Bidang Ilmu : Rekayasa

LAPORAN PENELITIAN
HIBAH BERSAING

JUDUL PENELITIAN

PENGEMBANGAN SISTEM *OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION (OTEC)* UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK SKALA KECIL

Tarsisius Kristyadi ST, MT, PhD (NIDN: 0415087101)
Dr. Agus Hermanto (NIDN :0401086801)
Tri Sigit Purwanto ST, MT (NIDN: 0417037701)

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL BANDUNG
DESEMBER 2013

Halaman Pengesahan

1. Judul Penelitian : Pengembangan Sistem *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)* Untuk Pembangkit Listrik Skala Kecil

2. Ketua Peneliti

   a. Nama Lengkap : Tarsisius Kristyadi, ST, MT, PhD

   b. NIP/NIK : 960604

   c. NIDN : 0415087101

   d. Jabatan Struktural : Kepala Laboratorium Konversi Energi ITENAS

   e. Jabatan fungsional : Dosen di Jurusan Teknik Mesin ITENAS

   f. Fakultas/Jurusan : Fakultas Teknologi Industri /Jurusan Teknik Mesin

   g. Pusat Penelitian : LPPM ITENAS

   h. Alamat : Jl. PHH. Mustofa no 23 Bandung 40124

   i. Telpon/Faks : 022-7272215 fax: 022

3. Lama Penelitian Keseluruhan : 2 tahun

Bandung 20 Desember 2013

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknologi Industri ITENAS

Ketua Peneliti,

Ir. Rony Kurniawan, MT

Tarsisius Kristyadi Ph.D

Menyetujui,

Ketua LPPM ITENAS

Dr. Dewi Kania Sari, MT

ABSTRAK

Tujuan jangka panjang dari penelitian ini adalah pemanfaatan energi alternatif dan terbarukan sebagai sumber energi untuk pembangkit tenaga listrik. Energi alternatif yang dipilih adalah *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC).* Potensi energy jenis ini sangat besar bila akan dibangun di Indonesia mengingat Indonesia adalah Negara tropis dimana 2/3 wilayahnya terdiri dari lautan. Untuk membangun pembangkit listrik dengan system OTEC diperlukan tahapan yang sangat panjang, salah satunya study model dengan skala yang lebih kecil. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan pembangunan pembangkit listrik dengan system OTEC dalam skala kecil.

Untuk melaksanakan penelitian ini diperlukan tahapan-tahapan yang berurutan yaitu perencanaan menggunakan perangkat lunak, pemilihan komponen dan pembuatannya, pengkondisian thermal air tawar serta pembuatan system secara menyeluruh. Penelitian ini bertujuan membangun pembangkit listrik dengan prinsip OTEC dengan daya kurang lebih 50 W. Tahapan yang telah dilakukan tahun I meliputi perancangan dan pembuatan komponen utama sehingga peralatan bisa berjalan dengan baik. Peralatan pembangkit meliputi pompa, kondensor, evaporator, turbin dan generator. Tahapan awal adalah simulasi dan pemilihan fluida kerja. Fluida kerja yang dipilih adalah freon R-22. Sedangkan untuk simulasi digunakan perangkat lunak Cycle Tempo.

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa pembangkit mempunyai kinerja yang baik dapat menghasilkan daya maksimum kurang lebih 65 Watt. Untuk penyempurnaan peralatan yang dibuat maka ada tahapan selanjutnya yang akan dilaksanakan di tahun ke II.

Tahapan selanjutnya yang akan dilaksanakan tahun ke II adalah tahapan uji karakteristik pembangkit dengan sistem OTEC yang dilaksanakan di laboratorium. Permasalahan yang muncul adalah bagaimana mengkondisikan peralatan di laboratorium sesuai dengan kondisi di lautan. Tahap akhir dari proses penelitian ini adalah pengujian untuk mendapatkan karakteristik sistem dan karakteristik tiap-tiap komponen serta mengetahui kehandalan sistem.

Daftar Isi

Halaman Pengesahan 2

Abstrak 3

Daftar Isi 4

Bab I Pendahuluan 5

1.1 Latar Belakang 5

1.2 Tujuan Khusus 6

1.3 Urgensi (keutamaan) Penelitian 7

1.4 Luaran Penelitian 9

Bab II Study Pustaka 10

2.1 OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) 10

2.2 Siklus Tertutup 11

2.3 Siklus Terbuka 12

2.4 Siklus Hybrida 13

Bab III Metode Penelitian 15

Bab IV Perancangan Thermodinamika 19

4.1 Siklus Rankine Organik 19

4.2 Pemilihan Fluida Kerja 22

4.3 Simulasi Thermal 25

4.4 Optimasi Performance 30

4.5 Simulasi Siklus 31

Bab V Perancangan dan Pembuatan Komponen 34

5.1 Perancangan Turbin 36

5.2 Perancangan Pompa 40

5.3 Perancangan dan Pembuatan Penukar Panas (*Heat Exchanger*) 47

5.4 Generator 69

Bab VI Pengujian 71

6.1 Pengujian Komponen 71

6.2 Pengujian Sistem 75

Bab VII Kesimpulan 81

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Untuk menunjang kebijaksanaan Pemerintah dalam hal diversifikasi energi maka perlu dicari sumber energi alternatif selain minyak bumi, batu bara atau gas alam. Sumber energi alternatif diutamakan adalah energi yang dapat diperbaharui (renewable energi) atau sumber energy yang tak akan pernah habis. Di indonesia pemanfaatan sumber energi yang diperbaharui sudah banyak dikenal seperti biogas untuk bahan bakar kompor memasak, minyak tumbuh-tumbuhan untuk bahan bakar Diesel, energi air dan angin untuk pembangkit listrik, sekam padi sebagai bahan bakar kompor, pemanfaatan energi surya dan lain-lain. Salah satu sumber energy yang belum tergali adalah sumber energy dari laut. Ada beberapa jenis sumber energy dari laut yang dapat dimanfaatkan antara lain energy pasang surut, energy gelombang dan energy thermal.

Pemanfaatan energy thermal air laut atau yang disebut *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)* telah banyak diteliti oleh para pakar dari Amerika dan Perancis. Di Indonesia sendiri telah dilakukan penelitian bahkan pembangunan OTEC di wilayah perairan Indonesia Timur yang dilakukan oleh pihak Jepang.

Indonesia yang berada diposisi dua samudra yakni Samudera Hindia dan Samudera Pasifik memiliki potensi yang besar dalam pengembangan pembangkit listrik dengan sistem OTEC. Kebutuhan energi yang diimbangi dengan kebutuhan bumi akan energi yang ramah lingkungan sangat dibutuhkan. OTEC salah satu jalan untuk mengatasi pemanasan global disamping solusi lain yang dikembangkan.. OTEC adalah sistem pembangkit daya yang mempunyai potensi yang sangat besar, sekitar 5000 kali kebutuhan umat manusia jika semua potensi OTEC di dunia dimanfaatkan. Perhitungan ini dimungkinkan karena sebagian besar permukaan bumi adalah laut. Lautlah yang paling banyak menerima panas dari matahari, sekitar 65 juta GW, atau sekitar 57 kuadrilion kW-hr pertahun. Secara otomatis banyak energi yang tersimpan dalam laut yang bisa dimanfaatkan.

Untuk pembangunan OTEC diperlukan kajian yang cukup panjang. Penelitian ini merupakan salah satu bagian dari kajian pembangunan OTEC di Indonesia, yaitu untuk pembangunan pembangkit listrik skala laboratorium. Tahapan ini sangat diperlukan untuk menjamin keberhasilan pembangunan OTEC dalam skala yang sebenarnya.

1.2Tujuan Khusus

Bidang penelitian ini adalah energi baru dan terbarukan.

Sesuai dengan judul dari penelitian ini, maka tujuan dari penelitian ini adalah membangun pembangkit listrik dengan prinsip OTEC dalam skala kecil yang berdaya kurang lebih 50 Watt. Apabila diuraikan maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan peralatan komponen untuk system pembangkit listrik berdasarkan prinsip Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) skala kecil.
2. Mendapatkan metode pengkondisian air pada kondisi kamar menyerupai kondisi thermal air laut supaya dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik system OTEC.
3. Pemilihan refrigerant yang cocok untuk system OTEC.
4. Mendapatkan sistem pembangkit listrik berdasarkan Ocean thermal Energy conversion (OTEC) skala kecil.

Hasil Penelitian ini akan memberikan kontribusi sebagai berikut:

1. Penelitian ini akan membantu memecahkan masalah kelangkaan sumber energi fosil dengan menggantikannya dengan sumber energi yang bisa diperbaharui. Melalui system pembangkit listrik berdasarkan OTEC yang merupakan system pembangkit listrik menggunakan sumber energy yang dapat diperbaharui atau ketersediaannya terus menerus yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimum.
2. Penelitian ini akan membantu memecahkan masalah distribusi sumber energi listrik ke daerah terpencil. Karena daerah-daerah terpencil terutama daerah pantai dapat memanfaatkan sumber energi laut untuk pembangkit listrik didaerah masing-masing.

Hasil/luaran target dari penelitian ini adalah sebuah system pembangkit listrik menggunakan system OTEC dalam skala kecil. Besarnya daya yang dihasilkan diperkirakan 50 Watt dengan komponen-komponen yang mudah didapatkan. Sedangkan kondisi thermal air laut didapatkan dengan pengkondisian air tawar pada kondisi kamar supaya menyerupai kondisi air laut dengan cara pemanasan dan pendinginan.

1.3 Urgensi (Keutamaan) Penelitian

1. Pengembangan sumber energy alternative perlu dilakukan untuk mengatasi berkurangnya energy fosil. Salah satu sumber energy yang layak untuk dikembangkan adalah sumber energy yang berasal dari air laut yaitu perbedaan temperature antara permukaan yang hangat dengan temperature di kedalaman laut yang dingin. Perbedaan tersebut bisa dimanfaatkan untuk pembangkitan energy.

   Dibutuhkan metode tertentu untuk memanfaatkan perbedaan temperature air laut menjadi energi mekanik atau energi listrik. Metode-metode yang sudah dikembangkan adalah menggunakan siklus tertutup, siklus terbuka ataupun hybrid. Masing-masing metode mempunyai kelebihan dan kekurangan.

   Penelitian ini akan mengkaji metode apa yang cocok untuk pembangkitan listrik, sekaligus menentukan kondisi operasi system. Pemilihan metode yang cocok akan mempengaruhi daya dan efisiensi pembangkit serta hasil akhir dari proses pengubahan energi tersebut.

2. Perbedaan temperature antara air laut di permukaan dan kedalaman dipersyaratkan minimal 20°C. Perbedaan temperature tersebut digunakan untuk mengubah fasa refrigerant pada siklus tertutup atau menguPenukar Kaloran air pada siklus terbuka. Permasalahan yang dihadapi dalam pembangkitan energi dengan perbedaan temperature air laut (OTEC) bahwa karena perbedaan temperature antara panas dan dingin tidak terlalu tinggi maka diperlukan fluida kerja yang dapat berubah fasa pada rentang temperature tersebut. Untuk siklus tertutup, beberapa refrigerant dapat dimanfaatkan untuk fluida kerja yang dipilih

berdasarkan kondisi operasi dan lingkungan. Pada siklus terbuka parameter yang penting yang akan menentukan prestasi dari pembangkit adalah kondisi kevakuman dari system yang mempengaruhi temperature didih air.

Untuk itu pada penelitian ini akan dilakukan kajian mengenai jenis fluida kerja yang cocok sebagai fluida kerja untuk system pembangkit tenaga.

3. Pembangunan pembangkit listrik dengan system OTEC dalam skala yang sebenarnya memerlukan langkah yang sangat rumit. Kondisi batimetri air laut, kondisi kedalaman air laut, ombak dan kelandaian garis pantai merupakan hal-hal yang harus dipertimbangkan pertama kali sebelum pembangunan. Langkah selanjutnya adalah membuat study kelayakan, rancangan dasar (basic design), detail design dan engineering design. Untuk menjamin atau meyakinkan bahwa system pembangkit yang akan dibangun berfungsi dengan baik, maka sebelum langkah konstruksi dilakukan pembuatan model dalam skala laboratorium. Pada skala ini kinerja dari model dapat dianalysis dan dapat diperkirakan permasalahan yang akan dihadapi.

   Penelitian ini merupakan upaya untuk menjembatani perencanaan pembangunan system pembangkit listrik OTEC dengan realisasi pembangunannya itu sendiri, yaitu pembangunan pembangkit listrik OTEC dengan skala kecil. Langkah ini sangat penting dilakukan karena akan dapat diketahui permasalahan terutama permasalahan system thermal dalam skala yang lebih luas.

4. Karena model pembangkit listrik yang akan dibuat harus menyerupai pembangkit yang sebenarnya maka kondisi air di laboratorium terutama dari sisi thermal harus dapat dibuat menyerupai kondisi air laut yang sebenarnya. Pada permukaan, temperatur air laut relatif konstant sepanjang waktu baik siang maupun malam, demikian juga pada kedalaman tertentu (1000 m) temperatur air laut mncapai 4°C. Karena membuat sumur di laboratorium dengan kedalaman 1000 m tidak mungkin dilakukan, maka langkah terbaik adalah dengan mendinginkan air pada kondisi kamar tersebut sampai temperaturnya sama dengan temperatur air laut pada kedalaman tertentu. Demikian juga untuk

temperatur permukaan yang hangat, air pada kondisi kamar laboratorium dipanaskan sampai mencapai temperatur air laut dipermukaan.

Teknik pendinginan dan pemanasan dengan pengaturan yang tepat ini mutlak diperlukan supaya kondisi temperatur air laut bisa tercapai. Oleh karena itu salah satu pokok permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana mengkondisikan temperatur air kamar di laboratorium supaya sama dengan temperatur air laut pada kedalaman dan permukaan.

1.4 Luaran Penelitian

Hasil penelitian akan dipublikasikan pada jurnal nasional terakreditasi

BAB II. STUDI PUSTAKA

2.1 OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*)

Lautan luasnya hampir 2/3 permukaan bumi. Dari 2/3 luas ini menerima energi panas yang berasal dari penyinaran matahari. Lautan menampung energi cukup besar dari sinar matahari yang mencapai bumi. Seperempat daya surya kira-kira sebesar 1,7 x 10^{17} watt yang mencapai atmosfir diserap oleh lautan. Selain itu, air laut juga menerima energi panas yang berasal dari panas bumi. Panas ini berasal dari magma bumi dibawah laut [2].

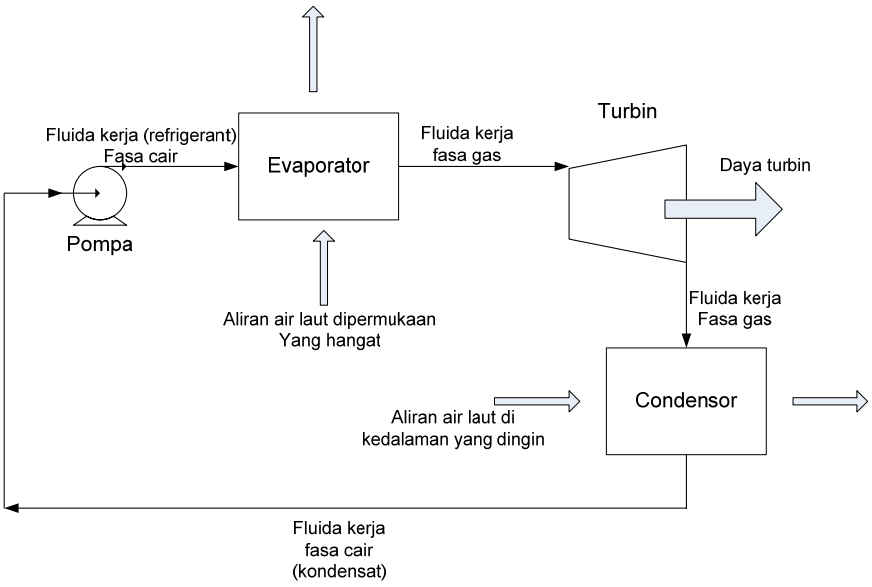
Permukaan air di daerah tropis yang mengalami pemanasan mengakibatkan permukaaan air laut memiliki temperatur kira-kira 27 - 30°C. Jika air permukaan yang hangat ini dipakai dan dikombinasikan dengan air yang dingin (5-7°C) maka sumber energi yang relatif besar akan tersedia. Hal ini lebih menguntungkan dibanding dengan memanfaatan sinar matahari di daratan yang hanya tersedia pada waktu siang hari saja. Disamping itu panas yang di manfaatkan tergantung kondisi udara dan cuaca.

OTEC membangkitkan listrik dengan menggunakan perbedaan temperatur 20°C (36°F) atau lebih. Air panas berasal dari air permukaan laut dan air dingin dari air laut dalam. Sistem pembangkit OTEC merubah perbedaan panas ini menjadi energi listrik. Masa air hangat digunakan untuk memanaskan dan menguPenukar Kaloran suatu cairan (dikenal sebagai fluida kerja). Fluida kerja akan menguap dan menaikan tekanan. Uap betekanan ini disalurkan melalui suatu turbin pembangkit dan menghasilkan listrik. Uap yang bertekanan tinggi setelah melewati turbin akan menjadi bertekanan rendah. Uap bertekanan rendah ini kemudian dikondensasikan kembali menjadi cairan oleh masa air dingin. Cairan ini di pompa untuk dinaikan tekananya dan di alirkan ke evaporator. Evaporator berfungsi menaikan temperatur dan menguPenukar Kaloran cairan. Siklus ini berulang secara terus menerus sehingga dihasilkan listrik.

Ada tiga tipe dasar pembangkit listrik OTEC yakni siklus tertutup *(closed-cycle)*, siklus terbuka *(open-cycle)* dan campuran dari dua tipe sistem tersebut. Ketiga sistem tersebut dapat dibangun didarat *(land-based)* atau terapung (*plantship)* [2, 3, 4].

*2.2 Siklus Tertutup (*Closed-Cycle*) OTEC*

OTEC siklus tertutup pertama-tama diajukan ditahun 1881 oleh fisikawan Prancis Jacques D'Arsonval [5]. OTEC siklus tertutup prosesnya diawali dengan massa air permukaan hangat yang menguPenukar Kaloran fluida kerja (seperti ammonia) dalam suatu penukar panas (evaporator). Uap ammonia tersebut kemudian dikondensasikan (di dalam kondensor) kembali menjadi cairan melalui kontak dengan air dingin. Fluida kerja selama menjalani proses tersebut tetap dalam suatu siklus tertutup dan secara terus-menerus disirkulasikan. Siklus ini hampir sama dengan siklus pendingin *(refrigation system)* standar. Diagram siklus tertutup OTEC dapat dilihat pada Gambar berikut.



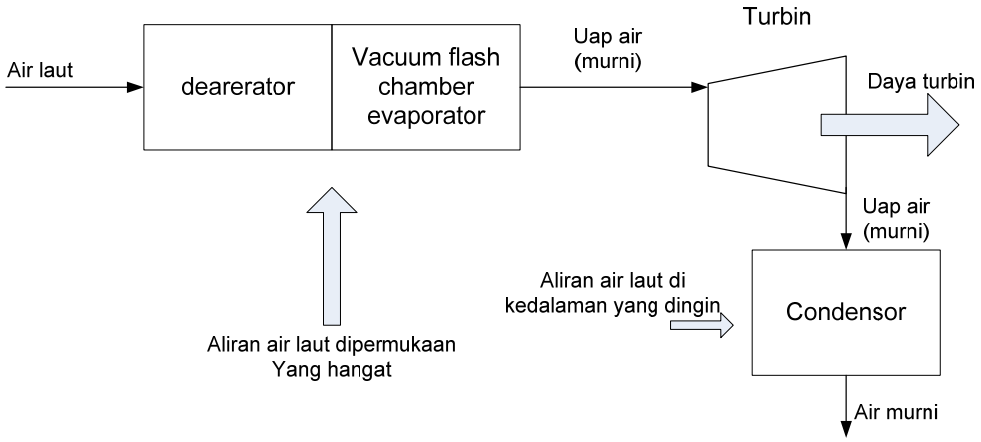
Gambar 2.1. Diagram OTEC siklus tertutup

Penukar panas (evaporator dan kondensor) merupakan komponen besar dan sangat penting dalam suatu pembangkit listrik siklus tertutup ini. Banyak penelitian telah dilakukan untuk pengembangan material alternatif penukar panas OTEC. Penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa paduan aluminum *(alloys)* yang lebih murah dapat bekerja sebaik titanium.

Keunggulan system ini adalah investasi yang dibutuhkan sedikit (relatif murah) dibanding sistem OTEC lain, daya listrik yang dihasilkan besar, perawatan relative mudah, fluida yang masuk dalam turbin murni (tidak bercampur dengan zat yang tidak diinginkan) sehingga turbin lebih tahan lama.

*2.3. Siklus Terbuka (*Open Cycle*) OTEC*

OTEC siklus terbuka juga dikenal dengan nama siklus Claude *(claude cycle)*. Nama ini diambil dari nama penemunya George Claude [8]. Siklus ini menggunakan air laut sebagai fluida kerjanya. Temperatur air mendidih merupakan fungsi dari tekanan. Air permukaan dalam ruangan vakum yang dijaga tekanannya skitar 0,34 psi (tekanan pada 80.000 ft, skitar 1/40 tekanan permukaan laut) akan mendidih dan menjadi uap air. Uap air *(steam)* temperatur rendah diarahkan ke turbin. Setelah itu, uap air ini didinginkan dikondensasikan kembali kebentuk cairan oleh massa air laut dalam yang dingin. Uap air akan terkondensasi lebih efisien jika dikontakan langsung dengan air dingin. Jika uap air tak dikontakan secara langsung maka air hasil kondensasi ini bisa digunakan sebagai air konsumsi. Air ini merupakan hasil sampingan yang sangat berharga untuk konsumsi manusia dan untuk pertanian. Air ini sangat berguna untuk daerah dimana suplai air tawar sangat terbatas. Tetapi dari segi efisiensi kondensor jika uap air dikontakkan secara langsung akan mengurangi energi listrik dari turbin.



Gambar 2.2 Diagram OTEC siklus terbuka

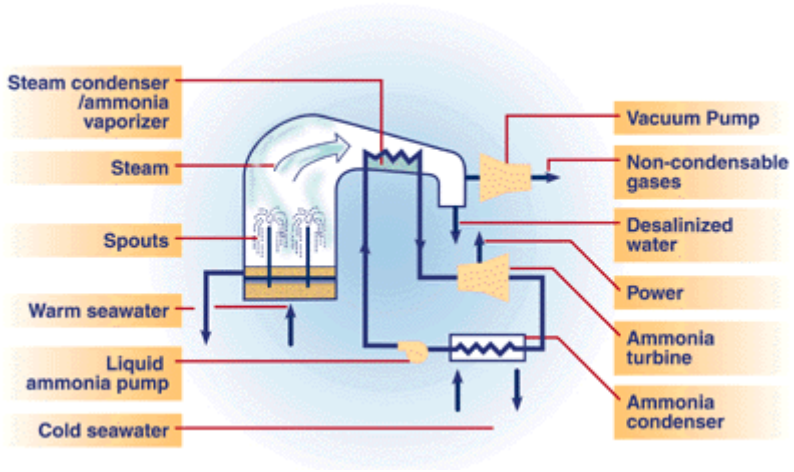
Selisih tekanan yang dimanfaatkan adalah perbedaan antara tekanan air menguap dan tekanan yang lebih rendah sesudah kondensasi, sehingga sistem siklus terbuka memerlukan turbin yang sangat besar untuk menangkap energi yang relatif kecil.

Pasific international Center for high Technology Research (PICHTR) di tahun 1993 mendesain dan membangun pembangkit OTEC siklus terbuka 210kW di Keahole Point

Hawai. Pembangkit ini memecahkan rekor dunia untuk produksi tenaga OTEC dengan produksi 255 kW gross [5]. *Output netto* nominal dari pembangkit eksperimental ini sekitar 40 kW.

2.4. Hybrid OTEC

Tipe terakhir dari sistem pembangkit listrik OTEC adalah kombinasi dari kedua siklus yang telah dijelaskan sebelumnya ke dalam suatu siklus campuran (*hybrid*) terbuka – tertutup. Sehingga siklus gabungan ini dapat memproduksi listrik dan air desalinasi secara efisien. Dalam sistem OTEC *hybrid*, air laut hangat yang masuk ke dalam vakum dievaporasikan secara cepat (*flash evaporated*) menjadi uap air (*steam*). Metode evaporasi ini sama dengan proses evaporasi pada siklus terbuka. Uap air atau air hangat kemudian dialirkan melalui suatu evaporator untuk mengevaporasi fluida kerja dari suatu lingkaran (*loop*) siklus tertutup. Kemudian fluida yang dievaporasi akan menggerakan turbin untuk memproduksi listrik. Sedangkan uap air (*steam*) dikondensasikan di dalam kondensor untuk memproduksi air desalinisasi [13].



Gambar 2.3. Diagram OTEC siklus *hybrid* [13].

Dari segi penempatan, system OTEC dapat diletakkan di daratan (land based) ataupun diapungkan ditengah laut (plantship). Masing-masing mempunyai keunggulan ataupun kerugian. Land based system dapat dibangun dengan skala yang besar dan komponen lebih tidak mudah terjadi korosi, namun diperlukan investasi yang besar karena diperlukan pemipaan yang sangat panjang serta efisiensi rendah. Sedangkan plantship system membutuhkan investasi yang relative lebih kecil dibandingkan didarat, tidak

dibutuhkan pemipaan yang sangat panjang, namun diperlukan konstruksi yang kuat untuk menahan ombak.

Kajian mengenai pembangunan OTEC di Indonesia telah dilakukan penulis yang tertuang dalam laporan [1]. Dalam penelitian tersebut dikaji mengenai persyaratan lokasi serta penentuan lokasi di Indonesia yang memenuhi persyaratan yang antara lain kedalaman laut, temperature pada kedalaman serta kondisi batimetri di lokasi tersebut. Dalam kajian tersebut juga dilakukan perhitungan untuk penentuan jenis siklus, penempatan dan komponen.

Komponen-komponen yang diperlukan adalah system pemipaan, pompa untuk air laut, pompa untuk fluida kerja, turbin, beberapa penukar kalor untuk evaporator dan kondensor. Dari perancangan tersebut ditentukan juga bahwa tekanan fluida kerja pada sisi dingin (sisi kondensor) adalah 0.76 MPa dan tekanan pada kondisi panas (sisi evaporator) adalah 0.98 MPa. Dengan kondisi tersebut dapat menghasilkan daya yang cukup untuk pembangkit listrik. Namun untuk menghasilkan daya dalam skala mega Watt diperlukan peralatan yang sangat besar.

Penelitian ini melanjutkan apa yang sudah diteliti terutama dalam hal komponen, pemilihan siklus dan refrigerant.

BAB III. METODE PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan pembangkit listrik skala laboratorium dengan system Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Dari tujuan tersebut terdapat 3 tahapan (milestone) yang akan dicapai :

1. Pemilihan system dan komponen serta pembuatannya.
2. Pengkondisian thermal air tawar pada kondisi temperature kamar (laboratorium) menjadi kondisi thermal air laut yang sebenarnya.
3. Pembuatan pembangkit listrik skala kecil serta pengujiannya.

Oleh karena itu tahapan penelitian ini dibagi menjadi 3 yaitu pemilihan system komponen dan pembuatannya, pengkondisian air serta pembuatan pembangkit listrik. Seluruh rangkaian proses tersebut akan dilaksanakan dalam waktu 2 tahun.

Tahun I

Pemilihan Sistem dan komponen serta pembuatannya

Target pada tahap ini adalah pembuatan komponen-komponen system pembangkit tenaga dengan memanfaatkan perbedaan temperature air pada kedalaman tertentu dengan temperature air pada permukaan air laut. Sehingga tahap ini dikatakan berhasil bila komponen-komponen utama yang digunakan untuk pembangkit listrik system OTEC dapat terwujud dan tersusun menjadi sebuah model system pembangkit tenaga listrik skala laboratorium.

Di jelaskan pada study pustaka bahwa system OTEC jenis tertutup dengan mengacu pada siklus Rankine merupakan system yang cocok untuk pembangkit listrik murni (tanpa desalinasi). Oleh karena itu pada penelitian ini dipilih system OTEC dengan siklus tertutup mengacu pasa siklus Rankine yang ditempatkan mengapung di permukaan air dengan pertimbangan komponennya lebih mudah didapatkan atau lebih mudah dibuat, dapat menghasilkan daya yang cukup tinggi, aman bagi lingkungan serta cocok untuk skala laboratorium.

Pada system tertutup ini diperlukan refrigerant sebagai fluida kerja siklus. Pemilihan refrigerant berdasarkan pada kondisi operasi mesin dimana harus terjadi perubahan fasa pada beda temperature 20°C. Dari kajian literature yang sudah dilakukan, fluida kerja (refrigerant) yang cocok adalah R-22.

Untuk menghasilkan kinerja pembangkit yang optimum, maka perlu dilakukan langkah-langkah perancangan meliputi perancangan thermodinamika system dan perancangan dimensi serta kapasitas komponen. Dari tahapan tersebut akan dihasilkan produk rancangan detail mengenai mesin konversi energy panas laut serta pembuatannya.

a. Perancangan Thermodinamika

Perancangan thermodinamika bertujuan untuk menentukan temperatur dan tekanan kerja dari siklus tertutup untuk mendapatkan performance yang terbaik. Rancangan detail mengenai temperature dan tekanan refrigerant masuk dan keluar evaporator, tekanan refrigerant masuk dan keluar turbin, masuk dan keluar pompa serta masuk dan keluar kondensor. Parameter yang digunakan adalah daya dan efisiensi dari siklus pembangkit.

Untuk eektifitas perancangan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CYCLE TEMPO. Perangkat lunak ini cocok digunakan karena mempunyai perbendaharaan sifat-sifat dan proses yang diperlukan untuk analisis suatu sistemn thermodinamika seperti siklus Rankine.

Hasil dari perancangan ini adalah temperatur dan tekanan kerja dari setiap terminal masuk dan keluar komponen : pompa, turbin, kondensor dan evaporator, serta laju aliran fluida kerja.

b. Perancangan Dimensi dan kapasitas Komponen Utama

Perancangan dimensi bertujuan menentukan dimensi utama dari peralatan komponen system pembangkit yaitu pompa refrigerant, kondensor, evaporator dan turbin. Perancangan menggunakan prinsip kesetimbangan masa dan energy. Optimalisasi perlu dilakukan untuk

menghasilkan komponen yang terbaik dari sisi efektifitas dan keterbuatan peralatan.

Perancangan kondensor dan evaporator dimana kedua komponen tersebut berupa peralatan penukar kalor (heat exchanger), maka perancangan dilakukan dengan dua tahap yaitu analitis dan numeris dengan bantuan komputer. Perangkat lunak yang digunakan adalah perangkat lunak yang telah dikembangkan oleh Jurusan Teknik Mesin ITENAS (open source).

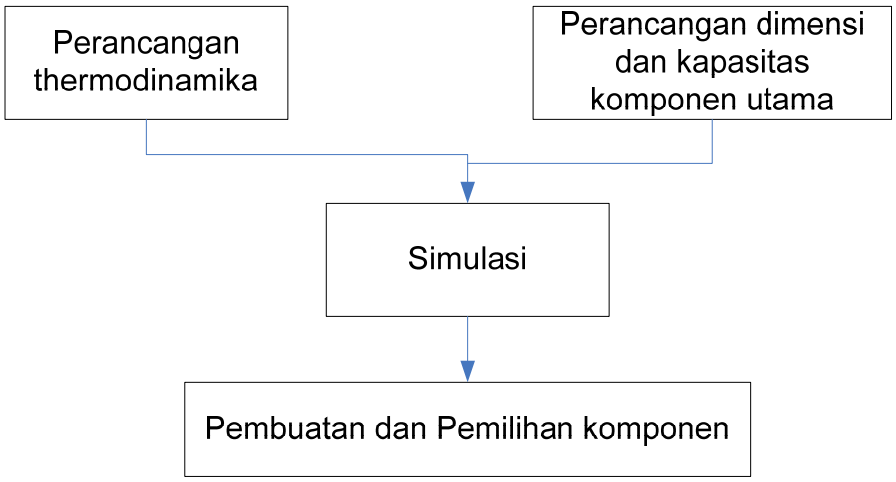
Sedangkan untuk pompa dan turbin hanya dilakukan perhitungan kapasitas karena kedua peralatan tersebut ketersediaan di pasar sudah standar.

c. Simulasi

Tujuan simulasi adalah untuk mengetahui bagaimana system bekerja. Setelah dimensi dan kapasitas komponen utama didapatkan serta tingkat keadaan dari refrigerant untuk posisi tertentu sudah ditentukan maka perlu dilakukan simulasi. Proses simulasi ini dimulai dengan menyusun komponen utama diikuti dengan aliran refrigerant dalam system.

Data-data yang diperoleh dari perancangan digunakan sebagai acuan untuk proses pembuatan. Pembuatan kondensor dan evaporator dilakukan di Laboratorium Teknik Produksi ITENAS sedangkan pompa, dan turbin dicari dipasaran setelah kapasitasnya ditentukan. Sedangkan generator dipilih adalah generator DC dengan pertimbangan bahwa perubahan putaran tidak banyak berpengaruh terhadap tegangan keluaran.

Setelah semua peralatan diperoleh kemudian dirangkai dan dijalankan. Pada tahap ini hasil yang diharPenukar Kaloran sampai turbin bergerak (berputar).


Perancangan thermodinamika
Perancangan dimensi dan kapasitas komponen utama
Simulasi
Pembuatan dan Pemilihan komponen

BAB IV

PERANCANGAN THERMODINAMIKA

4.1 Siklus Rankine Organik

Siklus termodinamika merupakan suatu urutan proses yang berawal dan berakhir pada keadaan yang sama. Pada akhir siklus, semua sifat akan memiliki nilai yang sama dengan kondisi awal. Dengan demikian maka dalam suatu siklus sistem tidak akan mengalami perubahan *netto*. Contohnya uap yang bersirkulasi dalam suatu sistem pembangkit tenaga listrik membentuk sebuah siklus. Pada suatu keadaan tertentu, setiap sifat memiliki nilai tertentu yang dapat ditentukan tanpa perlu mengetahui bagaimana sistem dapat mencapai keadaan tersebut. Dengan demikian perubahan nilai suatu sifat pada sistem akan berpindah dari suatu keadaan ke keadaan lain sangat ditentukan oleh keadaan awal dan akhir serta tidak dipengaruhi oleh langkah perubahan yang terjadi. Perubahan tidak dipengaruhi oleh sejarah dan rincian proses. Sebaliknya apabila nilai suatu besaran tidak dipengaruhi oleh proses antara dua keadaan, maka besaran tersebut merupakan perubahan sifat.

Siklus Rankine adalah model operasi mesin uap panas yang secara umum ditemukan di pembangkit listrik. Sumber panas yang utama untuk siklus Rankine adalah batu bara, gas alam, minyak bumi, nuklir, dan panas matahari.

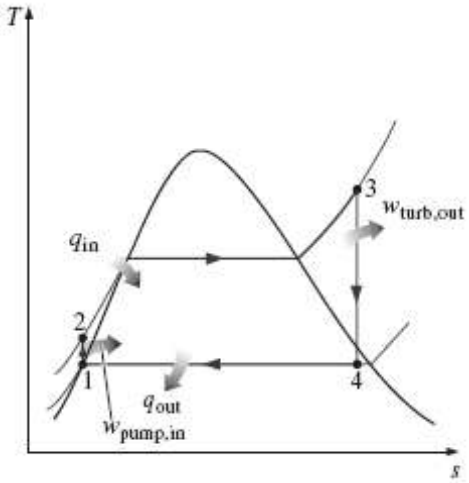
Siklus Rankine kadang-kadang diaplikasikan sebagai siklus Carnot, terutama dalam menghitung efisiensi. Perbedaannya hanyalah siklus ini menggunakan fluida yang bertekanan, bukan gas. Efisiensi siklus Rankine biasanya dibatasi oleh fluidanya. Tanpa tekanan yang mengarah pada keadaan super kritis, range temperatur akan cukup kecil. Fluida pada Siklus Rankine mengikuti aliran tertutup dan digunakan secara konstan.

Terdapat 4 proses dalam siklus Rankine, setiap siklus mengubah keadaan fluida (tekanan dan/atau wujud).

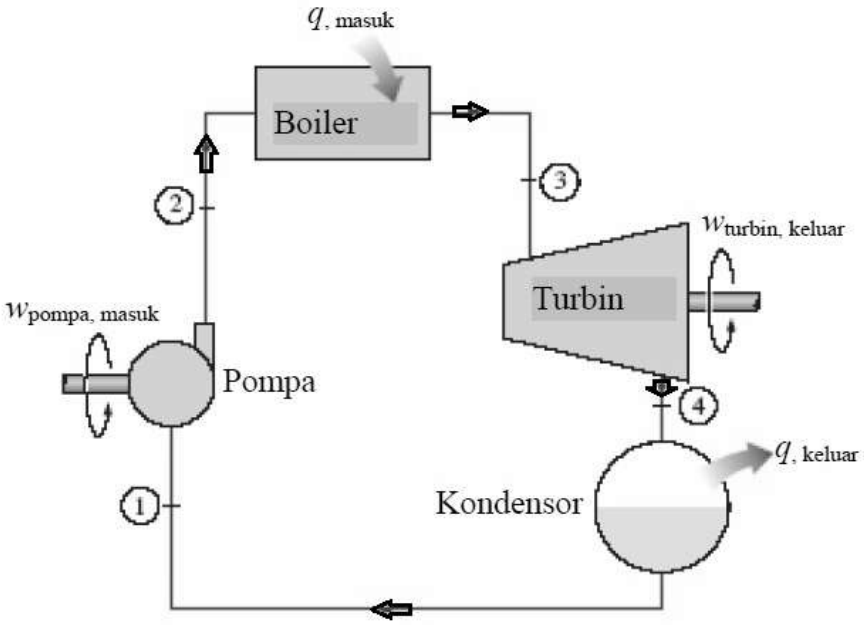
- Proses 1 (1-2): Fluida dipompa dari bertekanan rendah ke tekanan tinggi dalam bentuk cair. Proses ini membutuhkan sedikit input energi.
- Proses 2 (2-3): Fluida cair bertekanan tinggi masuk ke boiler di mana fluida dipanaskan hingga menjad uap pada tekanan konstan menjadi uap jenuh.

- Proses 3(3-4): Uap jenuh bergerak menuju turbin, menghasilkan energi listrik. Hal ini mengurangi temperatur dan tekanan uap, dan mungkin sedikit kondensasi juga terjadi.
- Proses 4 (4-1): Uap basah memasuki kondenser di mana uap diembunkan dalam tekanan dan temperatur tetap hingga menjadi cairan jenuh.

Gambaran Proses tersebut digambarkan dalam diagram seperti berikut:



Gambar 4.1 Diagram siklus Rankine



Gambar 4.2. komponen siklus Rankine sederhana

Dalam siklus Rankine ideal, pompa dan turbin adalah isentropic, yang berarti pompa dan turbin tidak menghasilkan entropi dan memaksimalkan output kerja. Dalam siklus Rankine yang sebenarnya, kompresi oleh pompa dan ekspansi dalam turbin tidak isentropic. Dengan kata lain, proses ini tidak bolak-balik dan entropi meningkat selama proses. Hal ini meningkatkan tenaga yang dibutuhkan oleh pompa dan mengurangi energi yang dihasilkan oleh turbin. Secara khusus, efisiensi turbin akan dibatasi oleh terbentuknya titik-titik air selama ekspansi ke turbin akibat kondensasi. Titik-titik air ini menyerang turbin, menyebabkan erosi dan korosi, mengurangi usia turbin dan efisiensi turbin. Cara termudah dalam menangani hal ini adalah dengan memanaskannya pada temperatur yang sangat tinggi.

Pada penelitian ini karena fluida kerja bukan air maka prinsip siklus Rankine berubah menjadi siklus Rankine Organik. Siklus rankine organik (ORC) merupakan sebuah siklus termodinamika yang termasuk kedalam metode pemanfaatan energi yang dapat diperbaharui, yaitu dengan memanfaatkan sebuah energi panas surya menjadi energi kerja. Dimana sebuah energi panas tersebut disuplai secara external pada aliran yang tertutup dengan menggunakan fluida yang bergerak. Dalam berbagai sistem pembangkitan daya, banyak perhatian yang ditujukan kepada sebuah pengkonversian energi dalam dari molekul-molekul bahan bakar hidrokarbon, atau energi atomik dari uranium untuk menjadi energi listrik atau mekanis.

Teknologi siklus rankine organik (ORC) memiliki cara kerja yang mirip dengan sebuah sistem siklus konversi energi uap konvensional. Namun, siklus rankine organik memiliki perbedaan didalam penggunaan fluida kerjanya yaitu refrijeran hidrokarbon. Siklus rankine organik (ORC) merupakan sebuah siklus termodinamika yang termasuk kedalam metode pemanfaatan energi yang dapat diperbaharui, yaitu dengan memanfaatkan sebuah energi panas, baik energi surya, energi panas laut dan energi lain menjadi energi kerja. Dimana sebuah energi panas tersebut disuplai secara external pada aliran yang tertutup dengan menggunakan fluida yang bergerak. Dalam berbagai sistem pembangkitan daya, banyak perhatian yang ditujukan kepada sebuah pengkonversian energi dalam dari molekul-molekul bahan bakar hidrokarbon. Pada dasarnya komponen siklus Rankine organik sama dengan siklus Rankine konvensional yang terdiri dari pompa, turbin, boiler, dan kondensor.

4.2 Pemilihan Fluida Kerja

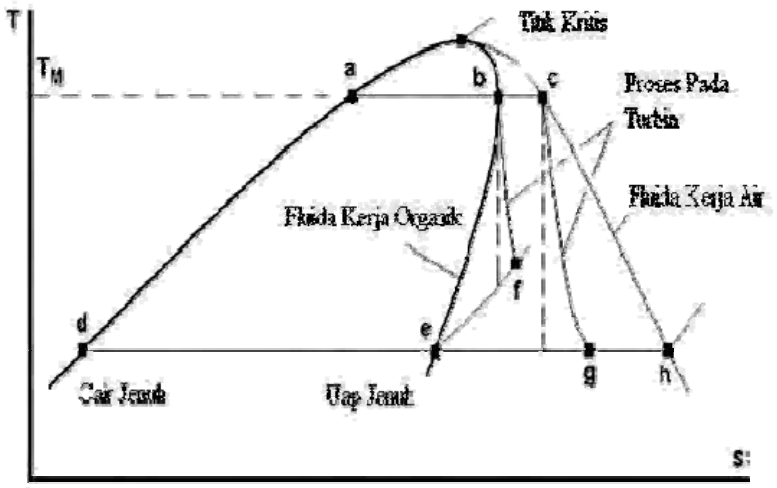
Faktor pemilihan fluida kerja pada siklus Rankine organik memiliki peran yang penting dalam penentuan performansi sistem pembangkit. Ada banyak jenis fluida yang dapat dijadikan fluida kerja dalam siklus Rankine organik, tetapi harus diperhatikan juga batasan-batasan yang ada, misalnya sifat termodinamika fluida, faktor kesehatan, faktor keamanan, serta faktor lingkungan.

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 air laut di permukaan. Fluida kerja yang memiliki fasa uap dapat digunakan untuk menggerakan turbin, sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Dari Tabel 4.1 berikut, dapat diketahui perbandingan temperatur dan tekanan kritis antara berbagai jenis fluida kerja yang umum digunakan pada siklus Rankine organik.

Tabel 4.1. Karakteristik beberapa fluida kerja

No	Jenis Fluida	Rumus Kimia	T_c ^oC	T_c ^oF	P_c Mpa	P_c lbf/in^2	P_s @ 300 K Mpa	P_s @ 400 K Mpa
1	Propana	C_3H_8	96,95	206,50	4,236	614,4	0,993500	n.a.
2	i-Butana	i-C_4H_{10}	135,92	276,70	3,685	534,4	0,372700	3,20400
3	n-Butana	C4H10	150,80	303,40	3,718	539,2	0,255900	2,48800
4	i- Pentana	i-C_5H_{12}	187,80	370,10	3,409	494,4	0,097590	1,23800
5	n-Pentana	C5H12	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_2O	374,14	705,45	22,089	3203,6	0,003536	0,24559

Karakteristik penting lain yang dimiliki oleh fluida kerja organik adalah 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 4.3 berikut ini.



Gambar 4.3. Sifat fluida refrigerant

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. Tabel 4.2 di bawah yang berisi sifat-sifat yang berhubungan dengan kesehatan, keamanan, dan lingkungan untuk beberapa jenis fluida kerja. 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.

Tabel 4.2. Sifat-sifat beberapa refrigerant

No	Jenis Fluida Kerja	Rumus Kimia	Sifat Beracun	Sifat Keterbakaran	ODP	GWP
1	R-22	CCl_2F_2	Tidak Beracun	Tidak Terbakar	1,0	4500
2	R-12	$C_2Cl_2F_4$	Tidak Beracun	Tidak Terbakar	0,7	5850
3	Propana	C_3H_8	Rendah	Sangat Ting gi	0	3
4	i-butana	i-C_4H_{10}	Rendah	Sangat Ting gi	0	3
5	n-butana	C4H10	Rendah	Sangat Ting gi	0	3
6	i-pentana	i-C_5H_{12}	Rendah	Sangat Ting gi	0	3
7	n-pentana	C5H12	Rendah	Sangat Ting gi	0	3
8	Ammonia	NH_3	Beracun	Rendah	0	0
9	Air	H_2O	Tidak Beracun	Tidak Terbakar	0	-

4.3. Simulasi Thermal

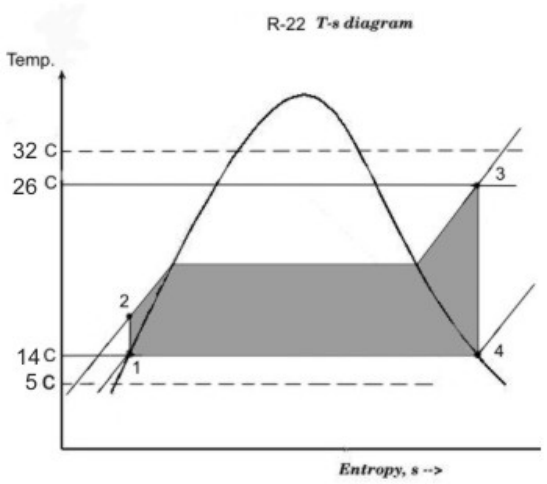
Perancangan Thermodinamika menggunakan peangkat lunak Cycle Tempo. Perangkat lunak ini cukup handal untuk melakukan proses iterasi dan optimasi dalam perhitungan siklus thermodinamika. Seperti diuraikan pada bab sebelumnya bahwa sistem OTEC yang digunakan adalah sistem tertutup, maka dengan dibantu perangkat lunak cycle tempo ini juga akan disimulasikan siklus tertutup berdasarkan siklus Rankine ideal.

Analisa sistem kerja siklus rankine organik ini menggunakan software cycle tempo. Analisa ini dilakukan dengan cara memvariasikan tekanan yang masuk turbin terhadap unjuk kerja turbin dengan temperatur yang diinginkan menggunakan fluida kerja R-22. Penggunaan cycle tempo dilakukan dengan cara membuat diagram yang dilengkapi dengan parameter yang sesuai dengan aktual sistem siklus rankine organik. Hal ini dilakukan agar didapat hasil uji unjuk kerja dari komponen-komponen yang digunakan dalam kondisi aktualnya. Berikut ini merupakan hasil optimasi cycle tempo dengan memvariasikan tekanan masuk turbin sehingga mendapatkan kinerja terbaik.

Terdapat 2 kemungkinan (alternatif) siklus, yaitu kemungkinan 1 dimana menggunakan siklus superpanas dan kemungkinan 2 dimana menggunakan siklus uap jenuh. Uraian kemungkinan 1 dan 2 dijelaskan berikut:

Siklus Kemungkinan 1

Siklus tertutup memberikan kemungkinan pertama jika R-22 diuPenukar Kaloran sampai kondisi superpanas dan diekspansi sampai titik jenuh. Grafik T-s nya bisa dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Siklus untuk kemungkinan pertama.

Warna gelap adalah energi yang bisa diambil dari siklus tertutup R-22.

– **TK 1**

Temperatur T_1 (kedalaman 1000 m) didapatkan sebesar 14°C. Data temperatur ini dihitung menggunakan program Fluidprop 6, sehingga didapatkan data sifat-sifat jenuh untuk R-22 pada temperatur ini 14°C.

Tabel 4.3 Sifat-Sifat Jenuh R-22 Untuk Temperatur 14°C

Temperatur		**Kondisi R-22 Pada Garis *Saturated* 14 °C**							
10 m	**1000 m**	**P_1** (1000 m)	**v_f**	**v_g**	**h_f**	**h_g**	**s_f**	**S_g**	**P_3**
°C	°C	MPa	Kg/m^3	Kg/m^3	kJ/kg	kJ/kg	kJ/K-kg	kJ/K-kg	MPa
26	14,00	0,7667	1232	32,41	216,7	409,9	1,059	1,732	0,9667

P_3 didapat dengan mempertemukan garis S_{4g} isentropik dengan garis temperatur 26°C. Dari Fluidprop 6 didapatkan P_3 = 0,9667 Mpa.

– **TK 3**

Temperatur T_3 (pada kedalaman 0 m) didapatkan sebesar 26°C. Data temperatur ini dihitung menggunakan program Fluidprop 6, sehingga didapatkan data sifat-sifat superpanas untuk R-22 pada temperatur 26.

Tabel 4.4 Sifat-Sifat Superpanas R-22 Untuk Temperatur 26°C

Temperatur		**Kondisi R-22 Pada Garis Superpanas 26 °C**				
0 m	**-1000 m**	**P_3** (0 m)	**v_3**	**h_3**	**s_3**	t
°C	°C	MPa	Kg/m^3	kJ/kg	kJ/K-kg	kualitas
26	14	0,9667	39,94	415.5	1,732	Superpanas

– **TK 2**

Untuk tingkat keadaan 2, nilai $S_2 = S_{1f}$ = 1,059 kJ/K-kg dan $P_2 = P_3$ = 0,9667MPa. Data ini dihitung menggunakan program Fluidprop 6, sehingga didapatkan data sifat-sifat subdingin untuk R-22 pada TK 2.

Tabel 4.5 Sifat-Sifat Subdingin R-22 Untuk TK 2

Kedalaman		**Kondisi R-22**			
P_2	**S_2**	**T_2**	**V_2**	**h_2**	**x_2**
Mpa	kJ/K-kg	°C	Kg/m^3	kJ/kg	Kualitas
0,9667	1,059	14,15	1233	216,9	subdingin

– **TK 4**

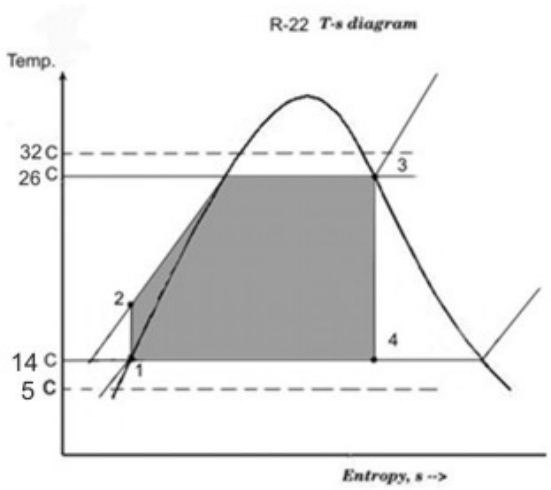
Untuk tingkat keadaan 4, nilai $S_4 = S_3$ = 1,732 kJ/K-kg; $T_4 = T_1$ = 14°C; dan P_4=P_1= 0,7667 MPa. Data ini dihitung menggunakan program Fluidprop 6, sehingga didapatkan data *properties* untuk R-22 pada TK 4.

Tabel 4.6 Sifat-sifat R-22 untuk TK 4

Kedalaman 1000 m		**Kondisi R-22**			
P_4	**S_4**	**T_4**	**V_4**	**h_4**	**x_4**
Mpa	kJ/K-kg	°C	Kg/m^3	kJ/kg	Kualitas
0,7667	1,732	14	32,41	409,9	1

Siklus Kemungkinan 2

Siklus tertutup memberikan kemungkinan kedua, jika R-22 diuPenukar Kaloran pada temperatur 26 ^{o}C uap jenuh dengan fraksi mol R-22=1 dan diekspansi sampai titik jenuh. Grafik T-s nya bisa dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Siklus untuk kemungkinan kedua.

- **TK 1**

  Temperatur T_1 (kedalaman 1000 m) didapatkan sebesar 14°C. Data temperatur ini dihitung menggunakan program Fluidprop 6, sehingga didapatkan data sifat-sifat jenuh untuk R-22 pada kedalaman ini.

Tabel 4.7 Sifat-sifat jenuh R-22 untuk temperatur 14°C

Temperatur		**Kondisi R-22 Pada Garis jenuh 14 °C**						
10 m	**1000 m**	**P_1** (1000 m)	**v_f**	**v_g**	**h_f**	**h_g**	**s_f**	**S_g**
°C	°C	MPa	Kg/m^3	Kg/m^3	kJ/kg	kJ/kg	kJ/K-kg	kJ/K-kg
26	14	0,7667	1232	32,41	216,7	409,9	1,059	1,732

P3 didapat dengan mempertemukan garis S_g isentropik dengan garis temperatur 26°C.

- **TK 3**

  Temperatur T_3 (pada kedalaman 0 m) didapatkan sebesar 26°C. Data temperatur ini dihitung menggunakan program Fluidprop 6, sehingga didapatkan data sifat-sifat superpanas untuk R-22 pada permukaan laut.

Tabel 4.8 Sifat-sifat Superpanas R-22 untuk Temperatur 26°C

Temperatur		**Kondisi R-22 Pada Garis Superpanas 26 °C**						
10 m	**1000 m**	**P_3** (-1000 m)	**v_f**	**v_g**	**h_f**	**h_g**	**s_f**	**S_g**
°C	°C	MPa	Kg/m^3	Kg/m^3	kJ/kg	kJ/kg	kJ/K-kg	kJ/K-kg
26	14	1,072	1187	45,47	231,5	413,3	1,109	1,716

- **TK 2**

  Untuk tingkat keadaan 2, nilai $S_2 = S_{1f}$ = 1,059 kJ/K-kg dan $P_2 = P_3$ = 1,072 MPa. Data ini dihitung menggunakan program Fluidprop 6, sehingga didapatkan data Sifat-sifat subdingin untuk R-22 pada TK 2.

Tabel 4.9 Sifat-sifat subdingin R-22 untuk TK 2

Acuan		**Kondisi R-22**			
P_2	**S_2**	**T_2**	**V_2**	**h_2**	**x_2**
MPa	kJ/K-kg	°C	Kg/m^3	kJ/kg	Kualitas
1,072	1,059	14,21	1233	217,0	subdingin

– **TK 4**

Untuk tingkat keadaan 4, nilai S_4 = S_{3g} = 1,716 kJ/K-kg; T_4 = T_1 = 14°C; dan P_4=P_1= 0,7667 MPa. Data ini dihitung menggunakan program Fluidprop 6, sehingga didapatkan data sifat-sifat untuk R-22 pada TK 4.

Tabel 4.10 Sifat-sifat R-22 untuk TK 4

Acuan		**Kondisi R-22**			
P_4	**S_4**	**T_4**	**V_4**	**h_4**	**x_4**
MPa	kJ/K-kg	°C	Kg/m^3	kJ/kg	Kualitas
0,7667	1,716	14,00	33,150	405,4	0.9770

4.4. Optimasi Performance

Perhitungan Turbin

Dasar pemilihan satu diantara dua siklus ini adalah besarnya daya yang bisa dihasilkan turbin. Perhitungan daya keluaran turbin dari 2 kemungkinan ini bisa di lihat dibawah ini.

Untuk Kemungkinan Pertama

$$\frac{\dot{W}_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = h_{3g} - h_4$$

$$\frac{\dot{W}_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = (415{,}5 - 409{,}9)\ kJ/kg$$

$$\frac{W_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = 5{,}6\ kJ/kg$$

Keterangan :

$\frac{W_{sT}}{\dot{m}_{R-22}}$: daya turbin per satuan massa (kJ/kg)

h_3 : entalpi R-22 masuk turbin (kJ/kg)

h_4 : entalpi R-22 keluar turbin (kJ/kg)

Untuk kemungkinan kedua

$$\frac{W_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = h_{3g} - h_4$$

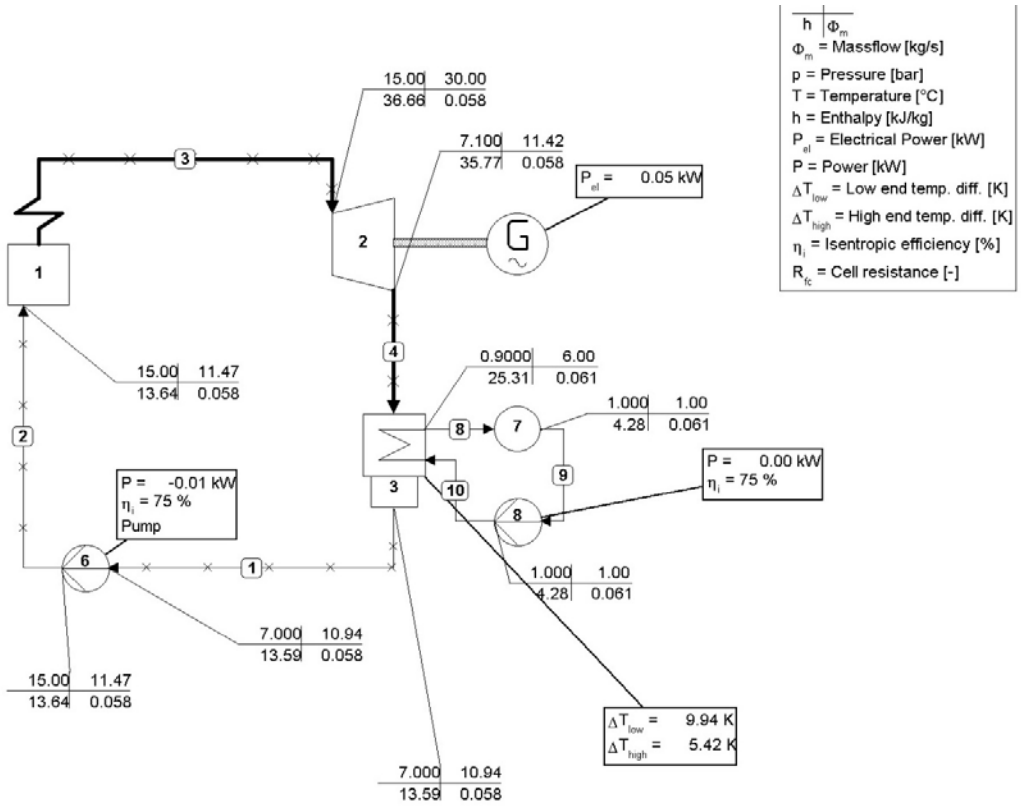
$$\frac{W_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = (413{,}3 - 405{,}4)\ kJ/kg$$

$$\frac{W_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = 7{,}9\ kJ/kg$$

Dari hasil perbandingan 2 kemungkinan, daya turbin per satuan aliran massa yang dihasilkan dari kemungkinan kedua lebih besar dari kemungkinan pertama. Sehingga siklus OTEC yang dipilih adalah siklus kemungkinan kedua.

4.5. Simulasi Siklus

Simulasi siklus yang telah dipilih dijabarkan sebagai berikut:



Gambar 4.6 Hasil simulasi Siklus

Hasil simulasi diatas didapat dengan cara memvariasikan beberapa kondisi temperatur dan tekanan tertentu. Hal ini dilakukan agar didapat hasil yang diinginkan. Fluida kerja yang digunakan pada simulasi *cycle tempo* diatas adalah refrijeran R-22 dengan literatur yang ada pada *software fluidprop*. Semakin tinggi setting point temperatur R-22 maka daya yang dihasilkan akan menurun apabila dalam keadaan tekanan yang sama.Sesuai dari karakteristik fluida kerja yang digunakan yaitu R-22, maka fluida kerja R-22 tersebut harus berada pada kondisi temperatur 26°C dengan bertekanan 15 bar agar dapat menghasilkan daya sebesar 50 W. Seperti kita ketahui dalam siklus rankine proses yang terjadi setelah fluida kerja melewati turbin adalah turbin tersebut melakukan ekspansi yaitu tekanan aliran fluida akan menurun. Proses kerja pada turbin adalah fluida kerja terekspansi yaitu tekanan fluida kerja akan turun. Dan tekanan keluar turbin akan berada dibawah 15 bar. Namun, fluida kerja R-22 tersebut tidak akan berubah fasa menjadi cair karena fluida kerja akan berubah fasa menjadi liquid pada tekanan 15 bar.

Hal ini menyebabkan fungsi kerja pompa tidak akan terjadi. Karena pompa hanya dapat menghisap atau mengalirkan fluida kerja hanya dalam keadaan cair. Apabila keadaan fluida kerja sebelum pompa masih berupa gas atau uap maka pompa tidak dapat mensirkulasikan fluida kerja didalam sistem. Akibatnya fluida kerja tertahan pada fasa gas atau uap yang menyebabkan tekanan balik ke arah turbin. Hal tersebut menyebabkan turbin yang di aplikasikan dengan *turbocharger* tidak dapat berputar dan akan terjadi kebocoran pada *turbocharger* tersebut. Oleh karena itu tekanan refrigerant keluar turbin harus dikondisikan sampai mencapai kurang lebih 5 bar supaya fasanya menjadi cair ketika didinginkan pada temperatur 5 ^{o}C

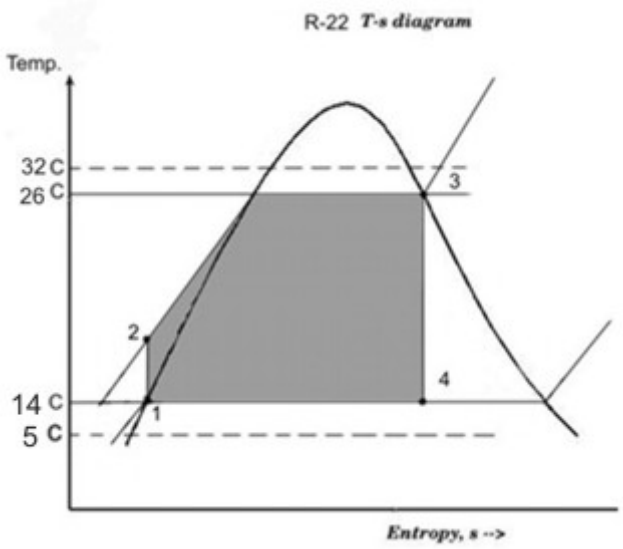
BAB V

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN KOMPONEN

Dalam bab ini akan dibahas beberapa alat dan instalasi yang digunakan sistem pembangkit listrik OTEC siklus tertutup. Perancangan sistem pembangkit ini diawali dengan beberapa batasan:

1. Daya turbin dipilih 50 W
2. Menggunakan siklus kemungkinan kedua

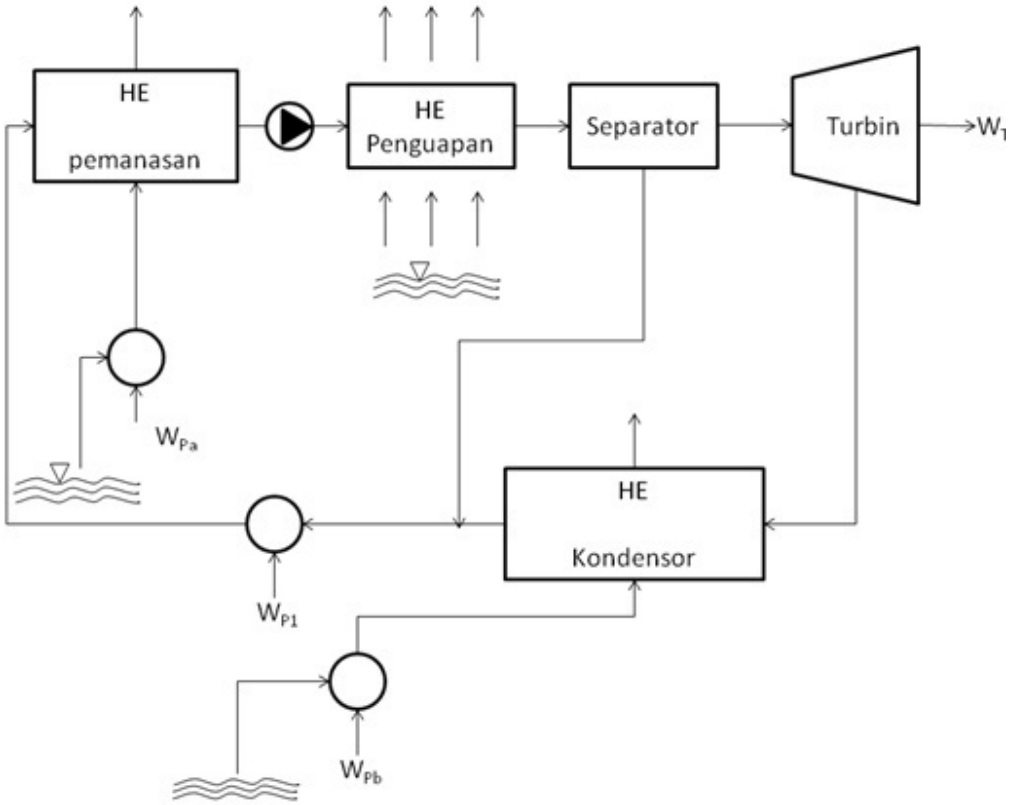
   Siklus kemungkinan kedua secara teori mempunyai daya keluaran turbin yang lebih besar dari siklus lainnya. Hal ini telah dibahas secara rinci pada **Bab 4** dan sketsanya dapat dilihat pada Gambar 5.1. Sedangkan efisiensi komponen OTEC untuk siklus ini dijelaskan pada Tabel 5.1.



Gambar 5.1 Diagram T-s Siklus dipilih.

Tabel 5.1 Efisiensi Komponen Pembangkit Listrik OTEC

Komponen	**Simbol**	**Satuan**	**Nilai**
Efisiensi turbin	η_T	-	*0,95*
Efisiensi generator	η_G	-	*0,96*
Efisiensi pompa air laut	η_{Pa} η_{Pb}	-	*0,825* *0,825*
Efisiensi pompa R-22	η_{P1}	-	*0,825*



Gambar 5.2 Bagan komponen sistem secara keseluruhan

Untuk siklus tertutup OTEC dengan fluida kerja R-22 ($CHClF_2$) bisa ditarik persamaan kerja : $\dot{W}_{Siklus} = \dot{W}_T - \dot{W}_{P1} - \dot{W}_{P2}$

Sedangkan jika menggunakan fluida kerja air laut, persamaan yang digunakan adalah

$$\dot{w}_{P2} = \dot{w}_{Pa} + \dot{w}_{Pb}$$

5.1. Perancangan Turbin

Turbin Uap dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori yang berbeda berdasarkan pada konstruksinya, prinsip kerjanya dan menurut peoses penurunan tekanan uap sebagai berikut:

Klasifikasi Turbin berdasarkan Prinsip Kerjanya

1. Turbin Impulse

   Turbin impuls atau turbin tahapan impuls adalah turbin sederhana berrotor satu atau banyak (gabungan) yang mempunyai sudu-sudu pada rotor itu. Sudu biasanya simetris dan mempunyai sudut masuk dan sudut keluar.

   - Turbin satu tahap.
   - Turbin impuls gabungan.
   - Turbin impuls gabungan kecepatan.

   Ciri-ciri dari turbin impuls antara lain:

- Proses pengembangan uap / penurunan tekanan seluruhnya terjadi pada sudu diam / nosel.
- Akibat tekanan dalam turbin sama sehingga disebut dengan Tekanan Rata.

2. Turbin Reaksi

   Turbin reaksi mempunyai tiga tahap, yaitu masing-masingnya terdiri dari baris sudu tetap dan dua baris sudu gerak. Sudu bergerrak turbin reaksi dapat dibedakan dengan mudah dari sudu impuls karena tidak simetris, karena berfungsi sebagai nossel bentuknya sama dengan sudu tetap walaupun arahnya lengkungnya berlawanan.

   Ciri-ciri turbin ini adalah :

- Penurunan tekanan uap sebagian terjadi di Nosel dan Sudu Gerak
- Adanya perbedaan tekanan didalam turbin sehingga disebut Tekanan Bertingkat.

Klasifikasi turbin uap berdasarkan pada tingkat penurunan Tekanan Dalam Turbin

- Turbin Tunggal (Single Stage)

  Dengan kecepatan satu tingkat atau lebih turbin ini cocok untuk untuk daya kecil, misalnya penggerak kompresor, blower, dll.

- Turbin Bertingkat (Aksi dan Reaksi).

  Disini sudu-sudu turbin dibuat bertingkat, biasanya cocok untuk daya besar. Pada turbin bertingkat terdapat deretan sudu 2 atau lebih. Sehingga turbin tersebut terjadi distribusi kecepatan / tekanan.

  Klasifikasi turbin berdasarkan Proses Penurunan Tekanan Uap

- Turbin Kondensasi.

  Tekanan keluar turbin kurang dari 1 atm dan dimasukkan kedalam kompresor.

- Turbin Tekanan Lawan.

  Apabila tekanan sisi keluar turbin masih besar dari 1 atm sehingga masih dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin lain.

- Turbin Ekstraksi.

  Didalam turbin ini sebagian uap dalam turbin diekstraksi untuk roses pemanasan lain, misalnya proses industri.

Turbin yang akan digunakan pada penelitian ini adalah turbin reaksi. Perancangan ini bukan ditujuan untuk membuat tetapi untuk pemilihan.

Dengan menggunakan data-data yang didapatkan pada **Bab 4**, daya turbin ideal ($\dot{W}_{sT}$) yang dihasilkan dari siklus dihitung sebagai berikut :

$$\frac{\dot{W}_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = h_{3g} - h_4$$

$$\frac{\dot{W}_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = (413{,}3 - 405{,}4)\ kJ/kg$$

$$\frac{\dot{W}_{sT}}{\dot{m}_{R-22}} = 7{,}9\ kJ/kg$$

Dari Tabel 4.1 didapatkan efisiensi turbin sebesar 0,95, sehingga nilai daya turbin yang sebenarnya ($\dot{W}_T$) adalah :

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_T / \dot{m}_{R-22}}{W_{sT} / \dot{m}_{R-22}}$$

$$0{,}95 = \frac{\dot{W}_T / \dot{m}_{R-22}}{7{,}9\ kJ/kg}$$

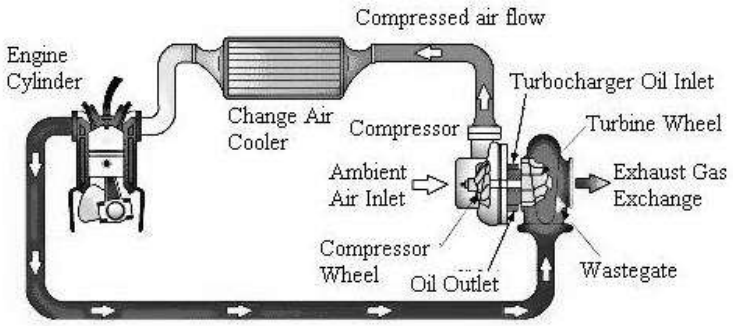
$$\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{R-22}} = 0{,}95 \times 7{,}9 kJ/kg = 7{,}505\ kJ/kg$$

Laju massa R-22 ($\dot{m}_{R-22}$) dapat dihitung dari efisiensi turbin sebesar 0,95 dan daya turbin ($\dot{W}_T$) telah ditentukan sebesar 50 W adalah 0.058 kg/s

Turbin yang digunakan berdasarkan kondisi operasi dan kondisi di pasaran. Di pasaran jenis turbin reaksi yang ada dan bisa digunakan untuk refrigerant adalah turbo charger. *Turbocharger* adalah sebuah kompresor sentrifugal yang mendapat daya dari turbin yang sumber tenaganya berasal dari asap gas buang kendaraan. Biasanya digunakan di mesin pembakaran dalam untuk meningkatkan keluaran tenaga dan efisiensi mesin dengan meningkatkan tekanan udara yang memasuki mesin. Kunci keuntungan dari turbocharger adalah mereka menawarkan sebuah peningkatan yang banyak dalam tenaga mesin hanya dengan sedikit menambah berat. *Turbocharger* meningkatkan output tenaga mesin sewaktu bertahan dalam kondisi operasional yang ekstrim, *turbocharger* adalah jenis sistem induksi paksa. Mereka memampatkan udara mengalir ke dalam mesin. Keuntungan dari kompresi udara adalah bahwa hal itu memungkinkan mesin memeras lebih banyak udara ke dalam silinder, dan lebih banyak udara berarti lebih banyak bahan bakar dapat ditambahkan . Komponen mesin ini memiliki tiga bagian penting: roda turbin, roda kompressor dan rumah as. Roda turbin yang bersudu-sudu ini berputar memanfaatkan tekanan gas buang keluar, kemudian melalui as terputarnya roda turbin ini berputar pula roda kompressor dengan sudu-sudunya sehingga memompa udara masuk dalam massa yang padat.

Turbocharger diletakkan di *exhaust manifold* dari mesin. Gas buang sisa pembakaran dari silinder berfungsi untuk memutar turbin, yang bekerja seperti halnya turbin gas. Turbin tersebut dihubungkan dengan poros ke kompresor (pompa udara), yang terletak

diantara saringan udara dan *intake manifold*. Kompresor berfungsi untuk menambah tekanan udara yang akan dimasukkan kedalam silinder. Gas buang dari silinder melewati sudu-sudu turbin, menyebabkan turbin berputar. Semakin banyak gas buang yang melewati sudu turbin, semakin cepat putaran turbin. Sedangkan pada ujung poros dimana turbin dipasang, kompresor memompa udara masuk kedalam silinder. Kompresor yang digunakan merupakan tipe sentrifugal – tipe ini menghisap udara pada bagian tengah sudu dan mengalirkan udara keluar ketika berputar. Untuk mengatasi kecepatan putaran sampai dengan 150.000 putaran per menit, poros turbin harus diberi bantalan secara cermat. Kebanyakan bantalan akan rusak pada kecepatan tinggi tersebut, sehingga kebanyakan *turbocharger* menggunakan bantalan fluida. Jenis bantalan ini menopang poros pada sebuah lapisan tipis fluida yang secara konstan dialirkan ke poros. Bantalan ini mempunyai dua fungsi, mendinginkan poros dan beberapa komponen *turbocharger* lainnya serta yang terpenting adalah menyebabkan poros berputar tanpa banyak mengalami gesekan



Gambar 5.3 Tata letak turbocharger

Pemilihan turbocharger disesuaikan dengan kapasitas pembangkit yang akan dihasilkan. Berdasarkan data di pasaran jenis turbocharger yang sesuai adalah untuk kendaraan dengan kapasitas 1000 cc yaitu jenis TD001. Gambar turbo charger sebagai komponen pembangkit adalah sebagai berikut:

Gambar 5.4 Turbocharger

5.2. Perancangan Pompa

Pompa digunakan untuk memindahkan dan meningkatkan tekanan fluida kerja dari kondensor menuju evaporator. Menurut prinsip perubahan bentuk energi yang terjadi, pompa dibedakan menjadi :

Positive Displacement Pump

Disebut juga dengan pompa aksi positif. Energi mekanik dari putaran poros pompa dirubah menjadi energi tekanan untuk memompakan fluida. Pada pompa jenis ini dihasilkan head yang tinggi tetapi kapasitas yang dihasilkan rendah. Yang termasuk jenis pompa ini adalah :

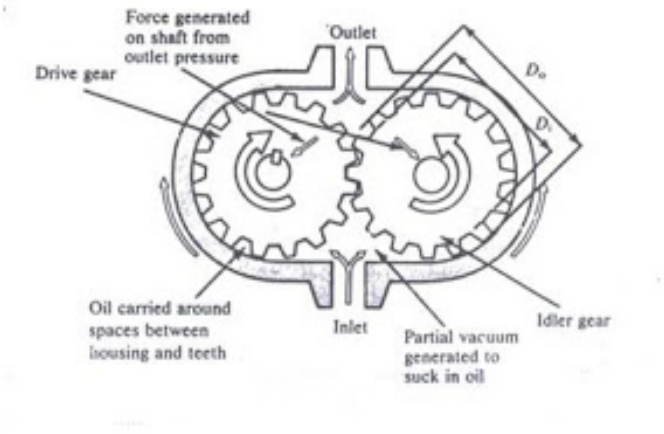
Pompa rotari

Sebagai ganti pelewatan cairan pompa sentrifugal, pompa rotari akan merangkap cairan, mendorongnya melalui rumah pompa yang tertutup. Hampir sama dengan piston pompa torak akan tetapi tidak seperti pompa torak (piston), pompa rotari mengeluarkan cairan dengan aliran yang lancar (smooth).

Macam-macam pompa rotari :

- Pompa roda gigi luar

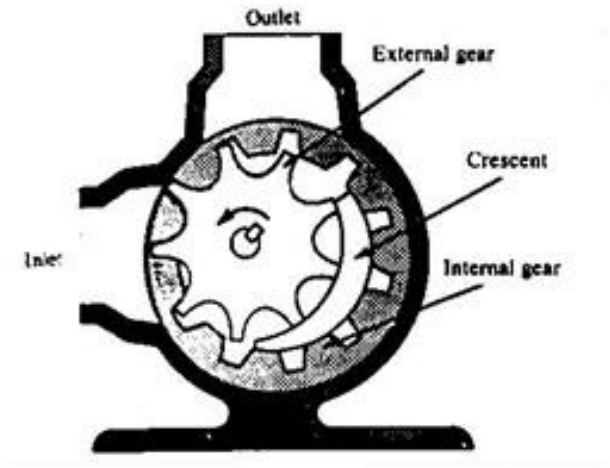
Pompa ini merupakan jenis pompa rotari yang paling sederhana. Apabila gerigi roda gigi berpisah pada sisi hisap, cairan akan mengisi ruangan yang ada diantara gerigi tersebut. Kemudian cairan ini akan dibawa berkeliling dan ditekan keluar apabila giginya bersatu lagi



Gambar 5.5 : Pompa roda gigi luar (13)

- **Pompa roda gigi dalam**

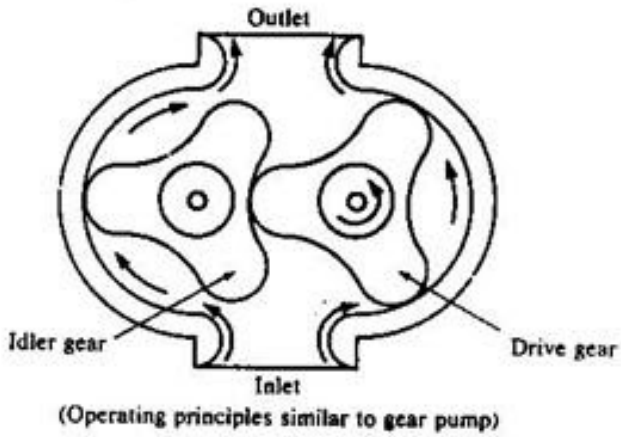
Jenis ini mempunyai rotor yang mempunyai gerigi dalam yang berpasangan dengan roda gigi kecil dengan penggigian luar yang bebas (idler). Sebuah sekat yang berbentuk bulan sabit dapat digunakan untuk mencegah cairan kembali ke sisi hisap pompa.



Gambar 5.6 : Lobe pump (13)

- **Pompa cuping (lobe pump)**

Pompa cuping ini mirip dengan pompa jenis roda gigi dalam hal aksinya dan mempunyai 2 rotor atau lebih dengan 2,3,4 cuping atau lebih pada masing-masing rotor. Putara rotor tadi diserempakkan oleh roda gigi luarnya.

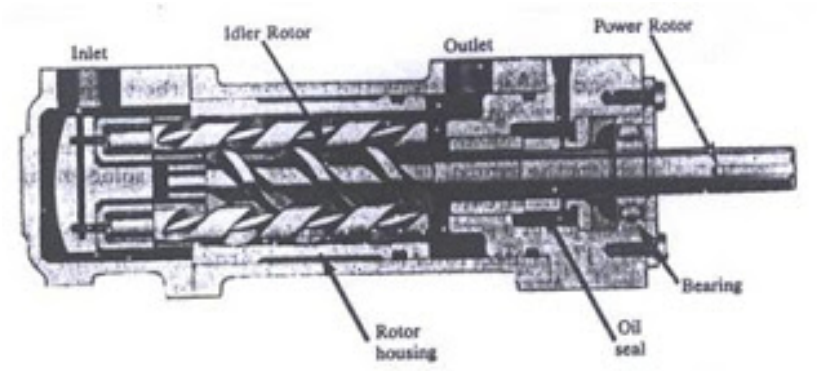


Gambar 5.7 : Lobe pump (13)

- **Pompa sekrup (screw pump)**

Pompa ini mempunyai 1,2 atau 3 sekrup yang berputar di dalam rumah pompa yang diam. Pompa sekrup tunggal mempunyai rotor spiral yang berputar di dalam sebuah

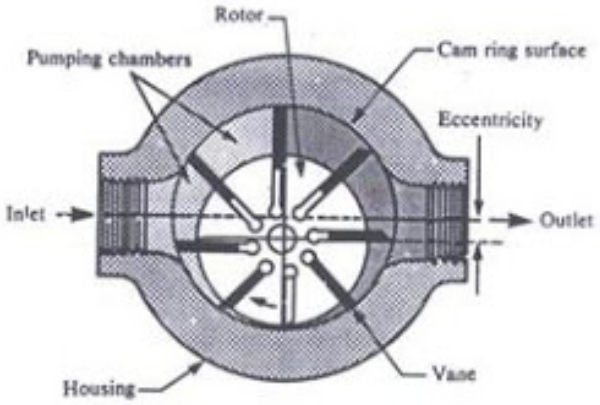
stator atau lapisan heliks dalam (internal helix stator). Pompa 2 sekrup atau 3 sekrup masing-masing mempunyai satu atau dua sekrup bebas (idler).



Gambar 5.8 : Three-scrow pump (13)

- **Pompa baling geser (vane Pump)**

Pompa ini menggunakan baling-baling yang dipertahankan tetap menekan lubang rumah pompa oleh gaya sentrifugal bila rotor diputar. Cairan yang terjebak diantara baling dibawa berputar dan dipaksa keluar dari sisi buang pompa.



Gambar 5.9 : Vane pump (13)

Pompa Torak (Piston)

Pompa torak mengeluarkan cairan dalam jumlah yang terbatas selama pergerakan piston sepanjang langkahnya. Volume cairan yang dipindahkan selama 1 langkah piston akan sama dengan perkalian luas piston dengan panjang langkah.

Dynamic Pump / Sentrifugal Pump

Merupakan suatu pompa yang memiliki elemen utama sebuah motor dengan sudu impeler berputar dengan kecepatan tinggi. Fluida masuk dipercepat oleh impeler yang menaikkan kecepatan fluida maupun tekanannya dan melemparkan keluar volut. Prosesnya yaitu :

- Antara sudu impeller dan fluida Energi mekanis alat penggerak diubah menjadi energi kinetik fluida

- Pada Volute

Fluida diarahkan kepipa tekan (buang), sebagian energi kinetik fluida diubah menjadi energi tekan.

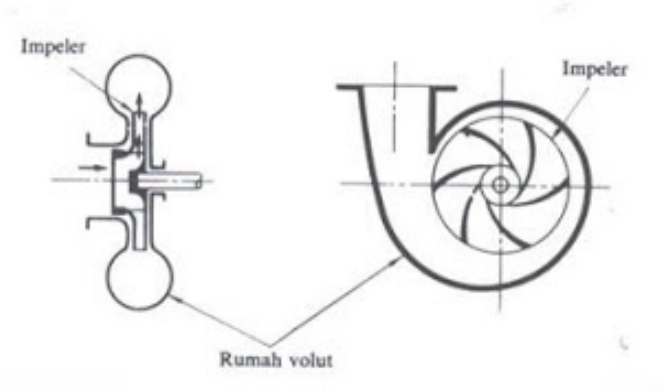
Yang tergolong jenis pompa ini adalah :

Pompa radial.

Fluida diisap pompa melalui sisi isap adalah akibat berputarnya impeler yang menghasilkan tekanan vakum pada sisi isap. Selanjutnya fluida yang telah terisap terlempar keluar impeler akibat gaya sentrifugal yang dimiliki oleh fluida itu sendiri. Dan selanjutnya ditampung oleh casing (rumah pompa) sebelum dibuang kesisi buang. Dalam hal ini ditinjau dari perubahan energi yang terjadi, yaitu : energi mekanis poros

pompa diteruskan kesudu-sudu impeler, kemudian sudu tersebut memberikan gaya kinetik pada fluida.

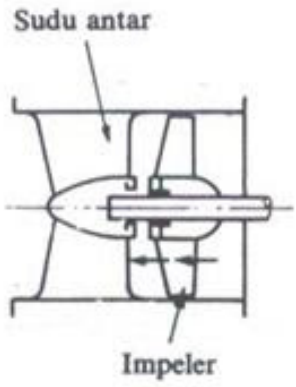
Akibat gaya sentrifugal yang besar, fluida terlempar keluar mengisi rumah pompa dan didalam rumah pompa inilah energi kinetik fluida sebagian besar diubah menjadi energi tekan. Arah fluida masuk kedalam pompa sentrifugal dalam arah aksial dan keluar pompa dalam arah radial. Pompa sentrifugal biasanya diproduksi untuk memenuhi kebutuhan head medium sampai tinggi dengan kapasitas aliran yang medium. Dalam aplikasinya pompa sentrifugal banyak digunakan untuk kebutuhan proses pengisian ketel dan pompa-pompa rumah tangga.



Gambar 5.10 : Pompa Sentrifugal (14)

Pompa Aksial (Propeller)

Berputarnya impeler akan menghisap fluida yang dipompa dan menekannya kesisi tekan dalam arah aksial karena tolakan impeler. Pompa aksial biasanya diproduksi untuk memenuhi kebutuhan head rendah dengan kapasitas aliran yang besar. Dalam aplikasinya pompa aksial banyak digunakan untuk keperluan pengairan.



Gambar 5.11 : Pompa aksial (14)

Pompa Mixed Flow (Aliran campur)

Head yang dihasilkan pada pompa jenis ini sebagian adalah disebabkan oleh gaya sentrifugal dan sebagian lagi oleh tolakan impeler. Aliran buangnya sebagian radial dan sebagian lagi aksial, inilah sebabnya jenis pompa ini disebut pompa aliran campur.

Pada penelitian ini dipilih pompa centrifugal, dan perhitungan ini bukan ditujukan untuk membuat melainkan untuk memilih. Pemilihan berdasarkan daya yang dibutuhkan oleh pembangkit.

Daya pompa ($\dot{W}_{sP1}$) yang dihasilkan dari siklus dapat dihitung sebagai berikut :

$$\frac{\dot{W}_{sP1}}{\dot{m}_{R-22}} = h_2 - h_{1F}$$

$$\frac{\dot{W}_{sP1}}{\dot{m}_{R-22}} = (217{,}0 - 216{,}7)\ kJ/kg$$

$$\frac{\dot{W}_{sP1}}{\dot{m}_{R-22}} = 0{,}3\ kJ/kg$$

Daya pompa sebenarnya ($\dot{W}_{P1}$) dapat dihitung, dengan asumsi efisiensi pompa sebesar 82,5%. Sehingga diperoleh daya pompa sebenarnya ($\dot{W}_{P1}$) adalah :

$$\eta_P = \frac{\dot{W}_{sP1}/\dot{m}}{\dot{W}_{P1}/\dot{m}}$$

$$0{,}825 = \frac{0{,}3\ kJ/kg}{\dot{W}_{P1}/\dot{m}}$$

$$\frac{\dot{W}_{P1}}{\dot{m}} = 0{,}3636\ kJ/kg$$

Berdasarkan ketersediaan di pasaran maka dipilih pompa elektrik seperti gambar berikut.

Gambar 5.12 Pompa centrifugal

5.3 Perancangan dan Pembuatan Penukar Panas (*Heat Exchanger*)

Alat penukar panas atau *Heat Exchanger* (HE) adalah alat yang digunakan untuk memindahkan panas dari sistem ke sistem lain tanpa perpindahan massa dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Medium pemanas dipakai adalah air yang dipanaskan (air lau dipermukaan) sebagai fluida panas dan air lau pada kedalaman tertentu sebagai air pendingin (*cooling water*). Penukar panas dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antar fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung (*direct contact*).

Tipe Aliran pada Alat Penukar Panas

Tipe aliran di dalam alat penukar panas ini ada 4 macam aliran yaitu :

1. *Counter current flow* (aliran berlawanan arah)
2. *Paralel flow/co current flow* (aliran searah)
3. *Cross flow* (aliran silang)
4. *Cross counter flow* (aliran silang berlawanan)

Jenis-jenis penukar panas

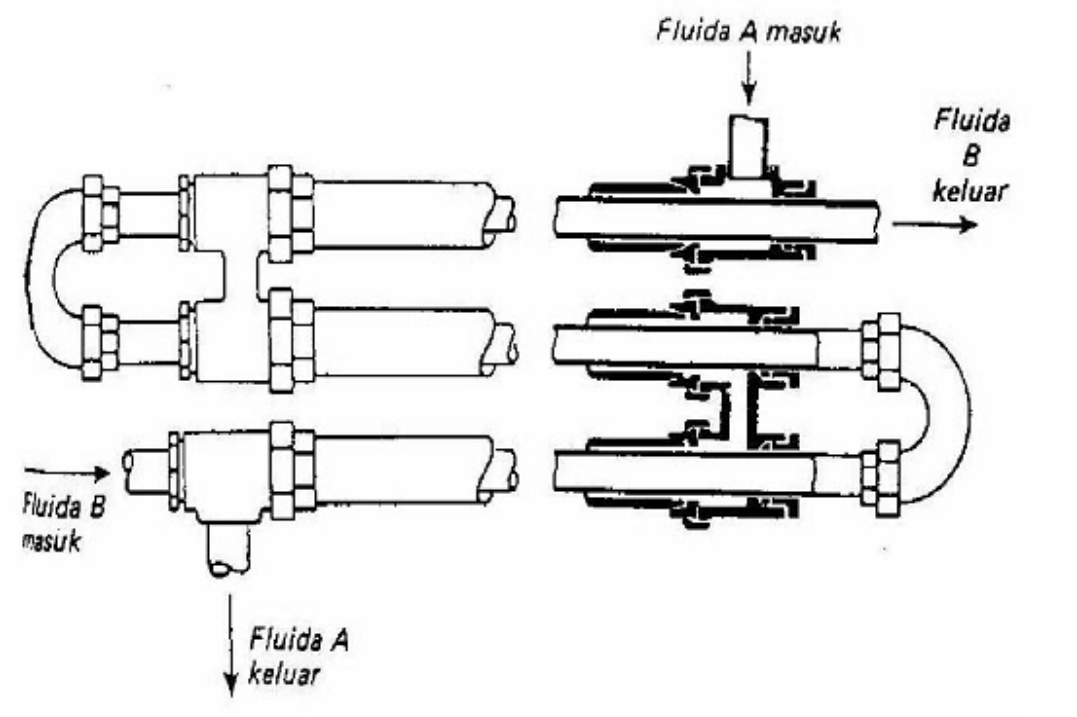
Jenis-jenis penukar panas antara lain :

1. *Double Pipe Heat Exchanger*
2. *Plate and Frame Heat Exchanger*
3. *Shell and Tube Heat Exchanger*
4. *Adiabatic wheel heat exchanger*
5. *Pillow plate heat exchanger*
6. *Dynamic scraped surface heat exchanger*
7. *Phase – change heat exchanger*

1. Penukar panas pipa rangkap (double pipe heat exchanger)

Salah satu jenis penukar panas adalah susunan pipa ganda. Dalam jenis penukar panas dapat digunakan berlawanan arah aliran atau arah aliran, baik dengan cairan panas atau dingin cairan yang terkandung dalam ruang annular dan cairan lainnya dalam pipa.

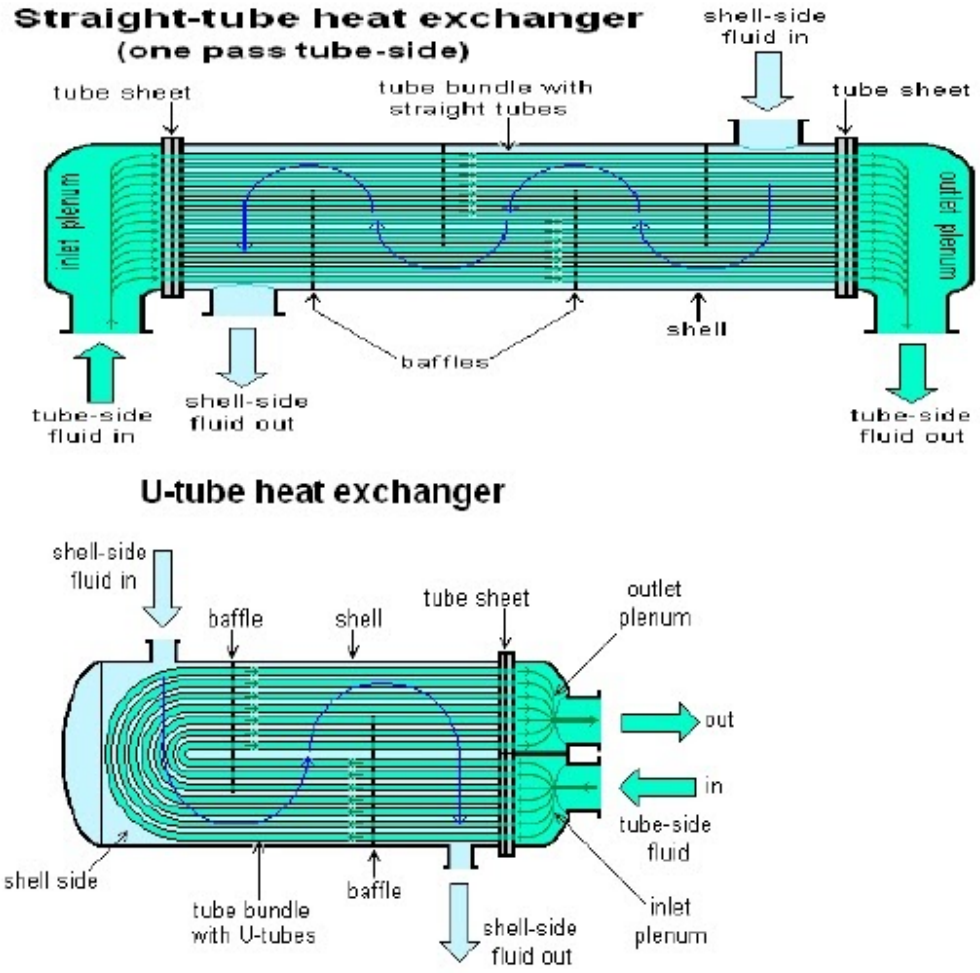
Alat penukar panas pipa rangkap terdiri dari dua pipa logam standart yang dikedua ujungnya dilas menjadi satu atau dihubungkan dengan kotak penyekat. Fluida yang satu mengalir di dalam pipa, sedangkan fluida kedua mengalir di dalam ruang anulus antara pipa luar dengan pipa dalam. Alat penukar panas jenis ini dapat digunakan pada laju alir fluida yang kecil dan tekanan operasi yang tinggi. Sedangkan untuk kapasitas yang lebih besar digunakan penukar panas jenis selongsong dan buluh (***shell and tube heat exchanger***).



Gambar 5.13 . Penukar panas jenis pipa rangkap (double pipe heat exchanger)(7)

2. Penukar panas cangkang dan buluh (*shell and tube heat exchanger*)

Alat penukar panas cangkang dan buluh terdiri atas suatu bundel pipa yang dihubungkan secara parallel dan ditempatkan dalam sebuah pipa mantel (cangkang). Fluida yang satu mengalir di dalam bundel pipa, sedangkan fluida yang lain mengalir di luar pipa pada arah yang sama, berlawanan, atau bersilangan. Kedua ujung pipa tersebut dilas pada penunjang pipa yang menempel pada mantel. Untuk meningkatkan effisiensi pertukaran panas, biasanya pada alat penukar panas cangkang dan buluh dipasang sekat (*buffle*). Ini bertujuan untuk membuat turbulensi aliran fluida dan menambah waktu tinggal (*residence time*), namun pemasangan sekat akan memperbesar *pressure drop* operasi dan menambah beban kerja pompa, sehingga laju alir fluida yang dipertukarkan panasnya harus diatur.

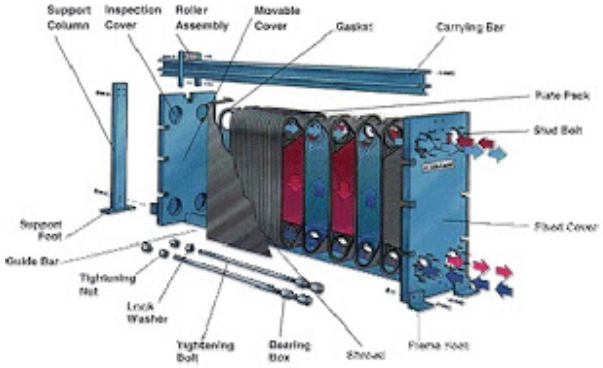


Gambar 5.14 .Penukar panas jenis cangkang dan buluh (7)

3. Penukar Panas Plate and Frame (*plate and frame heat exchanger*)

Alat penukar panas pelat dan bingkai terdiri dari paket pelat – pelat tegak lurus, bergelombang, atau profil lain. Pemisah antara pelat tegak lurus dipasang penyekat lunak (biasanya terbuat dari karet). Pelat – pelat dan sekat disatukan oleh suatu perangkat penekan yang pada setiap sudut pelat 10 (kebanyakan segi empat) terdapat lubang pengalir fluida. Melalui dua dari lubang ini, fluida dialirkan masuk dan keluar

pada sisi yang lain, sedangkan fluida yang lain mengalir melalui lubang dan ruang pada sisi sebelahnya karena ada sekat.



Gambar 5.15. Penukar panas jenis pelat and Frame (7)

Gambar 5.16. Penukar panas jenis pelat and Frame (7)

4. Adiabatic wheel heat exchanger

Jenis keempat penukar panas menggunakan intermediate cairan atau toko yang solid untuk menahan panas, yang kemudian pindah ke sisi lain dari penukar panas akan

dirilis. Dua contoh ini adalah roda adiabatik, yang terdiri dari roda besar dengan benang halus berputar melalui cairan panas dan dingin, dan penukar panas cairan.

5. Pillow plate heat exchanger

Sebuah pelat penukar bantal umumnya digunakan dalam industri susu untuk susu pendingin dalam jumlah besar langsung ekspansi tank massal stainless steel. Pelat bantal memungkinkan untuk pendinginan di hampir daerah seluruh permukaan tangki, tanpa sela yang akan terjadi antara pipa dilas ke bagian luar tangki. Pelat bantal dibangun menggunakan lembaran tipis dari logam-spot dilas ke permukaan selembar tebal dari logam.

Pelat tipis dilas dalam pola teratur dari titik-titik atau dengan pola serpentin garis las. Setelah pengelasan ruang tertutup bertekanan dengan kekuatan yang cukup untuk menyebabkan logam tipis untuk tonjolan di sekitar lasan, menyediakan ruang untuk cairan penukar panas mengalir, dan menciptakan penampilan yang karakteristik bantal membengkak terbentuk dari logam.

6.Dynamic scraped surface heat exchanger

Tipe lain dari penukar panas disebut "(dinamis) besot permukaan heat exchanger". Ini terutama digunakan untuk pemanasan atau pendinginan dengan tinggi viskositas produk, proses kristalisasi, penguapan tinggi dan fouling aplikasi. Kali berjalan panjang yang dicapai karena terus menerus menggores permukaan, sehingga menghindari pengotoran dan mencapai kecepatan transfer panas yang berkelanjutan selama proses tersebut.

7. Phase-change heat exchanger

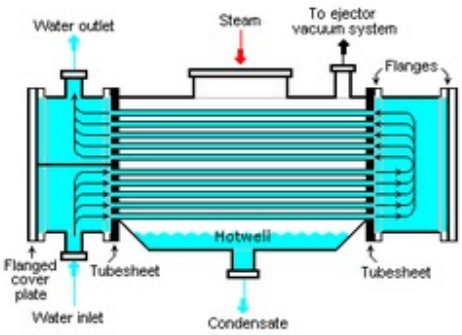
Selain memanas atau pendinginan cairan hanya dalam satu fasa, penukar panas dapat digunakan baik untuk memanaskan cairan menguap (atau mendidih) atau digunakan sebagai kondensor untuk mendinginkan uap dan mengembun ke cairan. Pada pabrik kimia dan kilang, reboilers digunakan untuk memanaskan umpan masuk untuk menara distilasi sering penukar panas .

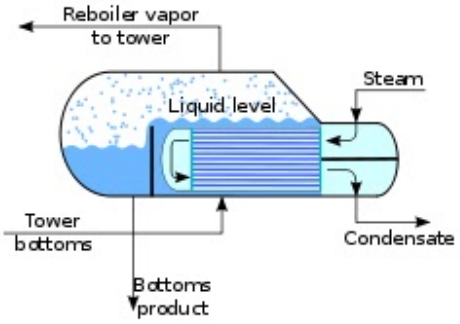
Distilasi set-up biasanya menggunakan kondensor untuk mengkondensasikan uap distilasi kembali ke dalam cairan.Pembangkit tenaga listrik yang memiliki uap yang digerakkan turbin biasanya menggunakan penukar panas untuk mendidihkan air menjadi uap.

Heat exchanger atau unit serupa untuk memproduksi uap dari air yang sering disebut boiler atau generator uap.Dalam pembangkit listrik tenaga nuklir yang disebut reaktor air bertekanan, penukar panas khusus besar yang melewati panas dari sistem (pabrik reaktor) primer ke sistem (pabrik uap) sekunder, uap memproduksi dari air dalam proses, disebut generator uap.Semua pembangkit listrik berbahan bakar fosil dan nuklir menggunakan uap yang digerakkan turbin memiliki kondensor permukaan untuk mengubah uap gas buang dari turbin ke kondensat (air) untuk digunakan kembali.

Untuk menghemat energi dan kapasitas pendinginan dalam kimia dan tanaman lainnya, penukar panas regeneratif dapat digunakan untuk mentransfer panas dari satu aliran yang perlu didinginkan ke aliran yang perlu dipanaskan, seperti pendingin distilat dan pakan reboiler pra-pemanasan.

Istilah ini juga dapat merujuk kepada penukar panas yang mengandung bahan dalam struktur mereka yang memiliki perubahan fasa. Hal ini biasanya padat ke fase cair karena perbedaan volume kecil antara negara-negara ini. Perubahan fase efektif bertindak sebagai buffer karena terjadi pada suhu konstan tetapi masih memungkinkan untuk penukar panas untuk menerima panas tambahan. Salah satu contoh di mana ini telah diteliti untuk digunakan dalam elektronik pesawat daya tinggi.



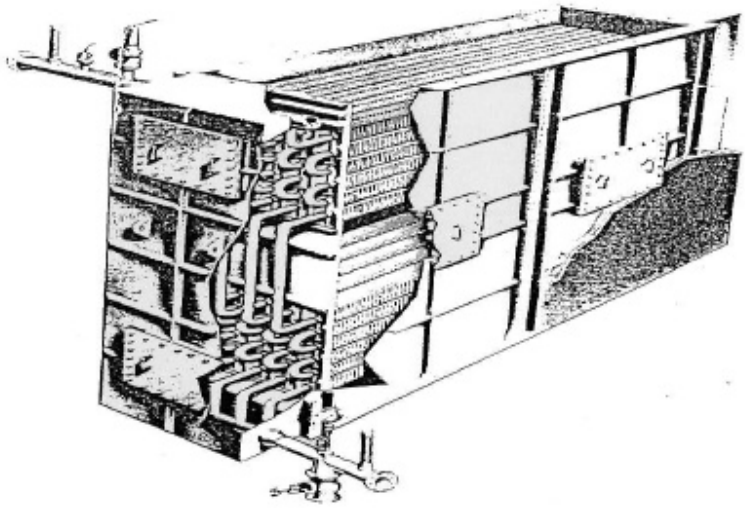


Gambar 5.18 Phase change Heat Exchanger (7)

8. Tipe pipa bersirip (Fins and tube)

Salah satu contoh penukar kalor tipe pipa bersirip ini diperlihatkan pada gambar 5.15. Contohyang lain banyak kita jumpai di lapangan antara lain radiator mobil, kondensor danevaporator mesin pendingin dan masih banyak lagi yang lain. Pada umumnya penukar kalor jenis pipa bersirip ini dipergunakan untuk fluida cair dan gas dimana fluida gas dilalukan diluar pipa, yaitu bagian yang bersirip. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan efektivitastransfer energi karena biasanya pada sisi gas koefisien perpindahan panas memiliki nilaiyang kecil sehingga untuk kompensasi agar laju transfer energinya meningkat diperlukanluas permukaan perpindahan panas yang relatif tinggi. Namun demikian pada kenyataannyadengan peningkatan luas permukaan sirip bukan berarti laju transfer energi meningkatsecara proporsional terhadap peningkatan luas tersebut karena adanya efektivitaspenggunaan sirip. Secara umum tentunya di dalam sirip juga terjadi mekanisme perpindahanpanas, sementara itu sirip juga memiliki tahanan termal sehingga temperatur sirip akanbervariasi dengan nilai yang selalu berbeda dengan temperatur fluida yang berada di dalampipa. Oleh karena laju transfer energi sangat tergantung pada beda temperatur antara keduafluida sedangkan dengan adanya sirip akan menambah tahanan termal proses dan bagisuatu tempat di sirip yang lokasinya jauh dari fluida yang berada di dalam pipa akanbertemperatur sedemikian rupa sehingga bedanya dengan fluida yang berada di luar pipaakan mengecil, maka

efektivitas laju transfer energi akan mengecil. Penukar kalor tipe pipabersirip juga bermacam-macam konstruksinya, antara lain penampang pipanya tidak selalulingkaran, artinya banyak sekali pipa jenis pipih, oval, dan persegi yang dilengkapi dengansirip. Penukar kalor pipa bersirip ini termasuk golongan penukar kalor kompak karenakebanyakan memiliki luas permukaan perpindahan panas per volume lebih besar dari 700m2/m3



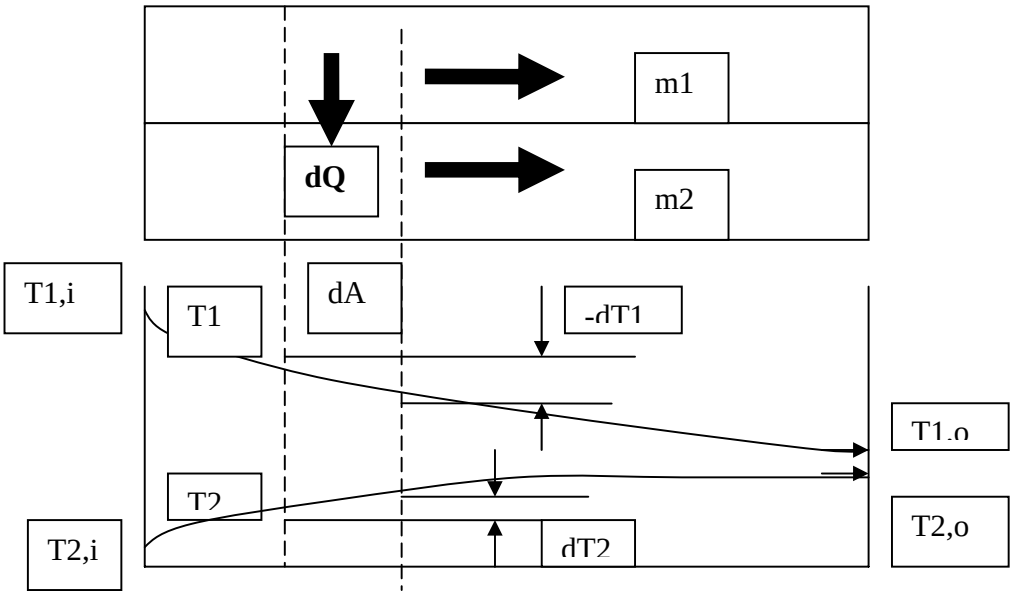
Gambar 5.19 Penukar Kalor Pipa Bersirip (10)

Pada peneitian ini, karena sistem OTEC yang akan dikembangkan adalah skala laboratorium, maka penukar kalor jenis kompak dimana dikatagerokian sebagai jenis penukar kalor pipa bersirip adalah yang dipilih.

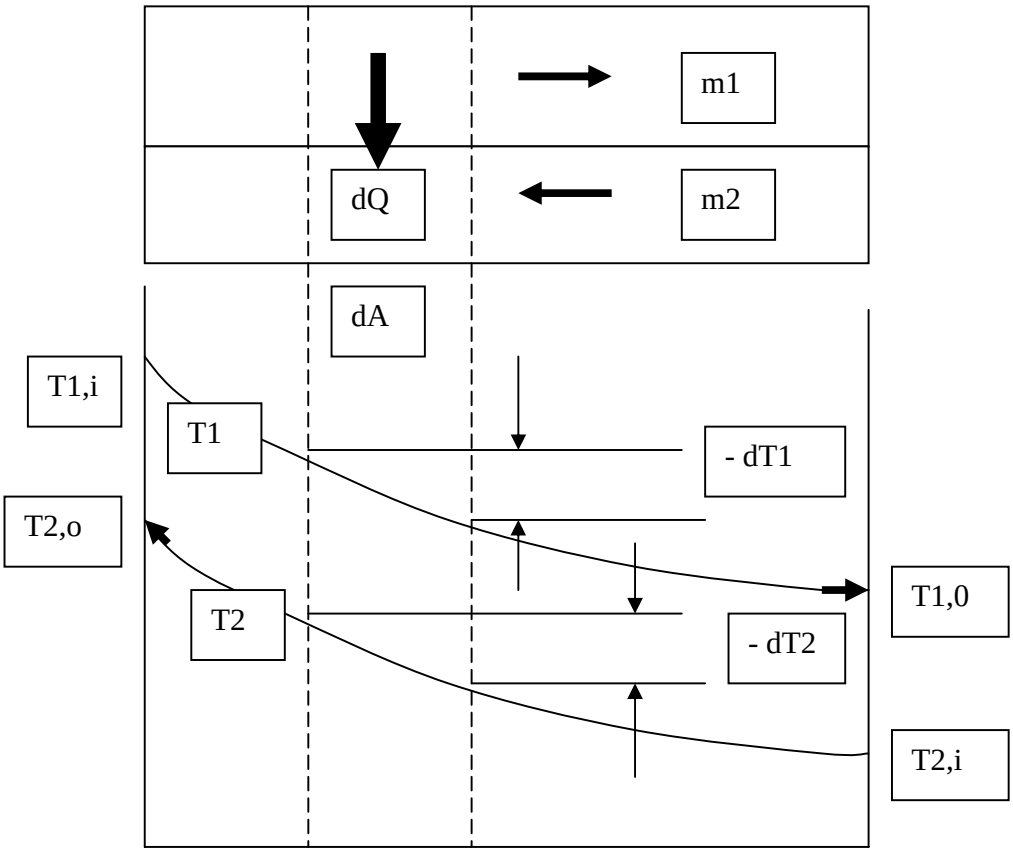
Prosedur Perancangan dan Analisa

Metoda LMTD adalah alah satu metoda analitis global yang didasarkan pada suatu pendekatan integral dengan berbagai hipotesa, contoh koefisien perpindahan panas adalah konstan sepanjang Penukar kalor, tidak ada kehilangan panas ke lingkungan dll.

Berikut ini adalah gambaran mengenai aliran lawan dan searah dalam analisa penukar kalor.



Gambar 5.20. Aliran Paralel



Gambar 5.21. Aliran berlawanan

Fluida panas dan dingin di subskrip-kan dengan 1 dan 2 .

Kesetimbangan energi termal pada elemen luas dA :

$$dQ = - m1.Cpm1.\ dT1 = m2.\ Cpm2.\ dT2$$

atau ;

$$dQ = Ulok\ (\ T1 - T2\ )\ dA$$

dengan : $dT1 = -\ dQ\ /\ m1.\ Cpm1$ dan

$dT2 = -\ dQ\ /\ m2.Cpm2$

sehingga :

$$dT1 - dT2 = d\ (\ T1 - T2\ ) = -\ dQ\ \{\ [\ 1/\ m1.Cpm1\ ] + [1/\ m2Cpm2\ ]\}$$

$d(T1 – T2) / (T1 – T2) = - U\ lok \{ [1/ m1.Cpm1] + [1/ m2. Cpm2] \} dA$

$$Q = \frac{U.A.\ \Delta Ta - \Delta Tb}{\ln(\Delta Ta / \Delta Tb)}$$

dimana ; $\Delta Ta = T1,i – T2,i$: $\Delta Tb = T1,o – T2,o$

$Q = U.A.\ LMTD$

Catatan : $\Delta Tm = F.\ LMTD\ cf$

LMTD cf adalah LMTD untuk tatanan aliran berlawanan arah dan

F adalah faktor koreksi.

dQ = daya termal yang dipindahkan pad elemen luas dA

m dot adalah laju aliran massa

Cpm adalah panas jenis fluida pada temperatur rata-rata di dalam segemen dA

Ulok adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh pada elemen dA

Untuk Perancangan dilakukan langkah sebagai berikut:

a. Temperatur masuk dan laju aliran massa fluida panas (Thi dan mh)
b. Temperatur masuk dan laju aliran massa fluida dingin untuk 1 dan 2 (Tc1i, Tc2i dan mc1, mc2)
c. Jumlah pipa tiap laluan (NP)
d. Diameter hidrolis
e. Jarak antar pusat pipa
f. Menghitung bilangan Reynold.

$Re = \rho.V.D / \mu$ (untuk fluida panas)

$Re = 4m / \pi.D.\mu$ (untuk fluida dingin)

g. Menghitung harga dari sifat-sifat fisis termodinamis : kalor jenis (cp), massa jenis (ρ), konduktivitas termal (k) dan viskositas (μ) dari fluida panas dan dingin.
h. Menghitung kecepatan aliran untuk fluida panas : $V = m / (\rho . A)$
i. Menghitung kecepatan maksimum untuk fluida panas yang mengalir dalam susunan pipa.
j. Menghitung besarnya kecepatan fluida panas yang mengalir pada tiap-tiap titik
k. Menghitung bilangan Prandtl untuk fluida panas dan dingin, $Pr = Cp . \mu / k$
l. Menghitung bilangan Nusselt untuk fluida dingin dan panas
m. Menghitung koefisien perpindahan panas/ kalor konveksi untuk fluida panas,
n. Menghitung koefisien perpindahan kalor konveksi untuk fluida dingin,

$$h = Nu.k / D$$

o. Menghitung koefisien perpindahan kalor keseluruhan

Penukar kalor yang dirancang dan dihitung adalah evaporator dan kondensor.

Evaporator

Bererapa jenis evaporator yang bisa digunakan antara lain

Panci Ketel Terbuka

Evaporator ini adalah jenis paling sederhana yang terdiri dari bejana terbuka terbuat dari besi tuang dimana fluida akan dididihkan. Sebagai pemanas bisa digunakan api langsung atau mantel uap. Untuk mencegah terbentuknya kerak, panci dilengkapi dengan pengaduk jangkar (*anchor paddle*) yang memiliki bentuk sesuai dengan kontur dasar panci. Evaporator ini murah dan operasinya sederhana, tetapi efisiensi panasnya rendah sehingga alat ini cocok digunakan untuk industri kecil/rumah tangga. Untuk efisiensi yang lebih baik, seringkali posisi media pemanas berada terendam dalam larutan yang akan dievaporasi, contohnya uap berada dalam pipa spiral yang terendam dalam larutan yang akan dievaporasi.

b. Evaporator Buluh-Cangkang (*Turbular Evaporator*)

Pemanas yang digunakan pada evaporator jenis ini adalah alat penukar panas jenis buluh-cangkang dimana uap mengalir dalam cangkang dan larutan dalam buluh, dan atau sebaliknya. Pada dasarnya secara alami ada dua jenis evaporator buluh-cangkang, yaitu *horizontal turbular evaporator* dan *vertical turbular evaporator.* Selain itu juga terdapat evaporator dengan sirkulasi paksa yang sebenarnya sama seperti evaporator alami hanya diberi percepatan untuk mempercepat laju evaporasi.

b.1. *Horizontal Tubular Evaporator*

Uap disalurkan dalam disalurkan dalam buluh dan larutan dalam cangkang yang merupakan tangki penguapan. Umpan dimasukkan dari sisi atas buluh dan merendam buluh horizontalnya sehingga pemanasannya sempurna. Diameter tangki berukuran 6-8 feet dengan tinggi tangki 8-12 feet dan ukuran buluh berdiameter 3/4”-1 ¼ ” . Buluh horizontal diklem secara kedap dan tahan panas, dengan konstruksi yang mudah dibongkar pasang. Evaporator ini cocok untuk larutan yang tidak *viscous* dan tidak menimbulkan endapan/kristal selama proses evaporasi berlangsung. Biaya investasi untuk alat ini lebih murah dibandingkan jenis vertikal.

b.2. *Vertical Turbular Evaporator*

Daerah pemanas dinamakan *calendria*, yaitu sejumlah buluh vertikal yang dirakit dalam suatu cangkang, dan ditengahnya terdapat buluh dengan diameter besar yang dinamakan *downtake*. Luas lingkaran *downtake* adalah 75%-150% dari luas total buluh-buluhnya. Buluhnya berdiameter 1”-4” dengan tinggi 3-6 feet.

Jenis ini termasuk evaporator sirkulasi alami, yang sangat efisien dengan ratio penguapan yang lebih baik daripada jenis horizontal. Salah satu kerugian dari alat ini adalah apabila terjadi pengendapan pada buluh-buluhnya, maka operasi alat harus dihentikan untuk dilakukan reparasi dan pembersihan. Oleh karena itu dikembangkan beberapa jenis *vertical turbular evaporator* yang lebih praktis pemeliharaannya yaitu

basket type vertical turbular evaporator . Selain itu, modifikasi pada *vertical turbular evaporator* seringkali dilakukan berdasarkan kondisi fluida yang akan dievaporasi.

b.2.1. *Basket Type Vertical Turbular Evaporator*

Evaporator ini adalah modifikasi dari jenis *vertical tube* yang lebih praktis pemeliharaannya. *Calendria*nya adalah suatu konstruksi yang terpisah, dan dapat dibongkar pasang/diganti dengan candangannya dari tangki penguapan untuk keperluan pembersihan dan reparasi. Ukuran calendria dibuat sedemikian rupa sehingga penempatannya dalam tangki membentuk anulus, sebagai *downtake* yang luasnya 75%-150% dari luas total buluhnya. Uap masuk dalam cangkang calendria dan mengalir ke bawah melalui *downtake anulus* kemudian memasuki buluh pemanas dan mendidih sehingga naik ke atas secara alami; campuran gelembung uap dan larutan akan membentur *reflektor* , yaitu sekat pemisah uap (*entrainment separator*), sehingga uap dan larutan pekat terpisah; uap mengalir ke atas dan larutan kembali ke bawah melalui *downtake*nya.

b.2.2. *Long Tube Vertical Evaporator*

Pada evaporator ini, umpan masuk dari bawah buluh dan dijaga hingga 2-3 feet dari bawah ujung pipa. Uap pemanas berada dalam cangkang. Umpan larutan dimasukkan dari bawah dan pemanasan larutan menyebabkan menyebabkan terjadi gelembung, yang makin ke atas makin banyak, sehingga di bagian atas aliran larutan akan membentuk lapisan (film) tipis yang mengalir ke atas secara alami bersama uapnya dan selanjutnya membentur *reflektor*

(*impegment baffle*), yaitu sekat pemisah uap (*entrainment separator*), sehingga uap larutan pekat terpisah; uap mengalir ke atas dan konsentrat terkumpul di bawahnya dan mengalir ke bawah melalui pipa keluaran yang diambil sebagai produk. Pada dasarnya, jenis ini adalah jenis evaporator satu lintas, tapi apabila diperlukan sirkulasi, dapat diatur dari katup yang tersedia. Dari mekanisme aliran larutannya, alat ini dikenal juga

dengan nama *rising film evaporator* dan cocok untuk fluida yang berbuih dan encer.

b.2.3. *Falling Film Evaporator*

Pemekatan larutan yang sangat peka terhadap panas (contoh: juice) mengharuskan waktu kontak yang singkat dengan permukaan panasnya; hal ini dapat dicapai dengan *falling film evaporator* satu lintas. Uap dalam cangkang dan larutan dalam buluh, yang memiliki ukuran 2”-10”.

Umpan larutan dimasukkan di atas tabung-tabung secara merata dan jatuh ke bawah menelusuri permukaan dalam tabung dalam bentuk aliran film. Panas tabung akan menguapkan larutan, dan uap yang terbentuk akan jatuh ke bawah bersaam larutan pekat dan dipisahkan dalam ruang pemisah uap-cair di bagian bawah alat.

Masalah utama dalam evaporator jenis ini adalah pendistribusian larutan umpan logam berperforasi dan corong penyalur sebagai distributor. Alat ini cocok untuk menguapkan zat cair yang *viscous*.

b.2.4. Evaporator Film Aduk

Evaporator ini merupakan modifikasi *falling film evaporator* dimana daya hantar panas konveksi cairan film ditingkatkan dengan memperbesar turbulensi lapisan film dengan bantuan pengadukkan mekanik, sehingga daya hantar panas yang tinggi dapat terjadi pada bahan *viscous* (sampai 1000 poise pada suhu evaorasi).

Umpan masuk dari puncak bagian yang bermantel dan larutan disebar ke dinding tabung menjadi film tipis yang sangat turbulen dengan bantuan daun-daun vertikal pengaduk, yang akan meningkatkan daya hantar panas konveksinya sehingga terjadi penguapan yang cepat.

Uapnya naik ke bagian atas alat sedangkan konsentratnya turu ke bawah sampai

ke permukaan tabung yang tidak bermantel uap. Daun-daun pengaduk berfungsi untuk penangkap percikan (*entrainment separator*) dimana percikan terpisah dengan jalan melemparnya ke dinding tabung dan mengalir ke bawah sehingga uapnya bebas dari percikan.

Alat ini sangat efektif untuk larutan yang *viscous* yang sangat peka terhadap panas. Kelemahan dari alat ini adalah kapasitasnya kecil dan biaya operasinya mahal, karena adanya bagian alat yang bergerak sehingga memerlukan pemeliharaan.

b.3. Evaporator dengan sirkulasi paksa (*Forced-circulatation type)*

Untuk menguapkan larutan *viscous* secara sirukulasi alamiah, daya hantar panas konveksinya sangat rendah (karena lapisan filmnya tebal), sehingga untuk meningkatkannya diperlukan suatu percepatan sampai 6 – 18 feet/detik (2 – 6 m/det), yang pelaksanaannya dapat dilakukan dalam jenis evaporator horizontal maupun vertikal.

Dengan sirkulasi paksa ini larutan mempunyai daya hantar konveksi yang lebih baik sehingga rasio penguapan besar, sedang waktu kontaknya singkat (sekitar 3 detik) maka larutan yang peka terhadap panas pun dapat dipekatkan dengan alat ini.

Jenis-jenis evaporator berdasarkan metode operasinya

Dalam pengoperasian evaporator, kita bedakan evaporator efek

tunggal/satu tahap (*single effect evaporator*) dan evaporator efek/tahap banyak (*multiple effect evaporator*).

a. Evaporator efek tunggal/satu tahap (*single effect evaporator*)

Umpan dipanaskan/diuapkan dengan jalan memasok uap jenuh dari luar dan

kemudian uap yang terjadi dikondensasikan dimana panasnya diambil oleh air pendingin dari luar. Disini terlihat bahwa panas latennya dibuang begitu saja melalui air pendingin. Evaporator tunggal digunakan bila kapasitasnya kecil dan tersedia uap yang murah/banyak.

b. Evaporator tahap banyak (*multiple effect evaporator*)

Untuk menghemat pemakaian uap serta meningkatkan efisiensi panas, digunakan orang evaporator tahap banyak, dimana uap dari larutan digunakan sebagai sumber panas untuk penguapan larutan dialat lain (daur ulang uap). Cara ini dikenal dengan nama evaporasi tahap banyak (*multiple effect evaporator*). Dalam alat ini panas laten yang terdapat dalam uap dari penguapan larutan umpan digunakan untuk menguapkan larutan umpan yang lain di alat lain; Mengingat diperlukannya flux temperatur dalam pemindahan panas, maka proses penguapan dengan menggunakan uap ini harus dilakukan pada temperatur yang lebih rendah. Hal ini dapat dicapai dengan menurunkan tekanan operasi penguapannya. Melalui cara ini penguapan bertahap banyak tersebut dapat dilakukan sampai tahap ke 3 atau 4 yang dikenal dengan nama *triple/quadruple effect evaporator*.

Evaporator pada penelitian ini terdiri dari dua sistem, yaitu sistem pemanasan dan sistem penguapan. Kalor masukan total pada evaporator ($\dot{Q}_{in}$) yang dipakai adalah $\dot{Q}_{s,in}$, karena dengan $\dot{Q}_{in}$ besar maka sikus akan lebih baik. Kalor masukan total yang diperlukan dari siklus adalah :

$$\frac{\dot{Q}_{s,in}}{\dot{m}} = h_{3g} - h_2$$

$$\frac{\dot{Q}_{s,in}}{\dot{m}} = (413{,}3 - 217{,}0)\ kJ/kg$$

$$\frac{\dot{Q}_{s,in}}{\dot{m}} = 196{,}3\ kJ/kg$$

Perancangan evaporator adalah sebagai berikut:

Koefisien Konveksi

a. Koefisien konveksi bagian dalam (h_i);

Perhitungan ini mengacu pada rumus-rumus aliran dalam pipa *(internal flow)*. Sedangkan sifat-sifat air laut diberikan di asumsikan.

- Untuk kondisi temperatur luar pipa = $T_{rata\text{-}rata}$ = 297,6 K

  C_p : 4,18 kJ/kg.K

  μ : 907.10^{-6} N.s/m^2

  k : 609.10^{-3}W/m.K

  Pr : 6,225

- Untuk kondisi temperatur permukaan pipa T_{sur} = $T_{c,Out}$ = 299K

  C_p : 4,179 kJ/kg.K

  μ : 855.10^{-6} N.s/m^2

  k : 613.10^{-3}W/m.K

  Pr : 5,83

b. Koefisien konveksi bagian luar pipa (h_o);

Perhitungan ini mengacu pada rumus-rumus aliran dalam pipa *(external flow)*. Fluida yang digunakan pada perhitungan konveksi bagian luar pipa adalah fluida R-22. .

- Untuk kondisi temperatur luar pipa = $T_{rata\text{-}rata}$ = 287,21 K

  C_p : 1,215 kJ/kg.K

  μ : $214,5.10^{-6}$ N.s/m^2

  k : $90,4.10^{-3}$ W/m.K

  Pr : 2,88

  ρ : 1233 kg/m^3

Realisasi dari evaporator dimulai dengan penekukan pipa yang sebelumnya dihitung berdasarkan data-data di atas.

Gambar 5.22. Pipa dibentuk untuk penukar kalor (evaporator)

Pipa terbuat dari tembaga dengan diamater 1/8 inch, kemudian ditekuk supaya volume evaporator tidak terlalu besar. Gambar 5.22 menunjukkan konstruksi pipa yang akan dipasang sirip untuk evaporator.

Untuk meningkatkan laju perpindahan panas maka dipasang sirip terbuat dari lembaran aluminium dengan ketebalan 0,2 mm dengan konstruksi sebagai berikut.

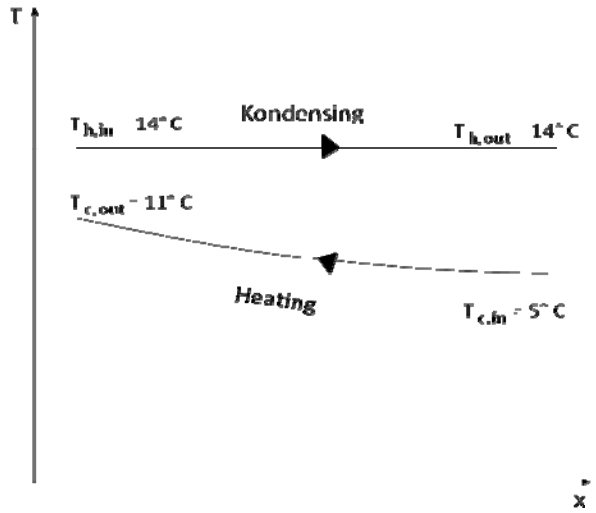
Gambar 5.23. Evaporator setelah dipasang sirip

Kondensor

Sketsa penukaran panas pada kondensor di siklus ini dijelaskan pada Gambar 5.3. Kalor keluaran pada kondensor ($\dot{Q}_{Out}$) yang dipakai adalah kalor keluaran sebenarnya ($\dot{Q}_{sOut}$) karena dengan $\dot{Q}_{Out}$ besar maka sikus akan lebih baik Besarnya q out adalah 21.03 kJ/kg

Menghitung Massa Air Laut Yang Dalam Tube Kondensor

Alat penukar panas pada kondensor ini menggunakan *compact heat exchanger*. Nilai $C_{p,h}$ untuk perhitungan laju massa air laut pada sistem kondensor sebesar 4,198 kJ/(kg.K) .



Gambar 5.24 Ilustrasi penukar panas PENUKAR KALOR kondensor model *compact*.

Jika kondensor diletakan dalam laut akan mengakibatkan daya pompa yang sangat besar, maka penempatan kondensor diletakan di atas *(plantship).* Dengan cara ini maka daya pompa akan terpangkas. Pada kondensor dipilih PENUKAR KALOR model (*compact)* dengan aliran dalam pipa berupa air laut. Air laut dialirkan dalam pipa untuk memudahkan perawatan jika terjadi pengotoran. Air laut merupakan fluida yang lebih kotor dibandingkan dengan R-22.

Koefisien konveksi bagian dalam (h_i);

Perhitungan ini mengacu pada rumus-rumus aliran dalam pipa *(internal flow)*. Sedangkan sifat-sifat air laut adalah

- Untuk kondisi temperatur luar pipa = $T_{rata\text{-}rata}$ = 281 K

  C_p : 4,198 kJ/kg.K

  μ : 1422.10^{-6} N.s/m^2

  k : 582.10^{-3}W/m.K

  Pr : 10,26

- Untuk kondisi temperatur permukaan pipa T_{sur} = $T_{c,Out}$ = 287 K

  C_p : 4,184 kJ/kg.K

  μ : 1080.10^{-6} N.s/m^2

k : 598.10^{-3}W/m.K

Pr : 7,56

Koefisien konveksi bagian luar

Perhitungan ini mengacu pada rumus-rumus aliran dalam pipa *(internal flow)*. Sedangkan sifat-sifat air laut :.

- Untuk kondisi temperatur luar pipa = $T_{rata\text{-}rata}$ = 281 K

  ρ : 26,3 kg/m^3

  C_p : 0,747 kJ/kg.K

  μ : $12,3.10^{-6}$ N.s/m^2

  k : $10,1.10^{-3}$W/m.K

  Pr : 0,91

- Untuk kondisi temperatur permukaan pipa T_{sur} = $T_{c,Out}$ = 284 K

  C_p : 1,19 kJ/kg.K

  μ : 225.10^{-6} N.s/m^2

  k : $94,2.10^{-3}$W/m.K

  Pr : 2,84

5.4 Generator

Generator digunakan untuk membangkitkan listrik, dimana poros generator dihubungkan dengan poros turbin. Pada penelitian ini generator yang digunakan adalah tipe MY1018 dengan spesifikasi sebagai berikut :

1. Voltage 24V DC 180 Watt
2. Kecepatan maksimum 2750 rpm

Gambar 5.25. Generator

BAB VI

PENGUJIAN

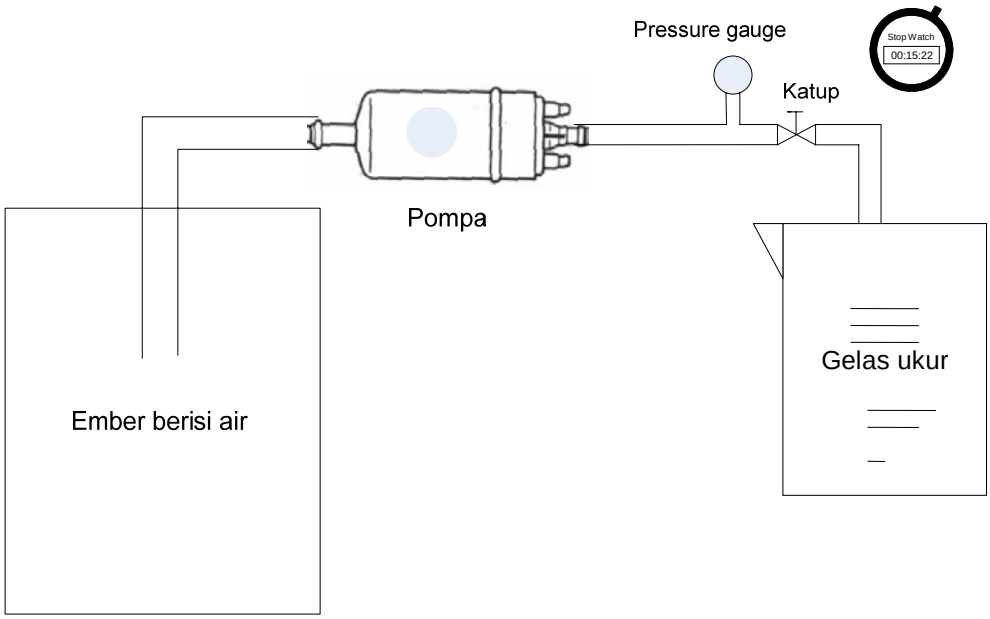
Pengujian dilakukan untuk mengetahui performance dari pembangkit dengan system OTEC. Sesuai target luaran pada tahun pertama ini, ditargetkan pembangkit bisa menghasilkan listrik. Sedangkan pengkondisian evaporator dan kodensor menyerupai air laut dilaksanakan pada tahun II.

6.1 Pengujian Komponen

Karena ada beberapa komponen yang dibeli, spesifikasinya tertentu, maka untuk mengetahui performance dari peralatan tersebut harus dilakukan pengujian mandiri untuk setiap komponen.

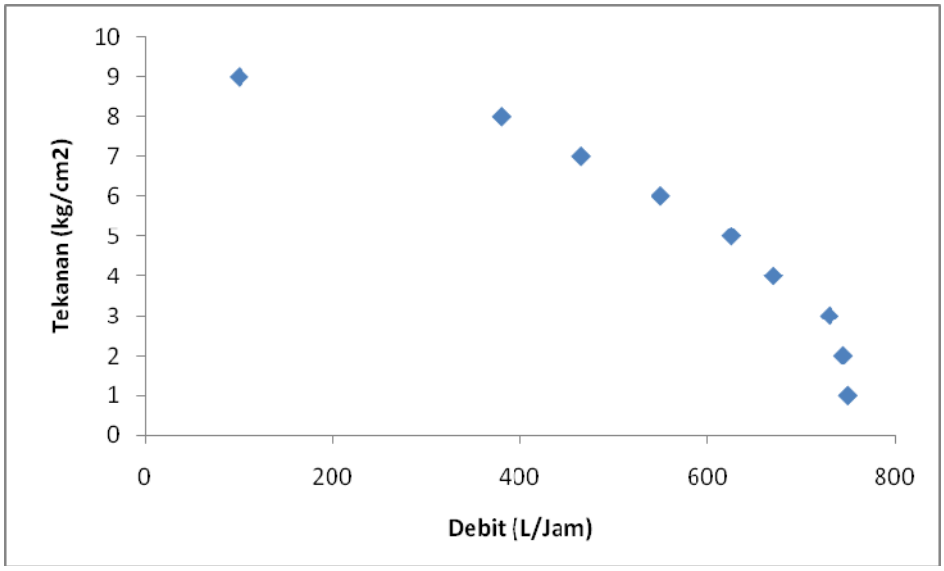
Pengujian Pompa.

Pengujian pompa diperlukan untuk mengetahui performance pompa tersebut dan memastikan bahwa pompa bisa memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan.



Gambar 6.1 Skema pengujian pompa

Hasil pengujian pompa diperlihatkan pada gambar berikut:



Gambar 6.2 Performance pompa

Dari hasil pengujian tersebut terlihat bahwa pompa yang dipilih memenuhi kriteria yang dibutuhkan yaitu dengan peningkatan (head) 70 m dapat menghasilkan debit 450 l/jam.

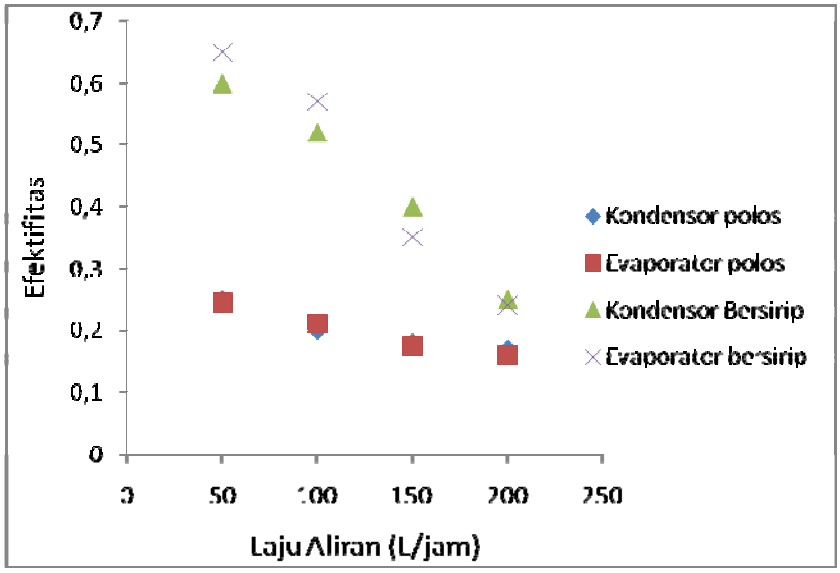
Pengujian Kondensor dan Evaporator

Pengujian kondensor dan evaporator ditujuan untuk mengetahui efektifitas dari penukar kalor tersebut. Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

ALAT PENUKAR
KALOR

Gambar 6.3 Peralatan untuk pengujian penukar kalor.

Hasil dari pengujian digambarkan seperti di bawah ini:



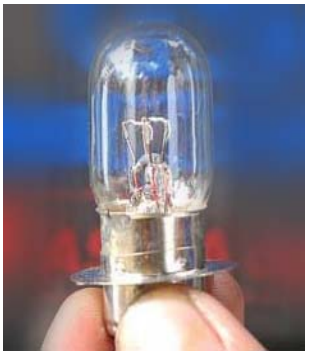
Gambar 6.4. efektifitas evaporator dan kondensor.

6.2 Pengujian Sistem Pembangkit.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performance pembangkit secara keseluruhan. Peralatan/komponen yang digunakan antara lain:

- Lampu DC 12 volt 10 watt

  Sebagai Beban untuk pengujian turbin air



Gambar 6.5 Lampu DC

- Seakring / Fuse 20 Ampere

  Digunakan untuk memutus arus listrik yang melewati seakring tersebut jika konslet secara tiba-tiba atau arus listrik yang mengalir melebihi besar arus yang di ijinkan sekering.

Gambar 6.6 Seakring / Fuse 20 Ampere

- Ampermeter 500 mA

Amperemeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur kuat arus listrik.

Gambar 6.7 Ampermeter 500 mA

- Voltmeter 30 Volt

Voltmeter adalah suatu alat yang berfungsi untuk mengukur tegangan listrik.

Gambar 6.8 Voltmeter 30 Volt

Mekanisme Pengujian

Mekanisme pada pengujian terdiri dari :

1. Variasi katup pengatur laju aliran fluida

2. Pengukuran putaran turbin

   Mekanisme pengukuran putaran turbin adalah putaran diukur dengan tachometer digital, dilakukan beberapa kali yang secara langsung diukur pada putaran puli, dan dapat terbaca secara digital.

3. Pengukuran tegangan dan arus listrik

   Semua pengujian dan pengukuran tegangan digunakan voltmeter dan amperemeter, yang secara langsung akan didapat hasilnya.

Dalam melakukan pengujian ada tahapan yang harus dilakukan. Tahapan tersebut adalah sebagai berikut :

- **Tahap persiapan awal**

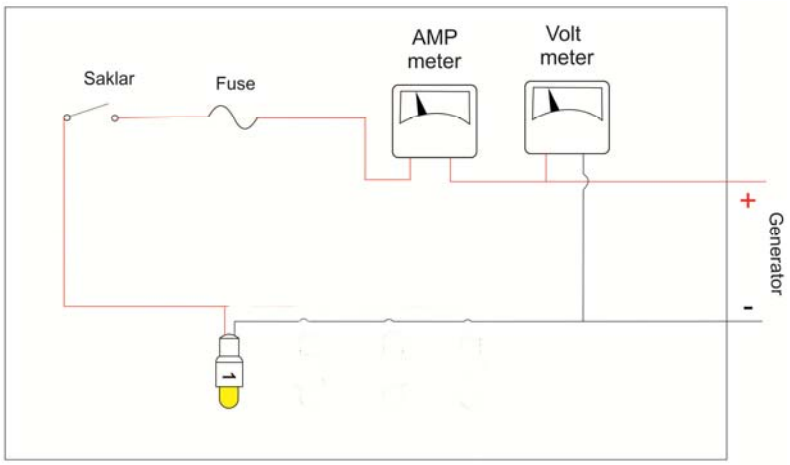
Pada tahap ini alat-alat yang akan digunakan dipersiapkan dan diperiksa apakah berfungsi dengan baik.

1. Rangkaian semua instalasi pembangkit.
2. Cek kondisi turbin agar berfungsi dengan baik
3. Periksa kondisi baut dan mur. Bila perlu lakukan pengencangan pada baut dan mur.
4. Persiapkan dan periksa Ampere meter, Voltmeter, dan tachometer.

- **Tahap pengambilan data pengujian**

1. Hidupkan pompa untuk mengisi fluida ke tabung penampungan
2. Buka saluran pipa dari tabung penampungan
3. Tunggu sampai kondisi stabil dan aliran konstan
4. Ukur putaran turbin dan generator kemudian dicatat.
5. Ukur tegangan dan kuat arus yang keluar dari generator dengan volt meter dan ampere meter kemudian dicatat.
6. Ulangi prosedur di atas secara berkali – kali dengan pembukaan katup yang berbeda – beda.

- Rangkaian pengujian dengan menggunakan lampu DC



Gambar 6.9 Rangkaian pengujian dengan menggunakan lampu DC

Pengujian tanpa beban

Pengujian tanpa beban bertujuan untuk melihat pengaruh variasi pembukaan katup terhadap kecepatan putaran turbin pada saat turbin belum dibebani. Data-data yang dihasilkan dari pengujian tanpa beban adalah sebagai berikut:

No	Pembukaan katup	n_{turbin} (RPM)	$n_{generator}$ (RPM)	V (Volt)
1	30°	84,2	1030	12
2	33°	93,7	1081	12,5
3	35°	117,7	1362	14

Pengujian Dengan Beban

Pengujian dengan beban bertujuan untuk mengetahui arus yang dihasilkan generator dan melihat pengaruhnya terhadap tegangan.

No	Sudut Turbin	n_{turbin} (RPM)	$n_{generator}$ (RPM)	V (Volt)	I (Ampere)
1	30°	58,8	704,3	4	0,27
2	33°	60,7	731,2	4,5	0,28
3	35°	68,4	825,4	6	0,33

No	Sudut Turbin	n_{turbin} (RPM)	$n_{generator}$ (RPM)	V (Volt)	I (Ampere)
1	30°	73,4	884,2	8	0,40
2	33°	74,7	900,1	10	0,46
3	35°	82.2	983,3	11,5	0,49

No	Sudut Turbin	n_{turbin} (RPM)	$n_{generator}$ (RPM)	V (Volt)	I (Ampere)
1	30°	66,2	797,6	5	0,28
2	33°	67,1	809,8	6	0,32
3	35°	74,1	897,3	8	0,4

Dari tabel hasil pengujian tersebut didapatkan bahwa besarnya pembukaan katup mempengaruhi daya turbin yang dihasilkan dan daya generator yang dihasilkan.

BAB VII

KESIMPULAN

Untuk menunjang kebijaksanaan Pemerintah dalam hal diversifikasi energi maka perlu dicari sumber energi alternatif selain minyak bumi, batu bara atau gas alam. Sumber energi alternatif diutamakan adalah energi yang dapat diperbaharui (renewable energi) atau sumber energy yang tak akan pernah habis. Di indonesia pemanfaatan sumber energi yang diperbaharui sudah banyak dikenal seperti biogas untuk bahan bakar kompor memasak, minyak tumbuh-tumbuhan untuk bahan bakar Diesel, energi air dan angin untuk pembangkit listrik, sekam padi sebagai bahan bakar kompor, pemanfaatan energi surya dan lain-lain. Salah satu sumber energy yang belum tergali adalah sumber energy dari laut. Ada beberapa jenis sumber energy dari laut yang dapat dimanfaatkan antara lain energy pasang surut, energy gelombang dan energy thermal. OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION (OTEC) merupakan sistem pemanfaatan energi laut yang cukup potensial dikembangkan di Indonesia.

Pemanfaatan OTEC pada penelitian ini menggunakan siklus tertutup berdasarkan siklus Rankine yang dikembangkan menjadi SIKLUS RANKINE ORGANIK.

Fluida kerja pada siklus Rankine Organik menggunakan Freon R-22. Penggunaan R-22 tersebut dengan pertimbangan penyesuaian dengan kondisi thermal air laut, dimana perbedaan temperatur di permukaan dan temperatur di kedalaman mencapai 24°C. Pada perbedaan temperatur tersebut terjadi perubahan fasa antara kondensor dan evaporator.

Untuk optimasi siklus digunakan perangkat lunak Cycle Tempo. Dengan perangkat lunak tersebut kondisi pada setiap titik atau peralatan dapat dioptimasi sehingga dihasilkan pembangkit listrik dengan kinerja yang optimal.

Pembangkit listrik dengan prinsip OTEC dirancang untuk menghasilkan daya 50 Watt, dengan peralatan-peralatan sebagai berikut:

- Pompa
- Kondensor

- Evaporator
- Turbin.

Pompa dan Turbin menggunakan barang yang tersedia di pasaran sedangkan evaporator dan kondensor dibuat.

Evaporator dan kondensor merupakan alat penukar kalor dengan jenis pipa bersirip. Pipa dengan menggunakan pipa tembaga dengan diameter 1/8 inch dan diberi sirip dari bahan aluminium. Penukar kalor ini cukup efektif terbukti efektifitas penukar kalor untuk kondensor dan evaporator.

Dari hasil pengujian di dapatkan bahwa peralatan yang dibuat memenuhi harapan dapat menghasilkan daya minimum 65 Watt.

Karena pembangkit listrik yang dibangun menggunakan pemanasan pada evaporator dan pendinginan pada kondensor secara manual, maka perlu dilakukan pengembangan yaitu pengkondisian thermal pada bagian kondensor dan evaporator menyerupai kondisi air laut. Hal ini akan dilakukan pada tahun ke II.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kristyadi T, Sigit Purwanto, Wibowo S, *Study dan Perancangan Pembangkit Listrik dengan Prinsip OTEC*, Laporan Penelitian ITENAS, 2009.
2. Avery W.H. and C. Wu. 1994. *Renewable Energy from the Ocean*: A guide to OTEC, Oxford U. Press, p.446.
3. Cohen R 1982. *energy from the ocean*, philosophical transactions of the royal Society of London; Series A: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 307, No 1499, p. 405-437.
4. Vega, L. and D.E. Evans. 1994. *Operation of small Open Cycle OTEC Experimental Facility*, proceesdings of oceanology, international 94, Vol. 5, Brighton, united kingdom.
5. Daniel, T.H. 1999. *A brief History of OTEC research at NELHA*, Natural Energy Laboratory of Hawai Authority.
6. Vega, L.A. 2000. *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*, Energy, Resources, and technology Diwision, State of hawaii, Departement of Business, Economic Development, & tourism (DBEDT).
7. Fraas, A.P., *Heat Exchanger Design*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1989. El-Wakil, M.M., *Powerplant Technology*, McGraw-Hill Book, Inc., New York, 1984.
8. Gerhart, M.P., Gross, J.R., dan Hochstein, I.J., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Company, CA, 1985.
9. Incropera, F.P., dan De Witt, D.P., *Introduction to Heat Transfer*, 4th edition, John Wiley & Sons, New York, 2002.
10. Kays, W.M., dan London, A.L., *Compact Heat Exchanger*, 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1964.
11. Moran, J.M., dan Shapiro, N.H., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th edition, John Wiley & Sons, Danvers, 2000.

12. Saut M. lubis, Catatan kuliah *Energi Non konvensional dari Laut*. OS 3239. Program studi Oseanografi ITB.

13. William Wolansky & Arthur Akers, *Modern Hydraulics*, John Wiley & Sons, 1990

14. Sularso, Pompa dan Kompresor,Penerbit Erlangga, 2000,

15. www.nodc.noaa.gov