2 - P_1)$$

Pada tahap selanjutnya Evaporator akan menjadi tempat berpindahnya kalor dari reaksi pembakaran Evaporator ke air, dimana air akan berubah fasanya dari kondisi cair jenuh menjadi *superheated vapor* (uap jenuh). Kalor tersebut berasal dari reaksi pembakaran bahan bakar.

$$Q_{in} = h_3 - h_2 \text{ (boiler)}$$

Pada tahap selanjutnya air yang keluar dari Evaporator dan menuju ke turbin dalam kondisi *superheated*. Pada turbin uap akan berekspansi dan memutar turbin,

tekanan uap akan turun serta kondisi uap berubah menjadi uap jenuh menjadi fasa campuran.

$$W_{turbine.out} = h_3 - h_4 \text{ (turbin)}$$

Setelah mengalami perubahan tekanan uap yang terjadi di turbin uap tersebut diarahkan masuk kedalam kondensor. Pada kondensor terjadi pelapasan kalor dari uap menuju ke media pendingin pada tekanan konstan. Pelepasan panas tersebut menyebabkan fasa uap berubah menjadi air dengan kondisi cair jenuh. Kondisi cair jenuh tersebut akan masuk kembali kedalam pompa untuk melengkapi siklus.

$$Q_{out} = h_4 - h_1 \text{ (kondensor)}$$

Pada diagram T-s, kurva q_{in} menuju Evaporator merupakan daerah penambahan kalor ke air pada Evaporator dan kurva $w_{turb out}$ menuju ke q_{out} merupakan daerah pelepasan kalor pada kondensor. Selisih diantara keduanya merupakan hasil dari siklus[17].

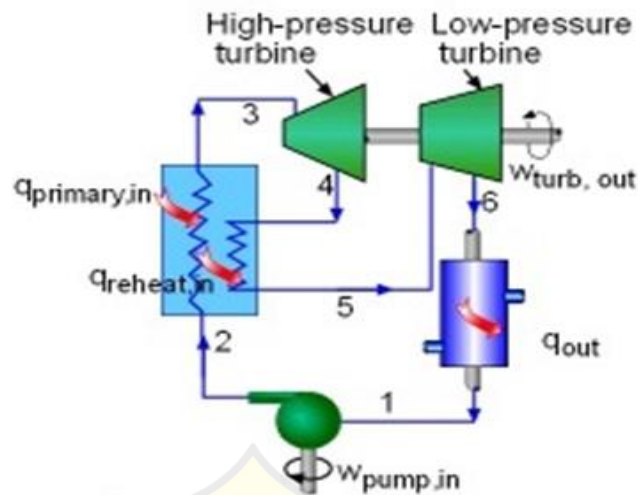
2.2.3 EFISIENSI TERMAL

Efisiensi termal dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\eta_{th} = \frac{W_{turbine} - W_{pump}}{Q_{in}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

Efisiensi siklus rankine dapat ditingkatkan untuk menghasilkan kerja netto yang sama dengan konsumsi bahan bakar yang lebih sedikit[18]. Efisiensi siklus rankine ditingkatkan dengan cara:

1. Reheating

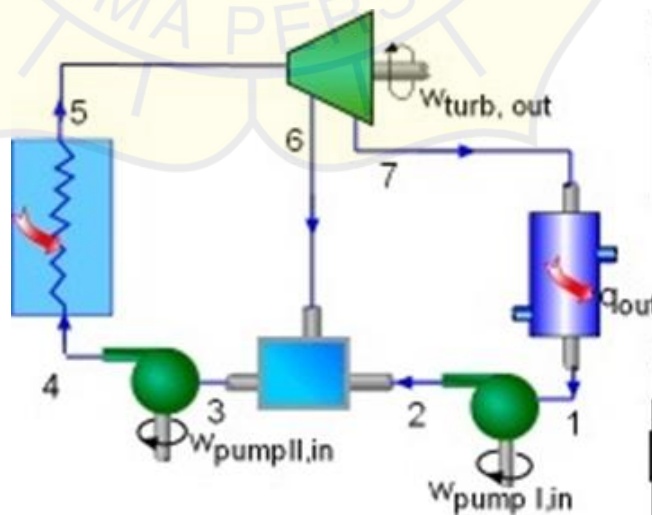


Gambar 2. 12 siklus rankine dengan cara reheating

Sumber: www.dunia-pltu.blogspot.com

Reheating pada siklus rankine merupakan salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi dengan cara menggunakan *High Pressure* dan *Low Pressure* yang dimana keduanya berada pada satu poros. Uap air yang keluar dari turbin *High Pressure* masuk kembali kedalam Evaporator untuk dipanaskan lagi menjadi uap *superheat*. Setelah dipanaskan uap *superheat* tersebut kembali masuk ke turbin *low pressure* dengan cara ini efisiensi siklus rankine dapat meningkat[19].

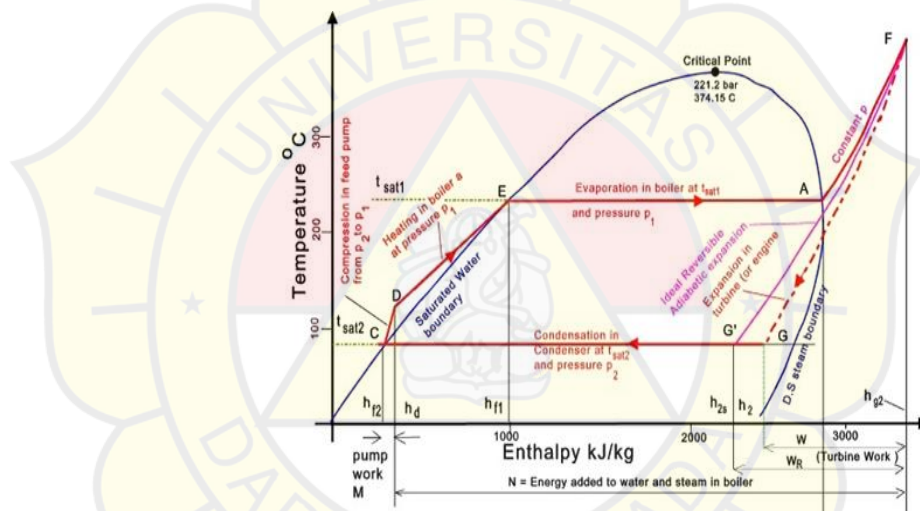
2. Preheater atau Regeneratif



Gambar 2. 13 Siklus Rankine dengan cara Preheater

Sumber: www.dunia-pltu.blogspot.com

Untuk meningkatkan efisiensi dengan cara ini adalah proses perpindahan dengan menggunakan *preheater open feed water heater*, dimana pada cara ini perpindahan panas secara konveksi akan bertemu dan bercampur langsung dengan fluida kerja diwadiah tertentu. Cara ini dapat dilakukan dari fluida sebelum masuk kedalam Evaporator. Sumber panas yang digunakan untuk *preheater* berasal dari uap air yang diambil dari turbin, setelah itu uap akan dilarikan melewati pipa menuju kondensor. Air yang keluar dari kondensor dipompa menuju ke *Evaporator* untuk dipanaskan kembali. cara tersebut dilakukan secara berulang agar tekanan pada uap air dapat terjaga[19].



Gambar 2. 14 Diagram Temperatur-enthalpy siklus rankine

Sumber: www.slideshare.net

Air menjadi fluida kerja siklus rankine dan mengalami siklus tertutup (*close-loop cycle*) yaitu secara konstan air pada akhir proses siklus masuk kembali ke proses awal siklus. Pada siklus rankine, air mengalami empat proses sesuai dengan gambar diatas:

1. Proses C-D: Fluida dipompa dari tekanan rendah ke tekanan tinggi pada proses ini fluida masih berfase cair sehingga pompa tidak membutuhkan input tenaga yang terlalu besar. Proses ini dinamakan kompresi-isentropik karena saat dipompa secara ideal tidak ada entropi yang terjadi.

2. Proses D-F: Air bertekanan tinggi akan masuk ke dalam Evaporator dan mengalami sebuah proses yaitu memanaskan cairan dengan cara isobarik. Di Evaporator air mengalami perubahan fase dari air, campuran cair dan uap, serta 100% uap kering.
3. Proses F-G: Proses yang terjadi pada turbin uap. Uap air yang kering selanjutnya akan masuk ke turbin dan mengalami proses ekspansi secara isentropik. Energi yang tersimpan akan dikonversi sebagai energi gerak pada turbin.
4. Proses G-C: Uap air yang keluar dari turbin uap akan masuk ke dalam kondenser dan mengalami proses isobaric. Uap air lalu diubah kembali menjadi cair sehingga dapat digunakan pada proses siklus.

Pada gambar di atas merupakan gambaran siklus melalui diagram T-S yang dimana pada penggunaannya ada beberapa modifikasi secara proses seperti menggunakan *preheater* sebelum cairan masuk ke dalam Evaporator dan juga pemanasan ulang uap air yang keluar dari turbin pertama (*High Pressure Turbine*) sehingga dapat digunakan lagi untuk masuk ke turbin kedua (*Low Pressure Turbine*) [19].

Efisiensi thermal dari siklus Rankine dapat didefinisikan sebagai rasio antara kerja yang dihasilkan oleh turbin dan jumlah energi yang ditambahkan ke dalam sistem melalui Evaporator dengan menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{W_{turbin}}{Q_{in}}$$

Dimana:

η = efisiensi termal

W_{turbin} = kerja yang dihasilkan oleh turbin (joule)

Q_{in} = energi yang ditambahkan melalui Evaporator (joule)

1. Menentukan kondisi kerja di tiap titik siklus
 - T_1 dan P_1 untuk cairan di kondensor (suhu dan tekanan keluar dari kondensor).

- T_2 dan P_2 untuk cairan di Evaporator (suhu dan tekanan yang masuk kedalam Evaporator).
 - T_3 dan P_3 untuk uap keluar dari turbin.
 - T_4 dan P_4 untuk uap dikondensor.
2. Menghitung energi yang ditambahkan di Evaporator Q_{in}
- Gunakan enthalpy uap dan cairan:

$$Q_{in} = h_3 - h_2$$

Dimana h_3 adalah enthalpy uap pada titik keluar dari Evaporator dan h_2 adalah enthalpy cair pada titik masuk ke Evaporator.

3. Menghitung kerja yang dihasilkan oleh W_{turbin}
- Gunakan Enthalpy

$$W_{turbin} = h_3 - h_4$$

Dimana h_4 adalah enthalpy uap pada titik keluar dari turbin.

4. Menghitung Efisiensi
- Substitusi kedalam rumus efisiensi:

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

Dengan contoh perhitungan seperti:

- $h_3 = 2800 \text{ kJ/kg}$ (enthalpy uap keluar dari Evaporator).
- $h_2 = 500 \text{ kJ/kg}$ (enthalpy cair masuk ke Evaporator).
- $h_4 = 2000 \text{ kJ/kg}$ (enthalpy uap keluar dari turbin).
- $Q_{in} = 2800 - 500 = 2300 \text{ kJ/kg}$
- $W_{turbin} = 2800 - 2000 = 800 \text{ kJ/kg}$
- $\eta = \frac{800}{2300} = 0,3478$ atau 34,78%

2.3 FLUIDA KERJA ORGANIC RANKINE CYCLE

Fluida kerja merupakan zat cair yang digunakan sebagai media untuk menyerap panas dari sumber energi yang dipanaskan lalu menjadi uap, kemudian diekspansikan dalam turbin atau *ekspander* untuk menghasilkan energi mekanik, setelah itu dikondensasikan kembali menjadi zat cair untuk digunakan kembali.

Pada penelitian ini fluida kerja yang akan digunakan pada *organic rankine cycle* menggunakan *refrigerant* atau *freon* yang memiliki titik didih lebih rendah sehingga mampu beroperasi dengan sumber panas bersuhu rendah sekitar 80 sampai 150 °C.

2.3.1 JENIS – JENIS FREON ATAU REFRIGERANT

Refrigerant atau *freon* terdapat berbagai jenis yang dapat digunakan dalam industri tersebut, setiap jenis *refrigerant* memiliki karakteristik, sifat, dan kinerja yang berbeda, yaitu:

1. Chlorofluorocarbons R12



Gambar 2. 15 freon R12

Sumber: RefrigerantHQ.com

Chlorofluorocarbons atau yang dikenal dengan R12 merupakan salah satu jenis *refrigerant* yang dipakai dalam sistem AC, R12 memiliki sifat volatile, stabil secara kimiawi, tidak mudah terbakar, dan memiliki gas tidak berwarna pada kondisi standar serta titik didih yang rendah sehingga R12 cocok digunakan untuk siklus pendinginan[20][21].

2. Hydrochlorofluorocarbons R22



Gambar 2. 16 freon R22

Sumber: edukasini.com

R22 merupakan sebuah *refrigerant* yang biasa digunakan dalam sistem AC, *chiller*, dan aplikasi HVAC karena stabilitas dan efisiensi termalnya. R22 itu sendiri memiliki bentuk gas yang tidak berwarna pada kondisi standar, dan memiliki efisiensi pendingin yang baik, rasio kompresi relatif rendah pada beberapa konfigurasi sehingga dapat mengurangi beban kondensor dan menjaga performa sistem[22].

3. Hydrofluorocarbons (HFCs) R410a, R-32, R134a

Pada jenis ini ada beberapa tipe *refrigerant* atau freon yang bisa digunakan dalam fluida kerja yaitu:

- R410a



Gambar 2. 17 freon R410a

sumber: edukasini.com

Freon atau *refrigerant* pada jenis ini merupakan campuran yang terdiri dari R32 dan R125 dengan perbandingan 50:50, *freon* jenis ini dikembangkan sebagai pengganti R22 untuk aplikasi sistem pendingin modern. Pada jenis *freon* ini tekanan pada saat beroperasi jauh lebih tinggi dibanding R22 sehingga komponen dan desain pipa harus dibuat untuk tekanan kerja yang lebih tinggi, dan *freon* jenis ini memiliki sifat tidak mudah terbakar, dan tidak beracun[23].

- R-32



Gambar 2. 18 freon R-32

Sumber: edukasini.com

Freon R-32 merupakan *refrigerant* tunggal dari golongan HFC (*hydrofluorocarbon*) seperti R22 dan R410A, *freon* R-32 memiliki kelebihan seperti mampu menstransfer panas lebih cepat dan efisien dibandingkan R410A, meskipun jenis R-32 ini mempunyai efisiensi yang tinggi namun *freon* R-32 memiliki sifat sedikit mudah terbakar, tidak bisa digunakan pada AC lama dikarenakan perbedaan tekanan dan sifat kimia yang tinggi[23].

- R134a



Gambar 2. 19 freon R134a

Sumber: edukasini.com

R134a merupakan *refrigerant* golongan HFC yang dikembangkan sebagai pengganti R12 karena tidak merusak lapisan ozon (ODP = 0). Pada *freon* berjenis ini memiliki sifat gas yang tidak berwarna dan tidak berbau, diklasifikasikan A1, memiliki tekanan rendah hingga sedang pada saat beroperasi. *Freon* jenis ini biasanya digunakan untuk AC mobil, kulkas rumah tangga, *freezer*, dan *chiller*[20], [21].

2.4 TURBIN ATAU EXPANDER

Turbin uap merupakan perangkat mekanis yang mengubah energi termal dalam uap menjadi energi mekanik dengan memutar rotor, hasil dari putaran tersebut dapat digunakan untuk menggerakkan generator listrik, pompa, atau kompresor. Turbin uap itu sendiri bekerja sangat mirip dengan kincir angin yang digunakan sebagai menghasilkan tenaga listrik dengan memanfaatkan angin, tetapi turbin ini menggunakan tekanan uap untuk bergerak dengan cara mengubah energi uap menjadi energi mekanik.

Sistem turbin uap pada pembangkit listrik pada *organic rankine cycle* digunakan sebagai sistem pembangkit tenaga yang memanfaatkan energi panas dari uap fluida kerja untuk menggerakkan turbin yang berfungsi untuk mengubah energi

mekanik menjadi listrik dengan menggerakkan generator listrik yang dimana pada sistem ini bekerja menggunakan prinsip siklus *organic rankine cycle*[24].

2.4.1 PRINSIP KERJA TURBIN ATAU EKSPANDER

Turbin atau *expander* pada *organic rankine cycle* memiliki fungsi untuk mengubah energi termal fluida kerja yang menguap menjadi energi mekanik dengan melakukan ekspansi fluida dari tekanan tinggi ke tekanan rendah sehingga entalpi fluida turun dan energi mekanik dapat diambil oleh rotor atau mekanisme turbin[24].

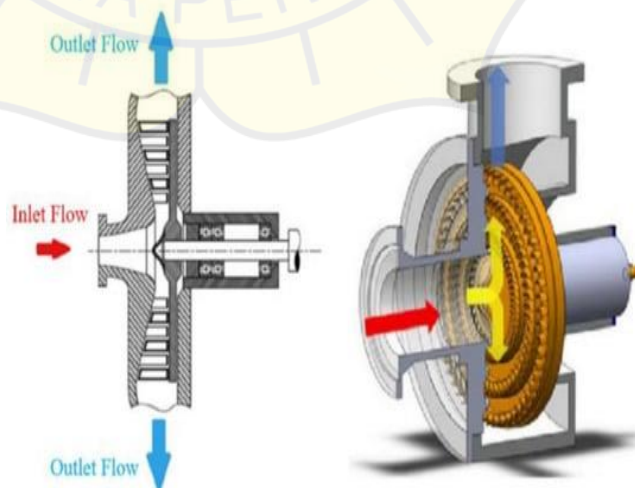
2.4.2 JENIS-JENIS EKSPANDER

Turbin uap yang diklasifikasikan berdasarkan cara kerja dan aliran uap di dalam turbin, jenis-jenis turbin yaitu:

1. Turbo Ekspander

Pada ekspander ini fluida bertekanan tinggi dialirkan dari saluran keluar evaporator ke saluran masuk turbin, fluida bertekanan tinggi tersebut akan mentransfer momentumnya keserangkaian sudu yang bergerak, sudu-sudu yang bergerak tersebut terhubung ke poros yang terhubung dengan generator untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Turbo ekspander memiliki dua kategori utama seperti turbin aksial dan turbin radial[25].

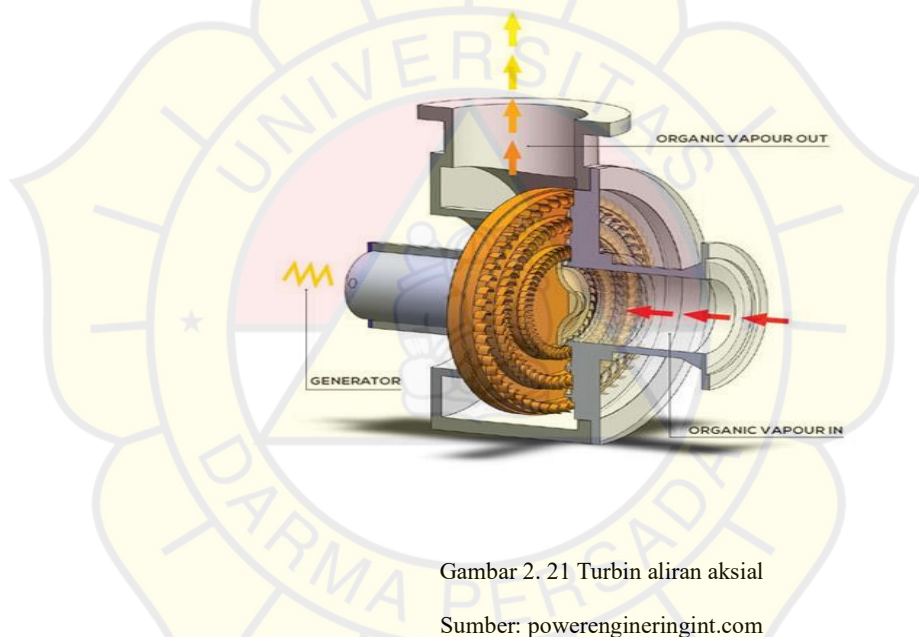
- Turbin radial



Gambar 2. 20 turbin aliran radial

Turbin radial merupakan jenis turbin yang dimana fluida kerjanya masuk kedalam roda turbin dari arah radial (samping) dan keluar dari arah aksial, aliran fluida memasuki sudu turbin secara menyilang terhadap sumbu poros setelah itu dibelokkan menuju *impeller* untuk menghasilkan torsi pada poros turbin. Pada turbin aliran radial sering digunakan pada sistem *organic rankine cycle* berskala kecil hingga menengah (0,5 – 50 Kw) karena memiliki efisiensi yang tinggi, serta kecepatan rotasi yang rendah dibandingkan turbin aksial[26].

- Turbin aksial



Gambar 2. 21 Turbin aliran aksial

Sumber: powerengineeringint.com

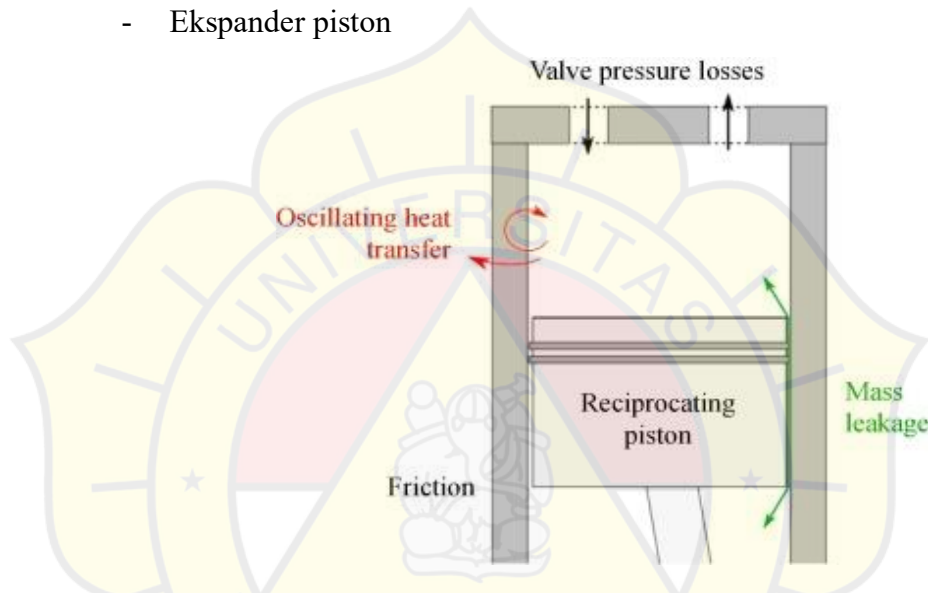
Turbin aksial merupakan jenis turbin yang dimana aliran fluidanya mengalir sejajar dengan sumbu poros turbin, pada turbin jenis ini energi kinetik fluida diubah menjadi energi mekanik melalui interaksi langsung antara aliran aksial dan baling-baling yang terpasang pada rotor. Turbin aliran aksial merupakan jenis paling umum yang digunakan pada pembangkit daya besar seperti turbin uap konvensional, turbin gas, maupun turbin pada *organic rankine cycle* berskala menengah-besar karena mampu menangani debit

fluida yang besar dan mampu menghasilkan efisiensi yang tinggi[26].

2. Ekspander Volumerik

Pada ekspander volumerik ini menggunakan prinsip perubahan volume ruang kerja secara mekanis untuk mengubah energi fluida bertekanan menjadi energi mekanik, ekspander jenis ini menggunakan ruang tertutup yang volumenya sering berubah seiring dengan pergerakan elemen mekanisnya seperti piston, rotor, scroll, dan screw[27].

- Ekspander piston

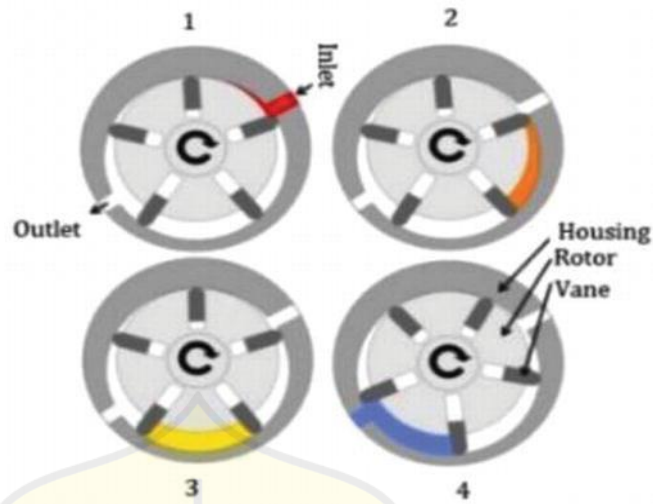


Gambar 2. 22 piston expander

Sumber: www.sciencedirect.com

Pada ekspander piston itu sendiri memiliki prinsip kerja dengan cara mengubah energi fluida bertekanan menjadi energi mekanik, uap bertekanan tinggi masuk kedalam ruang silinder, setelah itu tekanan dari fluida yang masuk kedalam silinder dapat mendorong piston bergerak sehingga volume ruang bertambah, energi ekspansi fluida akan dikonversi menjadi gerak mekanik piston, gerakan yang dihasilkan dari fluida kerja akan diteruskan ke poros engkol untuk menghasilkan daya listrik[27].

- *Rotary vane expander*

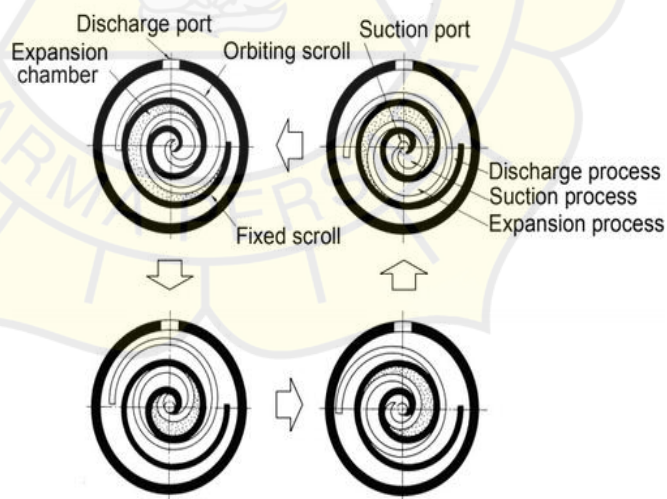


Gambar 2. 23 rotary vane expander

Sumber: intechopen.com

Ekspander jenis ini memiliki prinsip kerja dengan cara melakukan perubahan volume ruang kerja akibat pergerakan *vane* (bilah geser) didalam rotor, yang memungkinkan untuk mengubah energi fluida menjadi energi mekanik pada poros[27].

- *Scroll expander*



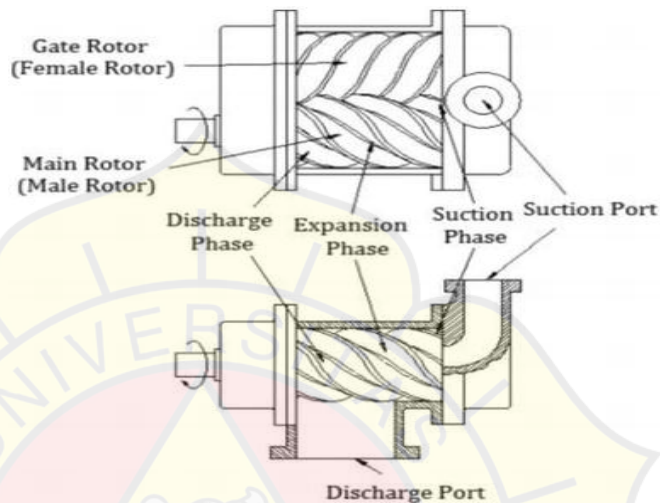
Gambar 2. 24 scroll expander

Sumber: intechopen.com

Scroll expander merupakan jenis ekspander yang terdiri dari dua spiral yaitu *scroll* yang mengorbit dan *scroll* tetap. *Scroll* yang mengorbit dapat bergerak bersama dengan *scroll* tetap dalam

toleransi yang ketat sehingga fluida kerja bergerak masuk dari pusat dan bergerak keluar didalam ruang antara *scroll* yang mengorbit dan bergerak. Pada ekspander berjenis ini biasanya beroperasi pada aplikasi dengan daya kerluaran rendah <10 Kw, karena kecepatannya yang rendah[27].

- *Screw expander*



Gambar 2. 25 screw expander

Sumber: intechopen.com

Screw expander yang terdiri dari dua rotor yang dirancang dengan akurat untuk menjebak jumlah fluida kerja yang diperlukan, gerakan yang tersinkronisasi dari rotor yang saling bertautan dapat menghasilkan volume yang berasal dari satu ujung rotor dan berakhir diujung lainnya, setelah itu fluida kerja akan diekspansikan dalam ruangan yang bertautan tersebut[27].

2.5 GENERATOR LISTRIK

Dalam *organic rankine cycle* generator listrik berfungsi untuk mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik melalui induksi elektromagnetik. Poros turbin memutar rotor generator sehingga memotong gaya magnet yang dapat menimbulkan tegangan dan arus pada kumparan strator setelah itu disalurkan ke jaringan listrik.

Ada beberapa jenis generator yang umum dipakai pada pembangkit listrik tenaga uap seperti *synchronous generator*, *induction generator*[28].

- *Synchronous generator*

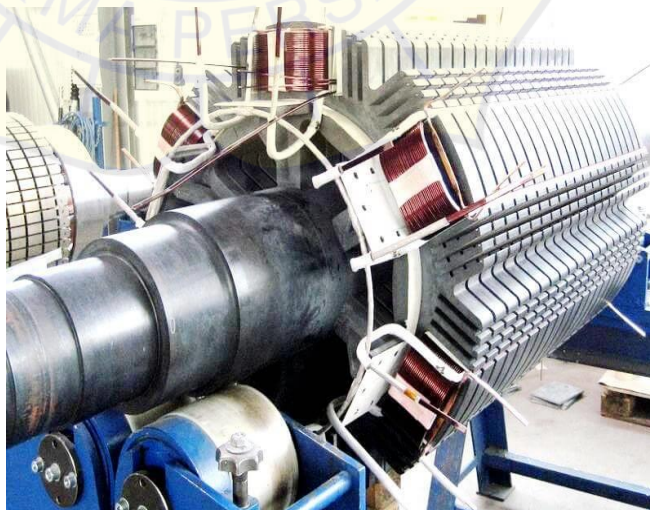


Gambar 2. 26 *synchronous generator*

Sumber: www.linquip.com

Generator pada jenis ini merupakan mesin listrik berjenis AC yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, dimana frekuensi dan kecepatan putar medan magnet rotor berjalan secara sinkron. Untuk membangkitkan medan magnet dibutuhkan sumber arus DC agar generator dapat beroperasi dengan semestinya[28].

- *Induction generator*



Gambar 2. 27 *induction generator*

Pada generator berjenis ini dapat mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dengan memanfaatkan prinsip induksi seperti pada motor induksi, dan medan magnet utama berasal dari arus daya reaktif yang disuplai dari kapasitor[28].

2.6 APLIKASI ORGANIC RANKINE CYCLE PADA KEHIDUPAN

Organic rankine cycle dapat digunakan dalam sistem pembangkit listrik dengan cara fluida kerja yang dipanaskan untuk menghasilkan uap dalam Evaporator. Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang terhubung dengan generator melalui poros. Setelah melewati turbin, uap dikoondensasikan kembali menjadi air dalam kondensor dan dipompa kembali ke Evaporator untuk memulai siklusnya secara berulang.

Penggunaan siklus dapat memberikan efisiensi tinggi serta kemampuan untuk menghasilkan daya besar yang diperlukan untuk menyalakan sistem kelistrikan dan sistem ini juga dapat berfungsi sebagai sistem pemulihan panas buangan untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan. Beberapa pengaplikasian sistem *organic rankine cycle* pada kehidupan yaitu:

1. Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Pada sebuah industri atau perkapalan *organic rankine cycle* dapat digunakan dalam sistem pembangkit tenaga Listrik untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem kelistrikan kapal. Proses ini melibatkan penggunaan turbin uap yang digerakkan oleh uap yang dihasilkan dari pemanas (Evaporator). Uap tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin kemudian menggerakkan generator listrik.

2. Pemanfaatan panas buangan dari mesin dan kendaraan

Pada kendaraan yang sedang beroperasi khususnya truk dan kapal pada saat beroperasi banyak energi yang terbuang melalui gas buang dan air pendingin. Sistem ORC yang digunakan untuk menghasilkan listrik tambahan 0,5 – 5 KW dari panas gas buang dimesin diesel, dan pada kapal laut sistem ORC biasanya

memanfaatkan panas buang dari *exhaust* turbin atau Evaporator untuk menambahkan efisiensi pada sistem propulsi

3. Sistem Pemanas

Pada beberapa kendaraan lebih tepatnya kapal yang memiliki sistem pemanas, sistem *organic rankine cycle* biasa digunakan untuk menyediakan pemanas ruangan dalam kapal. Uap yang dihasilkan oleh siklus rankine digunakan untuk menyediakan panas yang dibutuhkan dalam berbagai proses di dalam kapal, seperti pemanas ruangan atau pemanas air[29].

2.7 SOFTWARE AUTONICS

Autonics merupakan sebuah perusahaan global asal korea selatan yang mengembangkan perangkat otomasi industri yang dapat mengontrol tekanan serta dapat mengukur sebuah parameter seperti suhu dan tekanan. *Autonics* itu sendiri sudah termasuk dengan *hardware* maupun *software* yang dapat membantu untuk mengontrol serta mengukur sebuah parameter. Ada beberapa jenis *software* yang dapat digunakan untuk mengukur serta mengontrol parameter pada sistem operasi *organic rankine cycle* seperti DAQMaster, dan DAQExpress.

2.7.1 FUNGSI AUTONICS

Software *autonics* itu sendiri memiliki beberapa fungsi penting untuk mengetahui hasil dari sistem *organic rankine cycle* yang sedang beroperasi seperti:

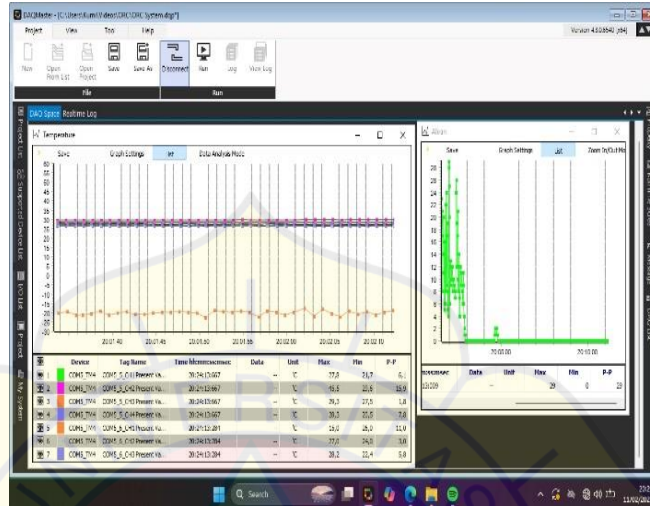
- Software dapat mengonfigurasi dan memprogram perangkat *autonics* seperti mengontrol sebuah temperatur, PID controller yang dapat mengontrol sebuah proses yang sedang berjalan, PLC (programmable logic controller) yang mempunyai fungsi sebagai relay sequensial yang dapat diprogram dengan baik pada software *autonics*, dan data logger memiliki fungsi untuk mencatat data secara real time.
- Dapat melakukan monitoring dan analisis proses secara real time melalui tampilan antarmuka komputer.

Software ini juga dapat mengontrol sistem otomasi seperti pengaturan suhu, tekanan, kecepatan turbin, aliran fluida, dan beban listrik[30].

2.7.2 CARA KERJA AUTONICS

Untuk *software autonics* yang dipakai untuk mengontrol serta memonitoring menggunakan *software* DAQMaster dan DAQExpress.

- DAQMaster



Gambar 2. 28 DAQMaster

Sumber: dokumen pribadi

DAQMaster merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh *autonics* untuk melakukan pemantauan dan perekaman data dari berbagai perangkat pengukuran dan kontrol seperti sensor suhu, tekanan, arus dan kecepatan putaran turbin. DAQMaster digunakan sebagai penghubung antara perangkat sensor dan komputer, sehingga seluruh proses yang terjadi dapat diamati, dan dikendalikan secara otomatis dan *real time*.

Cara kerja dari DAQMaster dimulai dengan pengambilan data dari sensor yang sudah diletakkan di titik utama seperti evaporator untuk mengambil suhu dan tekanan fluida sebelum masuk kedalam turbin, ekspander atau turbin dapat mengambil data dari tekanan dan kecepatan putaran, kondensor untuk mengambil data dari suhu dan tekanan kondensasi, dan pompa kerja untuk mengambil daya arus listrik dan pompa, kemudian sinyal dari sensor tersebut diubah menjadi data digital yang dapat diambil melalui port USB yang terhubung melalui komputer. Tampilan data tersebut dapat menampilkan data secara *real time* dalam bentuk *digital display* seperti angka, grafik, dan tabel data[31].

- DAQExpress

DAQExpress merupakan perangkat lunak yang memiliki fungsi yang sama dengan DAQMaster tetapi *software* ini merupakan versi lebih ringan dari DAQMaster dengan fokus pada kemudahan penggunaan, kecepatan komunikasi, dan visualisasi data langsung dari perangkat tanpa konfigurasi yang kompleks. Untuk pengambilan data pada DAQExpress dengan cara mendeteksi sinyal pada sensor yang telah dipasang disetiap titik seperti, di evaporator dan kondensor, disisi masuk dan jalur keluar pada turbin, *flow meter* pada saluran fluida kerja, sensor tegangan dan arus pada generator listrik, sinyal yang sudah masuk kedalam kontroler *autonics* akan dikonversikan menjadi data digital dan dapat menampilkan nilai aktual dilayar kontroler, setelah itu nilai tersebut dikirimkan ke komputer melalui USB yang tersambung dengan menggunakan protokol Modbus RTU[32].

2.8 STUDI TERKAIT

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkasi pemanfaatan dari siklus rankine dan turbin uap dalam sistem propulsi kapal serta pemanfaatan panas buang.

- Andianto & Achmad (2019) melakukan penelitian tentang analisa performansi pembangkit listrik siklus rankine organik sederhana dengan sumber panas uap geothermal berkualitas rendah. Pada penelitian tersebut menunjukkan hasil bahwa efisiensi termal maksimum 5,34% dan daya yang diekeluarkan 1,52 Kw[33].
- Matheu M. Dwinanto (2023) melakukan studi tentang pengaruh temperatur evaporasi terhadap kinerja siklus rankine organik menggunakan fluida kerja R245FA dan R515A. pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemilihan fluida dan temperatur evaporasi sangat menentukan performa ORC[34].
- Abdullah Noor Salim (2021) menganalisis tentang desain model siklus rankine organik dengan recuperator. Studi yang diteliti menunjukan desain ORC dengan tambahan *recuperator* untuk meningkatkan efisiensi dan juga

potensi untuk mencapai efisiensi lebih tinggi dibandingkan dengan ORC standar[35].

