UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI LITERATUR SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK *TENAGA OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION*

SKRIPSI

EKO WAHYU TANOTO
04 05 03 032X

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2009

UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI LITERATUR SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK *TENAGA OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION*

SKRIPSI

Diajukan untuk melengkapi
sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik

EKO WAHYU TANOTO
04 05 03 032X

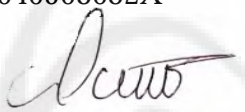
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,

dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk

telah saya nyatakan dengan benar.

Nama	: Eko Wahyu Tanoto
NPM	: 040503032X
Tanda Tangan	: 
Tanggal	: 29 Desember 2009

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama	: Eko Wahyu Tanoto
NPM	: 040503032X
Program Studi	: Teknik Elektro
Judul Skripsi	: Studi Literatur Sistem Pembangkit Tenaga Ocean Thermal Energy Conversion

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Ir. Rinaldy Dalimi, M.Sc.,Ph.D (.....)

Penguji : Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo, M.Sc (.....)

Penguji : Ir. Agus R. Utomo, M.T (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Desember 2009

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji bagi Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini.

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

Prof. Ir. Rinaldy Dalimi, M.Sc., Ph.D

Selaku dosen pembimbing yang telah mencurahkan banyak waktunya untuk memberikan pengarahan, masukan, pengkoreksian, kritikan yang membangun, serta bimbingan selama masa penulisan hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.

Tak luput pula penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua penulis yang terus memberikan dukungan dan doanya hingga terselesaikannya skripsi ini.

Saya juga mengucapkan terima kasih kepada Meristika Yuliana Dewi yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya makalah seminar ini.

Depok, Desember 2009

Penulis

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Eko Wahyu Tanoto
NPM	: 040503032X
Program Studi	: Teknik Elektro
Departemen	: Teknik Elektro
Fakultas	: Teknik
Jenis Karya	: Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

" Studi literatur Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Ocean Thermal Energy Conversion*"

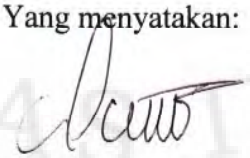
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/ formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal: 29 Desember 2009

Yang menyatakan:



(Eko Wahyu Tanoto)

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

ABSTRAK

Nama : Eko Wahyu Tanoto
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Studi Literatur Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Ocean Thermal Energy Conversion*

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) merupakan suatu cara untuk membangkitkan energi listrik dengan menggunakan perbedaan temperatur air laut di permukaan dengan temperatur air laut dalam. Keistimewaan utama OTEC adalah sebagai sumber energi terbaharukan dengan dampak minimum terhadap lingkungan dan tersedia dalam kapasitas daya yang besar.

Skripsi ini menjelaskan tentang tiga teknologi OTEC yang meliputi *closed-cycle*, *open-cycle*, dan *hybrid OTEC*. Komponen utama sistem OTEC yang meliputi *plant OTEC*, *heat exchanger* (peralatan penukar panas), pemilihan cairan kerja, serta installasi sistem saluran dan CWP (*cold water pipe*) akan menjadi penjelasan utama dalam makalah ini. Optimasi sistem pembangkit untuk memperoleh daya keluaran yang optimal pada sistem OTEC akan dijelaskan di bagian akhir makalah ini.

Kata kunci:
OTEC, energi terbaharukan, sistem lingkar tertutup, sistem lingkar terbuka

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

ABSTRACT

Name : Eko Wahyu Tanoto
Study program : Electrical Engineering
Title : Literature Study for System Ocean Thermal Energy Conversion Power Plant

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) is a way to generate electricity by the temperature difference of seawater from the upper surface to different depths. The main specialty of OTEC are a source of renewable energy with minimum impact to the environment and available in large power capacity.

This thesis describes three type of the OTEC technology, including closed-cycle, open-cycle, and hybrid OTEC. The main components of the OTEC system include OTEC plant, heat exchanger equpments, selection of working fluids, and installation channel and CWP (cold water pipe) system will be the primary explanation in this paper. Power system optimization to obtain optimal power output of the OTEC systems will be explained at the end of this paper.

Keywords:
OTEC, ocean thermal energy conversion, renewable energy, close-cycle, open cycle

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

DAFTAR ISI

Pernyataan Orisinalitas ii
Pengesahan iii
Ucapan Terima Kasih iv
Pernyataan Persetujuan Publikasi v
Abstrak vi
Abstract vii
Daftar Isi viii
Daftar Gambar x
Daftar Tabel xi
BAB 1 PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Tujuan 2
1.3 Pembatasan Masalah 2
1.4 Metode Penelitian 2
1.5 Sistematika Penulisan 2
BAB 2 DASAR TEORI
2.1 Sejarah Perkembangan OTEC 4
2.2 Teknologi OTEC 6
2.2.1 Closed-Cycle OTEC 7
2.2.1.1 Rankine Cycle 8
2.2.1.2 Kalina Cycle 11
2.2.1.2 Uehara Cycle 11
2.2.2 Open-Cycle OTEC 13
2.2.3 Hybrid OTEC 14
2.3 Sumber Energi OTEC 15
2.4 Dampak OTEC Terhadap Lingkungan 16
2.4.1 Teknologi OTEC dan Permasalahan Lingkungan 17
2.4.2 Teknologi OTEC dan Penghematan Energi 18
2.4.3 Teknologi OTEC dan Masalah Air 18
BAB 3 DESAIN SISTEM OTEC

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

3.1 Komponen Utama Sistem OTEC 20
3.2 Sistem Pembangkit OTEC 21
3.3 Peralatan Penukar Panas 22
3.3.1 Pemilihan Tipe Penukar Panas 23
3.3.2 Desain Penukar Panas 27
3.3.3 Dimensi Penukar Panas 29
3.4 Pemilihan Cairan Kerja 31
3.5 Saluran (Pipa) Air 35
3.5.1 Installasi CWP untuk OTEC 38
3.5.2 Beban Statis 39
3.5.3 Beban Dinamis 42
3.6 Optimasi OTEC 45
3.6.1 Daya Keluaran 45
3.6.2 Ketergantungan Daya pada Aliran 45
3.6.3 Daya Memompa Air 46
3.6.4 Daya Memompa Ammonia 46
3.6.5 Keluaran Daya Bersih OTEC 47
BAB 4 PEMBAHASAN
4.1 Analisis dann Siklus Air 49
4.2 Analisis dan Siklus Ammonia 51
4.3 Hybrid OTEC 53
4.3 Hybrid Uehara OTEC 55
BAB 5 KESIMPULAN
DAFTAR REFERENSI

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Distribusi Temperatur Air Laut di Daerah Tropis 6

Gambar 2.2 Diagram lingkar-tertutup plantship OTEC 7

Gambar 2.3 Diagram Aliran Ammonia di dalam Mesin Kalor pada Sistem OTEC Lingkar Tertutup 8

Gambar 2.4 Siklus Rankine 9

Gambar 2.5 Proses Siklus Rankine 10

Gambar 2.6 Uehara Cycle 12

Gambar 2.7 Diagram Lingkar Terbuka Sistem Pembangkit OTEC 13

Gambar 2.8 Hybrid –cycle OTEC 15

Gambar 2.9 Peta Perbedaan Temperatur Air 16

Gambar 2.10 Sistem OTEC sebagai penghasil fresh water 19

Gambar 3.1 Subsistem dan Komponen Utama Sistem OTEC 20

Gambar 3.2 Shell & Tube Heat Exchanger 24

Gambar 3.3 Plate Heat Exchanger 25

Gambar 3.4 Folded Tube Heat Exchanger 26

Gambar 3.5 Proses Perpindahan Panas di dalam Heat Exchanger OTEC 28

Gambar 3.6 Lintasan Aliran Fluida di dalam Piringan Heat Exchanger 31

Gambar 4.1 Konstruksi Sistem Pembangkit OTEC Terapung 49

Gambar 4.2 Aliran Ammonia didalam Evaporator 51

Gambar 4.3 Komponen installasi sistem OTEC 52

Gambar 4.4 Sistem Hybrid OTEC 54

Gambar 4.5 sistem Hybrid Uehara OTEC 55

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Ringkasan Demonstrasi Plant OTEC Di Dunia 5

Tabel 3.1 Property of Heat Engine Working Fluid of Interst for OTEC 32

Tabel 3.2 Effect of CWP diameter on net OTEC power cost 38

Tabel 3.3 Beban Jatuh (*Collapse Load*) pada CWP 43

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Matahari memancarkan energi panas ke permukaan bumi sekitar 170.000 TW setiap hari. Sebagian besar energi yang dipancarkan tersebut diserap oleh lautan, hal ini disebabkan karena 71 % luas permukaan bumi ditutupi oleh lautan. Di daerah tropis, temperatur air permukaan (0 – 50 m di bawah permukaan lautan) dapat mencapai lebih dari 25°C. Pemanasan air permukaan di daerah tropis akan terus mengalir ke arah kutub dan akan melelehkan es yang ada di kutub utara maupun di kutub selatan. Air dingin yang dihasilkan dari lelehan es di kutub tersebut akan kembali mengalir ke arah khatulistiwa. Hal inilah yang menyebabkan temperatur air pada kedalaman lebih dari 1000 m dapat mencapai 4-5°C .

Kondisi ini akan membuat struktur lautan seperti mempunyai reservoir panas di permukaan lautan dan reservoir dingin di dasar lautan . Pada lautan tropis yang memiliki kedalaman lebih dari 1000 m perbedaan temperatur antara kedua reservoir tersebut dapat mencapai 22 sampai 25 °C (40 sampai 45 °F). Perubahan musim dan cuaca akan menyebabkan perbedaan temperatur reservoir berubah beberapa derajat Fahrenheit. Perubahan siang dan malam akan menyebabkan perbedaan temperatur berubah sekitar satu derajat Fahrenheit. Walaupun demikian sepanjang tahun, perbedaan temperatur tersebut akan mempunyai nilai yang tetap.

Salah satu teknologi yang dapat mengkonversi energi *thermal* ini adalah OTEC. *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC) adalah teknologi untuk mengkonversi energi panas yang ada pada lautan akibat radiasi sinar matahari menjadi tenaga listrik. OTEC menggunakan perbedaan temperatur air laut di bagian permukaan dan di bagian dasar laut untuk mengoperasikan mesin kalor sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Secara teori, pembangkit OTEC dapat dioperasikan secara kontinu di lautan tropis tanpa terpengaruh secara signifikan oleh lingkungan dan dapat menghasilkan daya bersih sekitar 0.19 MWe/km^2 . Hal ini berarti bahwa OTEC dapat mengkonversi 0.07% dari energi matahari yang diserap menjadi listrik [3].

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Pembangunan OTEC memerlukan biaya yang cukup mahal, namun OTEC dapat menghasilkan tenaga listrik dalam bilangan gigawatt, ramah lingkungan, dan yang paling penting adalah setelah beroperasi tidak memerlukan bahan bakar lagi. Selain itu, sisa proses OTEC yang berupa air laut dingin dapat digunakan untuk mengoperasikan *Air Conditioner* (AC) sehingga dapat mengurangi konsumsi listrik yang dibutuhkan.

1.2. Tujuan

Tujuan dari penulisan karya skripsi ini adalah untuk menjelaskan prinsip kerja pembangkit OTEC, membandingkan konsep desain yang ada pada pembangkit OTEC dan menjelaskan tentang perkembangan teknologi OTEC yang berkembang sampai saat ini.

1.3. Pembatasan Masalah

Pembahasan pada karya skripsi ini ditekankan pada konsep desain dan teknologi yang dibutuhkan oleh sistem Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC).

1.4. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah :

1. Tinjauan pustaka, yaitu dengan melakukan studi literatur dari buku-buku pustaka ataupun makalah yang berkaitan dengan masalah yang dibahas
2. Diskusi, dengan melakukan pembahasan kepada pembimbing maupun pihak-pihak yang terkait,
3. Pengambilan bahan dari internet sebagai referensi.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada skripsi ini adalah :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan tentang perkembangan teknologi *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC). Bab ini terdiri dari penjelasan-penjelasan tentang sistem dan teknologi OTEC, lokasi sumber energi OTEC, serta dampak teknologi OTEC terhadap permasalahan lingkungan.

BAB 3 DESAIN SISTEM OTEC

Bab ini menjelaskan secara mendetail tentang komponen utama dalam sistem OTEC.

BAB 4 PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan sistem operasi pada pembangkit OTEC.

BAB 5 KESIMPULAN

Pada bab ini berisikan kesimpulan mengenai permasalahan yang dibahas berdasarkan serangkaian penelitian yang dilakukan.

BAB 2
DASAR TEORI

2.1 Sejarah Perkembangan OTEC

Ahli fisika Perancis Jaques d'Arsonval pada tahun 1881 pertama kali mengemukakan konsep pembangkit *ocean thermal energy conversion* (OTEC). Salah seorang muridnya, yaitu Georges Claude, pada tahun 1930 membuat pusat pembangkit OTEC di Teluk Matanzas dekat Kuba. Pusat pembangkit listrik dengan daya 22 KW tersebut hanya dapat bekerja selama dua minggu karena dihancurkan oleh angin topan sehingga pipa untuk memasukan air ke sistem OTEC rusak total. Proyek itu kemudian dihentikan. Pada tahun 1950-an, perusahaan Perancis yakni Societe d'Energie des Mers melanjutkan proyek yang telah dihentikan itu dengan merancang sebuah pusat pembangkit listrik di pantai dekat Abidjan, ibukota Pantai Gading (Ivory Coast). Pusat pembangkit listrik ini tidak jadi dibangun karena harga energi listrik pada saat itu masih rendah sekali, dan pasar telah dibanjiri oleh pasokan bahan bakar fosil, serta adanya prediksi energi nuklir yang akan menjadi "energi murah".

Kemelut energi yang terjadi pada tahun 1973 dan terjadinya embargo minyak yang terjadi di Timur Tengah telah memberikan suatu dorongan yang kuat terhadap pengembangan teknologi OTEC. Dan pada akhirnya seorang ahli fisika yang bernama Clarence Zenner menganjurkan untuk melanjutkan kembali proyek OTEC. Sejak itu perusahaan besar di Jepang, Amerika Serikat, dan beberapa negara di Eropa mulai melanjutkan proyek-proyek OTEC. Di Amerika Serikat misalnya, perusahaan *Lockheed*, *Westinghouse* dan *General Electric* dengan giat melakukan pengembangan prinsip OTEC. Selain itu, perusahaan *Union Carbide, Foster Wheeler, Rockwell* dan *Alva-Laval* juga giat mengembangkan *heat exchanger* untuk proyek OTEC. Kemudian juga muncul lembaga-lembaga penelitian seperti *Batelle* dan *MITRE* yang memberi dukungan besar terhadap pengembangan OTEC.

Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority (NELHA), sebuah laboratorium yang dimiliki oleh badan Negara Bagian Hawaii, mengoperasikan fasilitas OTEC di Keahole Point di pantai barat pulau Hawaii. NELHA didirikan

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

pada tahun 1974 ketika lembaga legislatif negara tersebut mendirikan Laboratorium Energi Alam Hawaii (NELH, *Natural Energy Laboratory of Hawaii*) dan menyisihkan 321 acres tanah untuk penelitian dan pengembangan sumber energi alam, terutama OTEC. Awal penelitian dimulai pada tahun 1976 sebelum dibangun fasilitas onshore, menggunakan sebuah pelampung lepas pantai (*bouy*) yang digunakan studi biofouling untuk calon elemen *heat exchanger* siklus tertutup OTEC.

Mini-OTEC adalah pembangkit pembangkit listrik OTEC terapung pertama di dunia dengan daya sebesar 50 KW beroperasi di lepas pantai kepulauan Hawaii pada tahun 1980-an. Proyek ini merupakan inisiatif perusahaan *Lockheed* yang bekerjasama dengan NELHA. Studi-studi memperkirakan dalam jangka menengah maupun jangka panjang pembangkit listrik OTEC memiliki prospek yang cukup baik. Karenanya direncanakan untuk membuat suatu proyek percobaan di Eropa untuk membangun sebuah pembangkit listrik OTEC dengan daya hingga 10 MW. Hal itu juga didukung oleh pemerintah Perancis melalui Centre National pour l'Exploitation des Oceans (CNEXO). Ringkasan tentang demonstrasi plant OTEC di dunia ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1

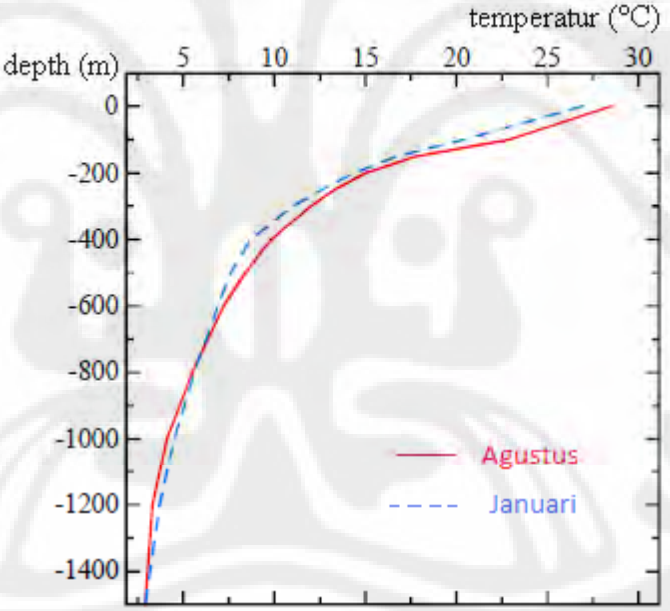
Ringkasan Demonstrasi Plant OTEC Di Dunia [1]

S. No	Agency	Year, Location	Power Rating (kW)		Cycle	Type of plant
			Gross	Net		
1	Claude (France)	1930, Cuba	22	-	Open	Shore based
2	Mini OTEC (US)	1979, Hawaii	53	18	Closed (Rankine)	Floating
3	OTEC-1 (US)	1980, Hawaii	1 Mwe	-	Closed (Rankine)	Floating
4	Toshiba & TEPC (Japan)	1982, Nauru	120	31.5	Closed (Rankine)	Shore based
5	NELHA (US)	1992, Hawaii	210	100	Open	Shore based
6	Saga University (Japan)	1984, Saga	75	-	Closed (Rankine)	Lab model
7	Saga University (Japan)	1995, Saga	9	-	Closed (Uehara)	Lab model
8	NELHA (US)	1992 - 98, Hawaii	50	-	Closed (Rankine)	Floating
9	NIOT, India	2000, Tuticorin	1000	-	Closed (Rankine)	Floating

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

2.2 Teknologi OTEC

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) adalah suatu teknik membangkitkan energi listrik dengan menggunakan perbedaan temperatur antara temperatur air laut di permukaan dengan temperatur laut pada kedalaman tertentu (sekitar 1000 m). Di lautan, temperatur air laut akan berbanding terbalik dengan kedalamannya, temperatur akan menurun dengan peningkatan kedalaman laut (Gambar 2.1). Dari gambar tersebut juga terlihat bahwa temperatur laut tidak terlalu berbeda antara bulan Agustus (musim kemarau) dan Januari (musim penghujan). Dengan demikian, sepanjang perbedaan temperatur diantara air laut permukaan dan air laut dalam lebih dari 20°C, sistem OTEC dapat membangkitkan energi listrik dengan optimal sepanjang tahun.



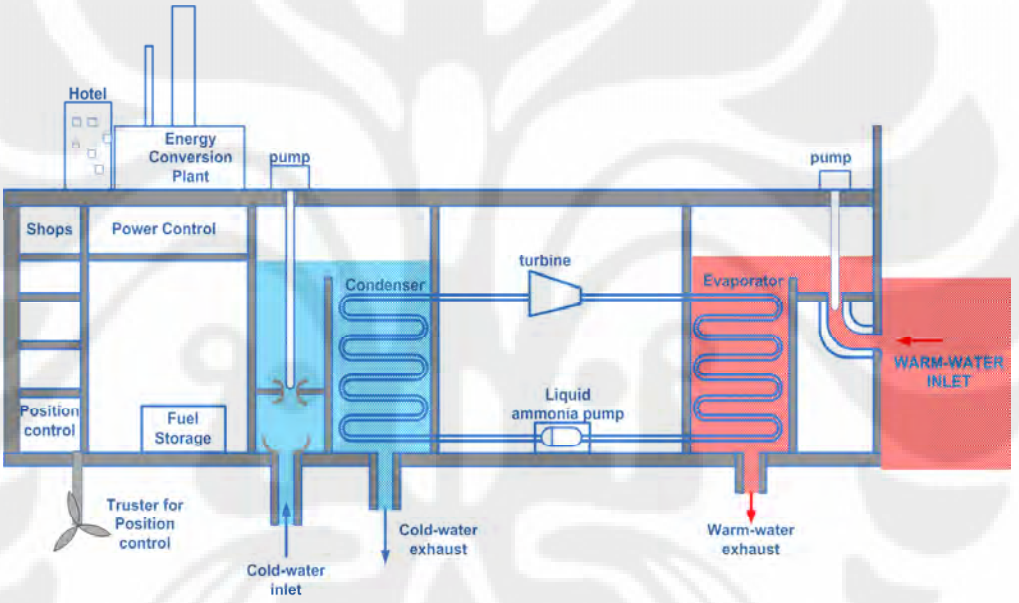
Gambar 2.1
Distribusi Temperatur Air Laut di Daerah Tropis [2]

Teknologi pada sistem OTEC dapat dibagi ke dalam 3 kategori, yaitu *Closed-Cycle*, *Open-Cycle* dan *Hybrid* OTEC. Pada *closed-cycle* OTEC dikenal tiga macam siklus yaitu siklus *Rankine*, siklus *Kalina*, dan siklus *Uehara*.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

2.2.1 *Closed-Cycle* OTEC

Pada sistem *closed-cycle* OTEC, cairan kerja yang digunakan akan dipompakan kembali ke evaporator setelah proses kondensasi, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2. Air dengan temperatur lebih dari 25°C yang berada di permukaan lautan dipompakan ke dalam evaporator yang akan digunakan untuk memanaskan cairan kerja (ammonia). Cairan ammonia akan mendidih dan menghasilkan uap pada tekanan sekitar 940 kPa (9.3 atm). Uap ammonia akan mengalir dan melewati turbin. Setelah melewati turbin, tekanan uap ammonia akan berkurang menjadi sekitar 620 kPa (6.1 atm).



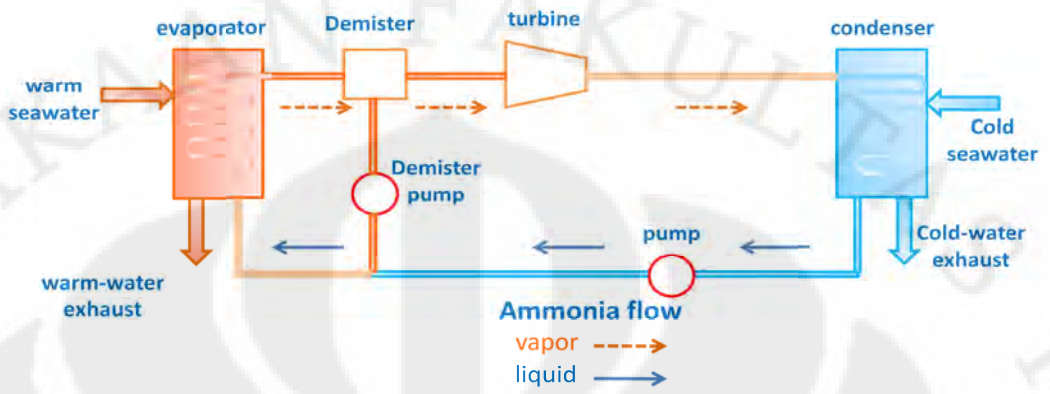
Gambar 2.2

Diagram Lingkar-Tertutup Sistem Pembangkit OTEC

Dengan perbedaan tekanan yang signifikan tersebut turbin akan berputar dan menghasilkan energi yang cukup untuk menggerakkan generator listrik. Uap ammonia setelah melewati turbin kemudian masuk kedalam kondensor yang direndam dengan menggunakan air bersuhu 5°C, yang mana air tersebut diambil pada kedalaman sekitar 1000 m. Ammonia kemudian mengalami kondensasi, kemudian cairan ammonia ini dipompakan kembali ke evaporator untuk melengkapi siklus ini. Siklus ini akan terus-menerus menghasilkan energi listrik sepanjang cairan ammonia terus mengalir dan air

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

panas beserta air dingin terus disuplai. Gambar 2.3 menggambarkan proses aliran ammonia di dalam mesin kalor pada sistem OTEC lingkar tertutup.



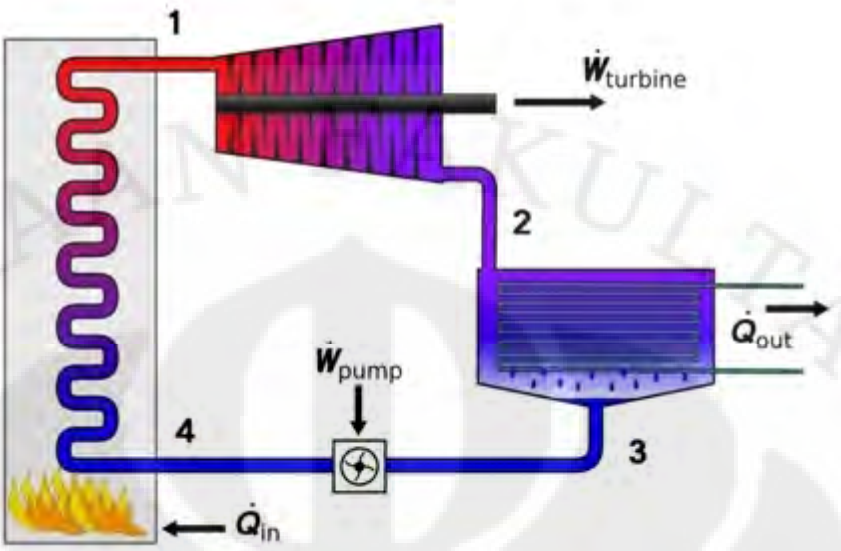
Gambar 2.3

Diagram Aliran Ammonia di dalam Mesin Kalor pada Sistem OTEC Lingkar Tertutup [3]

2.2.1.1 Rankine Cycle

Siklus Rankine merupakan suatu siklus termodinamik yang mengkonversi panas menjadi kerja. Pada siklus Rankine, cairan kerja yang digunakan adalah ammonia murni. Cairan kerja yang berada di dalam evaporator akan dipanaskan pada tekanan konstan, kemudian cairan yang dipanaskan akan menguap (proses 1). Uap ammonia yang memiliki temperatur dan tekanan cukup tinggi akan mempunyai cukup energi untuk memutar turbin uap (proses 2). Turbin dihubungkan dengan suatu generator listrik sehingga ketika turbin berputar, generator juga akan berputar. Generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Sisa uap kemudian akan memasuki kondensor dimana akan terjadi perpindahan kalor dari uap ammonia ke air dingin. Perpindahan kalor ini menyebabkan ammonia mengalami kondensasi (proses 3). Kondensasi (pengembunan) merupakan peristiwa perubahan wujud dari uap/gas menjadi cair. Cairan ammonia yang telah terkondensasi kemudian akan dipompakan kembali ke evaporator untuk menyelesaikan siklus (proses 4). Siklus tertutup Rankine ditunjukkan pada gambar 2.4.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

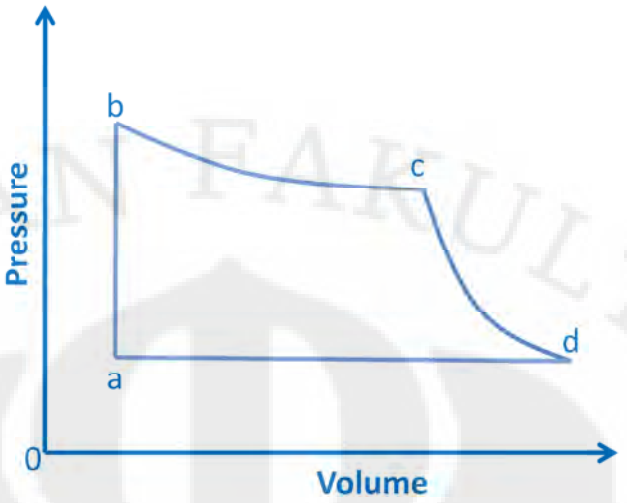


Gambar 2.4
Siklus Rankine [4]

Pada prinsipnya siklus Rankine terdiri dari empat proses, dimana proses tersebut terlihat seperti pada gambar 2.5.

1. Dimulai pada titik a, panas akan ditambahkan ke cairan kerja yang berada di dalam boiler sampai temperaturnya mencapai suatu titik didihnya pada tekanan yang ditunjukkan pada titik b. Pada gambar 2.5 terlihat bahwa pada proses ini tidak terjadi perubahan volume (*isokhorik*).
2. Pada proses ini tetap ditambahkan panas sehingga cairan mengalami penguapan pada temperatur konstan (*isothermik)*. Pada gambar 2.5 terlihat bahwa pada proses ini terjadi peningkatan volume ke titik c.
3. Tingginya tekanan uap yang memasuki turbin dan terjadi proses pemuaian secara adiabatic menyebabkan volume terus meningkat sampai ke titik d.
4. Rendahnya tekanan uap yang memasuki kondensor. Pada proses ini terjadi pemindahan panas pada tekanan konstan (*isobarik*) dan cairan kembali didinginkan sehingga uap mencair dan volumenya kembali ke titik semula (titik a).

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009



Gambar 2.5
Proses Sikus Rankine [8]

Kerja yang dilakukan oleh siklus Rankine ditunjukkan pada luasan yang dilingkupi oleh titik, abcda. Nilai kerja ini sama dengan $H_c - H_d$, dimana H menyatakan *enthalphy* cairan yang ditunjukkan di titik tersebut. Panas yang dipindahkan dalam proses adalah $H_c - H_a$. Karena efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan kerja yang dilakukan dengan panas yang dipindahkan, maka efisiensi dapat dirumuskan sebagai:

$$\text{efisiensi}(\ ) = \frac{H_c - H_d}{H_c - H_a} \qquad (2.1)\ [3]$$

Carnot menunjukkan bahwa jika siklus mesin kalor dilakukan agar kondisi keseimbangan terpelihara dalam proses, efisiensi mesin ditentukan oleh perbandingan temperatur cairan yang bekerja di dalam evaporator dan kondensor.

$$= \frac{T_E - T_C}{T_E} \qquad (2.2)\ [3]$$

Efisiensi maksimum mesin Carnot hanya dapat dicapai oleh siklus yang berada pada keseimbangan panas pada setiap tahapan proses, namun untuk menghasilkan daya harus terdapat perbedaan temperatur antara temperatur cairan kerja yang berada di evaporator dan temperatur sumber air panas, dan antara temperatur cairan kerja yang berada di kondensor dengan temperatur air dingin. Laju perpindahan kalor akan meningkat jika perbedaan temperaturnya meningkat akan tetapi perbedaan tekanan antara

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

cairan kerja yang terdapat di evaporator dan cairan kerja yang terdapat di kondensor menurun. Hal ini akan menyebabkan produksi daya maksimum sistem akan optimal.

2.2.1.2 Kalina Cycle

Siklus Kalina merupakan siklus termodinamika yang mengkonversi energi panas menjadi energi mekanik, yang biasanya banyak digunakan untuk mengoptimasi proses dengan temperatur yang rendah. Siklus kalina sedikitnya menggunakan 2 komponen cairan kerja yang berbeda (biasanya air dan ammonia) dan perbandingan diantara kedua komponen tersebut bervariasi di setiap bagian sistem untuk meningkatkan *reversibilitas* termodinamik, serta meningkatkan efisiensi secara keseluruhan.

2.2.1.3 Uehara Cycle

Berbeda dengan siklus Rankine yang menggunakan cairan kerja berupa ammonia murni, siklus Uehara menggunakan campuran air dan ammonia sebagai cairan kerja. Siklus Uehara memiliki efisiensi panas 50%-70% lebih tinggi daripada tipe teknologi OTEC yang lain. Hal ini berarti bahwa dengan kapasitas output yang sama, pembangkit OTEC yang menggunakan siklus Uehara akan memiliki ukuran volume untuk menampung air permukaan dan air dingin sekitar 70% lebih kecil [5].

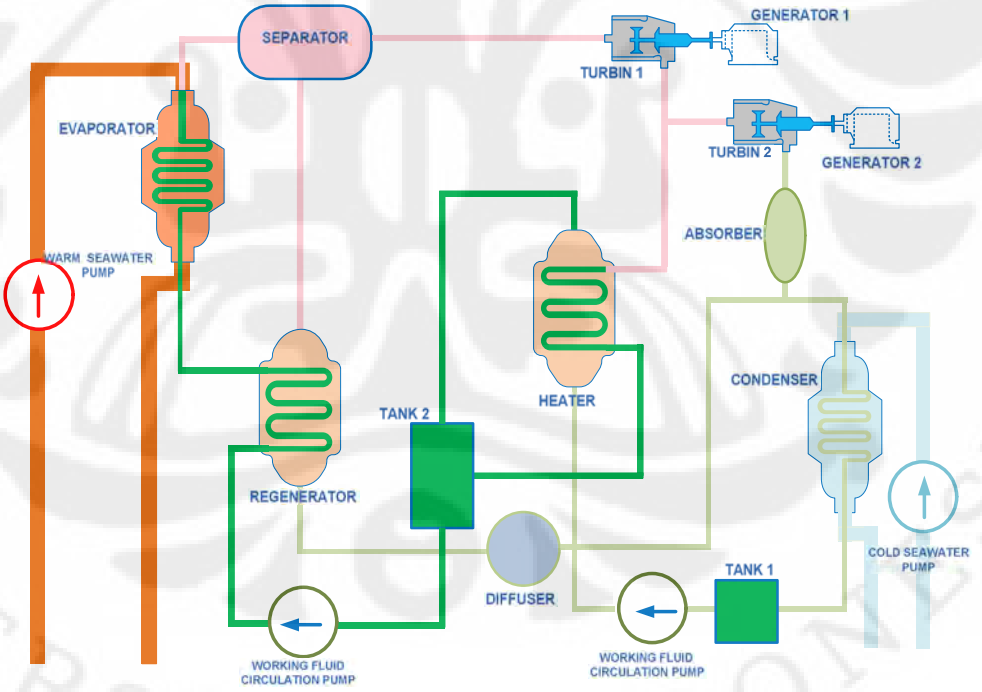
Prinsip kerja dari siklus Uehara adalah sebagai berikut (Gambar 2.6):

1. Cairan kerja yang terdiri dari air dan ammonia pertama kali akan dimasukkan ke dalam pompa cairan kerja yang kemudian akan dipompakan ke dalam *re-generator* dan lebih lanjut akan masuk ke dalam evaporator.
2. Pompa air laut hangat akan mengambil air laut permukaan yang akan dipompakan ke dalam evaporator, dimana sebagian dari cairan kerja akan terpanaskan hingga menguap, uap air dan ammonia akan tercampur. Uap campuran air-ammonia akan masuk ke dalam separator dan mengalami saturasi sehingga uap campuran ammonia akan terpisah menjadi dua yaitu air ammonia dan uap panas

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

ammonia-air. Uap panas ammonia-air akan masuk ke turbin 1 dan menggerakkan turbin. Sebagian uap ammonia-air yang keluar dari turbin 1 akan diekstrak ke dalam *heater* dan sisanya akan masuk ke dalam turbin 2 untuk menggerakkan generator.

3. Sementara itu, air ammonia yang dipisahkan oleh separator akan melewati re-generator dan kemudian masuk ke dalam *absorber* melalui katup pengurang tekanan. Di dalam *absorber* air ammonia menyerap uap campuran yang keluar dari turbin 2. Beberapa bagian uap campuran yang tidak dapat diserap *absorber* akan didinginkan dan akan terkondensasi oleh air laut dingin dan akan kembali ke wujud cairan. Cairan kerja akan dipompa ke dalam heater dan akan dikembalikan ke dalam evaporator.
4. Siklus dari proses ini menjamin pembangkitan energi oleh air laut secara permanen.



Gambar 2.6
Uehara Cycle [5]

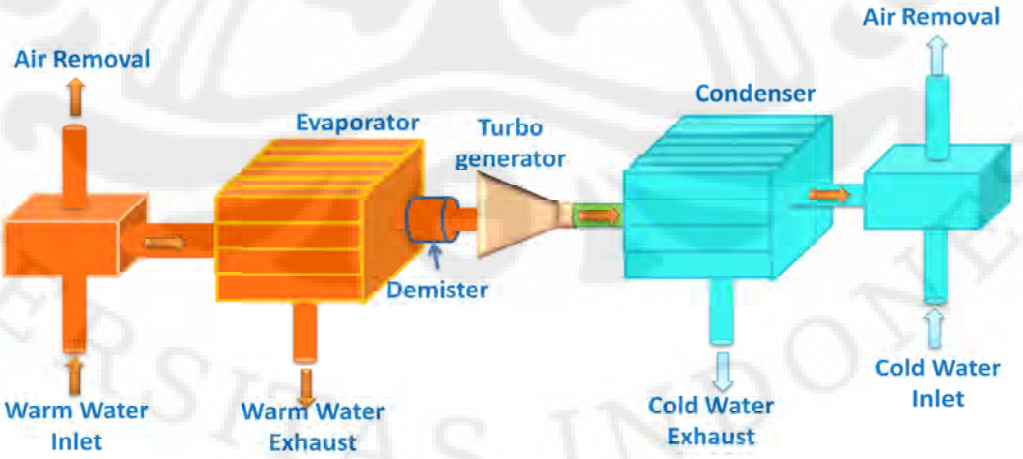
Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Secara teori, siklus Rankine yang dikombinasikan dengan sistem Uehara dapat membangkitkan daya listrik yang lebih ekonomis bila dibandingkan dengan sistem pembangkit seperti pembangkit listrik tenaga termal angin, matahari, maupun pembangkit listrik tenaga termal yang lain.[4]

2.2.2 *Open-Cycle*/ "Claude" OTEC

Sistem *open-cycle* OTEC berbeda dengan sistem *closed-cycle* yang menggunakan ammonia atau cairan kerja khusus yang mempunyai titik didih rendah. Sistem *open-cycle* menggunakan air laut hangat (*warm-water*) sebagai cairan kerja. Pada sistem *open-cycle* OTEC, cairan kerja dibuang setelah digunakan, seperti ditunjukkan pada gambar 2.7.

Air laut panas dipompa ke dalam suatu ruang/*chamber*,dimana tekanannya telah diturunkan dengan menggunakan pompa vakum, sehingga air dapat mendidih pada suhu yang cukup rendah. Uap air panas yang mempunyai tekanan rendah akan melewati suatu turbin yang kemudian dikondensasikan dengan menggunakan air dingin di dalam suatu ruangan kemudian dibuang ke lautan. Dalam proses pengkondensasian dengan kontak langsung air dingin, uap didinginkan didalam kondensor dengan menggunakan air laut dingin, seperti terlihat pada gambar 2.7. Dalam hal ini, uap yang telah dikondensasikan dapat dijadikan sebagai sumber air segar.[3]



Gambar 2.7
Diagram Lingkar Terbuka Sistem Pembangkit OTEC [3]

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Perbedaan kedua antara sistem *closed-cycle* dan *open-cycle* OTEC terletak pada ukuran saluran dan turbin untuk volume cairan kerja yang sama. Pada *closed-cycle* yang menggunakan ammonia, tekanan untuk turbin sekitar 860 kPa, sedangkan pada *Claude open-cycle* tekanan uap air hanya sekitar 3,1 kPa (pada temperatur 25°C). Dengan melihat karakteristik termodinamik, kecepatan aliran, dan variabel desain, luas saluran yang dibutuhkan oleh *open-cycle* OTEC 100 kali lebih luas dibandingkan dengan sistem *closed-cycle* OTEC. Pada sistem *open-cycle* OTEC membutuhkan saluran berdiameter sekitar 15 m untuk menampung aliran uap air dari sebuah modul plant OTEC 10 MWe, sedangkan *closed-cycle* pada kapasitas modul yang sama hanya membutuhkan diameter 1,4 m untuk mengalirkan ammonia [14]. Sebuah konsep studi *open-cycle* OTEC 100 MWe yang dibuat oleh Westinghouse, membutuhkan turbin dengan diameter ujung 44 m, diameter pembangkit listrik 113 m, dan tinggi 98 m [3].

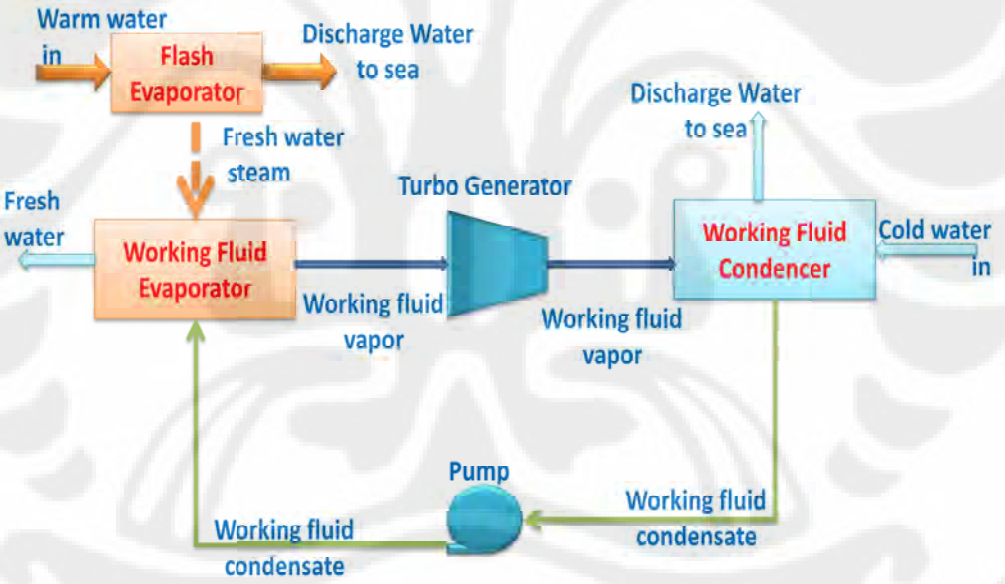
Perbedaan ketiga, dihilangkannya area permukaan logam pada *open-cycle* OTEC. Area permukaan logam yang sangat luas tersebut biasa dipakai pada sistem *closed-cycle* OTEC untuk menghantarkan panas air laut ke cairan kerja. Pada pembangkit listrik *closed-cycle* OTEC, per kilowatt daya listrik bersih membutuhkan area permukaan penukar panas/*heat exchanger* seluas 6,2 m^2 atau sekitar 60.000 m^2 untuk pembangkit berkapasitas 10 MWe. Tidak digunakannya area permukaan logam dan tekanan kapal dan pompa sistem ammonia menghasilkan penurunan yang besar dalam kompleksitas peralatan pemindah panas dibandingkan dengan *closed*-cycle. Kebutuhan akan *biofouling* juga dihilangkan. Karena koefisien perpindahan kalor lebih tinggi untuk *open-cycle* OTEC, aliran air yang dibutuhkan oleh sistem *open-cycle* juga lebih rendah. Walaupun demikian cairan kerja yang dibutuhkan oleh *open-cycle* lebih banyak daripada yang dibutuhkan oleh *closed-cycle* [3].

2.2.3 *Hybrid* OTEC

Hybrid OTEC merupakan satu-satunya teknologi OTEC yang belum diuji kehandalannya. *Hybrid-cycle* OTEC mengkombinasikan prinsip *open-*

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

cycle dan *closed-cycle* OTEC untuk mendapatkan efisiensi yang maksimum. *Hybrid-cycle* menggunakan air laut dan cairan kerja yang lain (biasanya didesain dengan menggunakan ammonia). Air segar pada awalnya diemburkan ke dalam uap, mirip seperti proses penguapan pada *open-cycle*, ini terjadi di dalam bejana vakum. Pada bejana yang sama ammonia diuapkan melalui *heat exchanger* dengan menggunakan air laut permukaan. Ammonia kemudian secara fisika bercampur dengan air laut hangat. Ammonia yang telah menguap kemudian dipisahkan dari uap/air kemudian menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Setelah melewati turbin uap ammonia dikondensasikan kembali dan dimasukkan kembali ke dalam *loop* siklus tertutup. Energi listrik yang dihasilkan dapat didistribusikan atau dapat digunakan untuk memproduksi methanol, hydrogen, ammonia, penyaringan logam, dll.[5]



Gambar 2.8
Hybrid –cycle OTEC

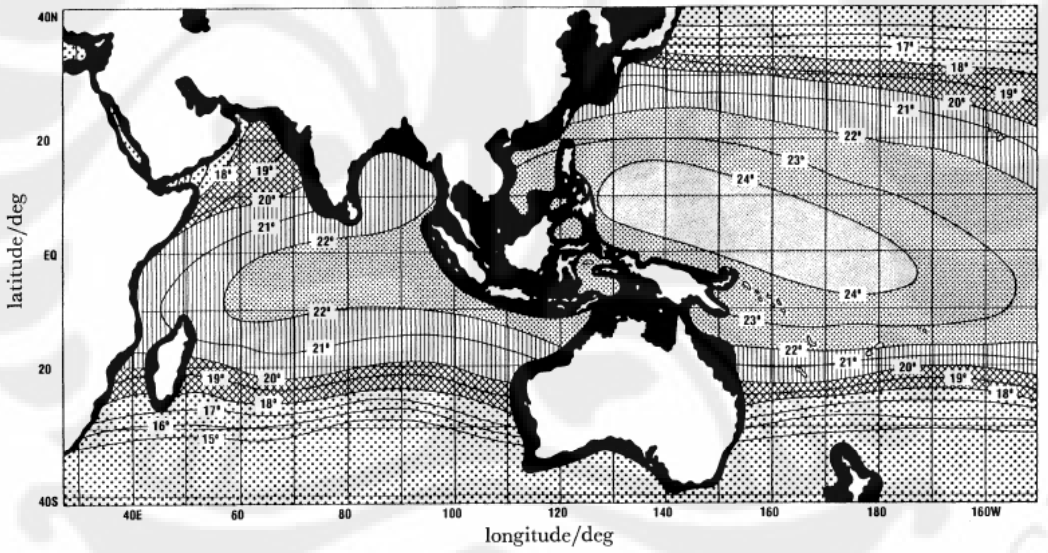
2.3 Sumber Energi OTEC

Proses OTEC menggunakan perbedaan temperatur air laut permukaan dengan air laut dalam untuk mengoperasikan mesin kalor yang kemudian akan digunakan untuk menghasilkan daya listrik. Perhitungan menunjukkan bahwa plant OTEC dapat dioperasikan secara kontinu di lautan tropis tanpa terpengaruh

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

secara signifikan oleh lingkungan dan dapat menghasilkan daya bersih sekitar 0.19 MWe/km^2 . Hal ini berarti bahwa OTEC dapat mengkonversi 0.07% dari energi matahari yang diserap menjadi listrik [18] .

Gambar 2.9 menunjukkan sebuah peta yang dibuat oleh Wolff untuk Departemen Energi Amerika. Pada gambar tersebut di tunjukkan perbedaan temperatur antara temperatur air di permukaan laut dengan temperatur pada kedalaman 1000 m. Lautan yang tepat untuk dibangun OTEC adalah lautan yang mempunyai rata-rata temperatur air permukaan setiap tahun sekitar 26.7°C sampai 29.4°C dan mempunyai temperatur air dingin sekitar 5°C (kedalaman laut sekitar 1000 m), atau lautan yang memiliki perbedaan temperatur sekitar 22°C. Pada peta tersebut terlihat bahwa di Indonesia mempunyai banyak wilayah yang berpotensi untuk di bangun pembangkit OTEC. Wilayah laut Indonesia yang memiliki potensi itu terdapat disepanjang pantai selatan jawa sampai nusa tenggara dengan perbedaan temperatur rata-rata 22°C.



Gambar 2.9

Peta Perbedaan Temperatur Air [3]

2.4 Dampak OTEC Terhadap Lingkungan

Sekarang ini dunia sedang menghadapi berbagai masalah serius, diantaranya masalah lingkungan, energi, populasi, bahan makanan dan masalah air bersih. Kelima masalah tersebut saling berkaitan satu sama lain. Penggunaan bahan bakar fosil seperti batubara, minyak, dan gas sekarang ini menjadi sumber

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

utama masalah lingkungan. Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan gas CO_2 dan NO_x di udara. Gas CO_2 dianggap sebagai penyebab pemanasan global. Pemanasan global menyebabkan memburuknya pelelehan gletser di Arctic yang akan berdampak pada meningkatnya level air laut.

Kerusakan hutan akan mempengaruhi kemampuan hutan sebagai cadangan air. Air hujan akan banyak mengalir ke sungai dan laut. Ketersedian air tanah akan semakin tipis dan akan menyebabkan kekurangan air di musim kemarau dan terjadi banjir di musim penghujan. Begitu pula dengan *phytoplankton* yang ada di laut, yang pasti akan menyebabkan menurunnya kehidupan laut seperti ikan, kerang, alga, dan rumput laut. Dengan kata lain, skala rantai makanan di bumi sekarang terancam oleh pemanasan global.

Hal tersebut menjadi tugas penting untuk memecahkan masalah lingkungan. Usaha untuk memecahkan masalah lingkungan sering terbentur dengan permasalahan pertumbuhan ekonomi. Namun dengan memanfaatkan teknologi OTEC ini, dimungkinkan untuk mengurangi penyebab pemanasan global sekaligus tetap melanjutkan pertumbuhan ekonomi secara simultan.

2.4.1 Teknologi OTEC dan Permasalahan Lingkungan

Permasalahan lingkungan secara langsung berpusat pada 3 persoalan berikut:

1. Pembangkit listrik OTEC membuang paling sedikit CO_2 bila dibandingkan dengan pembangkit listrik energi panas lain maupun dengan metode *solar baterai*. Pembangkit OTEC hanya mengeluarkan CO_2 sekitar 2,4% dari pembangkit listrik thermal yang beroperasi menggunakan LNG. Jika 10% sumber energi dunia diganti ke teknologi OTEC maka dapat mengurangi emisi CO_2 secara drastis.
2. Air laut dalam yang dipompa ke dalam pembangkit listrik OTEC sebetulnya kaya akan nutrisi. Nutrisi air laut ini dapat dikeluarkan setelah melewati sistem OTEC. Hal ini akan mengurangi kepadatan dari substansi karbon anorganik di dalam air laut permukaan.
3. Pengeluaran CO_2 di daratan dapat dikurangai dengan menyedotnya ke dalam air laut dalam. Hal ini berarti ada keuntungan ekonomi lain

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

dengan pembangunan pembangkit listrik OTEC, dimana Negara dapat menjual hak emisi CO_2 ke negara maju yang terkena kewajiban internasional untuk mengurangi emisi CO_2.

2.4.2 Teknologi OTEC dan Penghematan Energi

Berikut ini adalah berbagai analisis tentang sistem pembangkit OTEC dalam mendukung penyediaan sumber energi alternatif, yaitu:

1. Terdapat lebih dari 100 negara di dunia yang mempunyai tempat ideal untuk pembangkit OTEC. Dengan zona eksklusif yang dimiliki Jepang sendiri memungkinkan untuk membangkitkan 10^{14} kWh pembangkit listrik OTEC, yang mana sama dengan 8,6 milyar ton minyak . Jika 10% dari konsumsi energi dapat diganti oleh sumber OTEC maka masalah lingkungan akan terpecahkan di masa depan.
2. Penyimpanan energi dalam bentuk hidrogen. Teknologi OTEC memberikan kemudahan akses untuk membuat hidrogen dari desalinasi air segar menggunakan listrik yang dibangkitkannya sendiri. Hidrogen dianggap menjadi "bahan bakar masa depan" untuk mesin pembakaran internal, karena sisa pembakarannya tidak beracun.
3. Diketahui bahwa uranium dan lithium banyak dikandung oleh air laut dalam. Teknologi untuk mengambil subtansi ini dari air laut dapat dibuat cukup besar. Negara di kepulauan pasifik selatan mempunyai potensi besar untuk menjadi eksportir energi.

2.4.3 Teknologi OTEC Menjamin Ketersediaan Air Bersih

Teknologi OTEC mempunyai potensi untuk menghasilkan air segar dengan metode desalinasi. Air segar dapat diproduksi dengan memanfaatkan sistem *open-cycle* OTEC ketika uap air dikondensasikan menjadi uap air. Air ini juga dapat dimanfaatkan untuk irigasi sehingga dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas pangan khususnya pada daerah yang sulit untuk mendapatkan air segar.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Gambar 2.10
Sistem OTEC Sebagai Penghasil Fresh Water

Pada gambar 2.10 terlihat air hasil destilasi sistem OTEC disalurkan ke daerah pemukiman. Setiap pembangkit OTEC dengan kapasitas 2 MW dapat mendesalinasi air segar sebanyak 4.300 m^3 setiap hari. Air tersebut dapat dikonsumsi oleh masyarakat ataupun dimanfaatkan untuk keperluan yang lain seperti sebagai air pendingin perkotaan, irigasi daerah pertanian dan perikanan air laut. Apabila air yang disalurkan diambil dari air laut dalam, air tersebut mengandung berbagai mineral (sekitar 54 elemen mineral yang mungkin untuk diekstrak) dan berbagai plankton yang bermanfaat sebagai sumber makanan maupun obat-obatan.

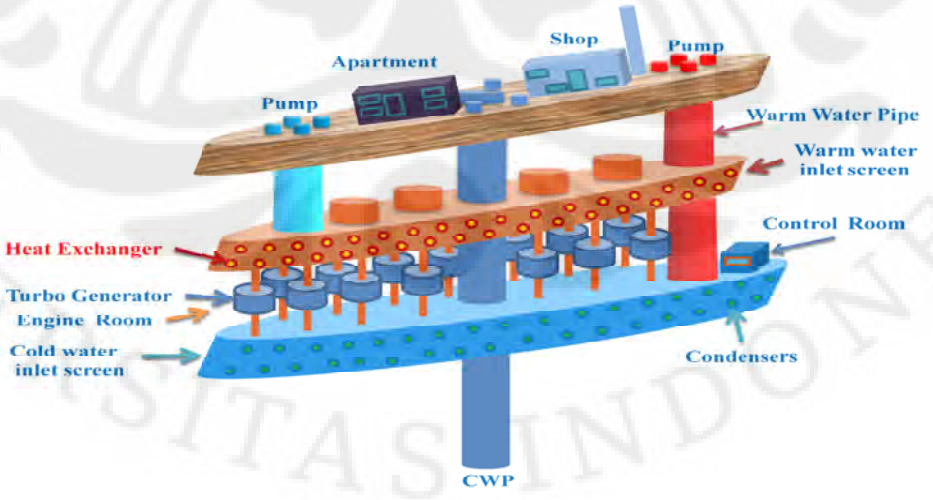
Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

BAB 3
DESAIN SISTEM OTEC

3.1 Komponen Utama Sistem OTEC

Pembangkit OTEC menggunakan perbedaan air laut untuk membangkitkan tenaga listrik baik untuk fasilitas *on-land* maupun *ship-mounted*. Subsistem dan komponen utama pada sistem OTEC ditunjukkan pada gambar 3.1.

1. Mesin kalor (power plant), termasuk didalamnya, peralatan penukar panas (*heat exchanger*), turbin, generator listrik, pompa air dan cairan kerja (*working fluid*) dan pipa-pipa penghubung serta pengendali.
2. Sistem saluran air, dimana didalamnya termasuk pipa air dingin (CWP, cold-water pipe), inlet air panas, dan pipa aliran pembuangan.
3. Sistem transfer energi untuk mengangkut energi yang dihasilkan ke *on-land* user.
4. Sistem kontrol posisi, termasuk didalamnya peralatan penggerak (*propulsion equipment*) dan penambat (*mooring equipment*), pengendali, dan sistem tenaga listrik cadangan.
5. Platform untuk mendukung *power plant*, sistem perpipaan, perlengkapan peralatan kapal, peralatan akomodasi untuk para teknisi dan personil, dan peralatan keselamatan.



Gambar 3.1
Subsistem dan Komponen Utama Sistem OTEC

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

3.2 Sistem Pembangkit OTEC

Efisiensi maximum sistem OTEC dalam mengkonversi panas menjadi kerja mekanik menurut Sadi Carnot (1824) dirumuskan oleh[3] :

$$\eta_{(max)} = \frac{T_W - T_C}{T_W} \quad (3.1)$$

dimana $\eta_{(max)}$ menyatakan efisiensi Carnot; T_W menyatakan temperatur mutlak air panas; dan T_C menyatakan temperatur mutlak air dingin. Dengan demikian, pada kondisi lautan yang disebutkan pada bagian 2.3, akan diperoleh efisiensi termal maksimum OTEC antara 7.5% sampai 8%. Efisiensi ideal ini belum memperhitungkan hilangnya energi akibat gesekan, rugi-rugi panas dan rugi-rugi lain yang dapat mengurangi besarnya energi yang dihasilkan dari proses OTEC.[3]

Produksi daya maksimum per satuan aliran air membutuhkan laju perpindahan kalor yang tinggi dan perbedaan tekanan yang jauh antara dua sisi turbin. Daya keluaran maksimum akan terjadi ketika perbedaan temperatur total antara air panas dan dingin cukup jauh dan perbedaan tekanan uap ammonia antara evaporator dan kondensor juga cukup jauh. Hanya ΔT yang berhubungan dengan perbedaan tekanan antara evaporator dan kondensor yang dapat menghasilkan kerja mekanik. Oleh karena itu, pada prakteknya efisiensi daya kotor hanya sekitar setengah dari efisiensi maksimum Carnot. Dengan demikian efisiensi praktis maksimum untuk daya kotor yang dihasilkan OTEC berkurang menjadi 3.5 sampai 4.0% [3].

Analisa menunjukkan bahwa 25% sampai 30% daya listrik yang dihasilkan oleh plant OTEC terapung yang beroperasi pada $\Delta T = 22°C$ akan digunakan untuk mengoperasikan pompa air dan ammonia serta digunakan untuk *supply* daya lain yang dibutuhkan selama operasi dan pemeliharaan plant OTEC. Dengan demikian, efisiensi bersih dari konversi energi thermal yang disimpan oleh permukaan air lautan menjadi energi listrik ini sekitar 2.5% sampai 3.0% [3].

Nilai efisiensi OTEC yang kecil bila dibandingkan dengan efisiensi mesin kalor sejenis yang beroperasi pada temperatur dan tekanan tinggi sering diasumsikan oleh beberapa perencana energi bahwa pembangkit OTEC akan sangat mahal bila dibandingkan dengan metode pembangkitan yang lain. Akan

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

tetapi, penelitian dan percobaan pengembangan menunjukkan bahwa produksi pada pembangkit OTEC dari segi biaya cukup efektif [3], hal ini didukung dengan beberapa alasan sebagai berikut.

1. Pembangkit OTEC tidak membutuhkan bahan bakar lagi setelah beroperasi sehingga tidak perlu mengeluarkan biaya untuk persiapan dan penyimpanan bahan bakar.
2. Siklus pada pembangkit OTEC yang beroperasi pada tekanan dan temperatur yang rendah sehingga biaya komponen jelas lebih rendah bila dibandingkan dengan sistem pembangkit konvensional, yang mana membutuhkan temperatur dan tekanan tinggi serta membutuhkan material khusus untuk dapat beroperasi secara efisien.
3. Operasi OTEC memiliki reliabilitas yang tinggi dan dari segi *maintenance*, akan sebanding dengan sistem pendingin komersial, dimana dapat beroperasi secara terus-menerus tanpa *shutdown*. Faktor operasinya diproyeksi dapat mencapai 85% sampai 90%, sebagai perbandingan pembangkit batubara atau pun nuklir hanya memiliki tingkat reliabilitas 50% sampai 70%.
4. Operasi OTEC akan jauh lebih aman dan ramah lingkungan.
5. Konstruksi pembangkit OTEC akan bekerja pada fasilitas, prosedur, dan komponen yang telah distandarkan dalam kontruksi kelautan. Waktu konstruksi sekitar 2.5 sampai 3 tahun, jauh lebih cepat bila dibandingkan dengan pembuatan pembangkit batubara dan nuklir yang menghabiskan waktu selama 6 sampai 10 tahun.

3.3 Peralatan Penukar Panas

Peralatan penukar panas (*heat exchanger* ,HX) merupakan suatu perangkat yang dibangun untuk mentransfer panas secara efisien dari suatu medium ke medium yang lain, baik medium tersebut dipisahkan dengan dinding pembatas maupun tidak. Peralatan penukar panas pada sistem OTEC terdiri dari dua macam yaitu *evaporator* (*boiler*) dan kondensor. *Evaporator* berada di dalam *chamber* yang berisi air panas dan kondensor berada di dalam *chamber* yang berisi air dingin.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

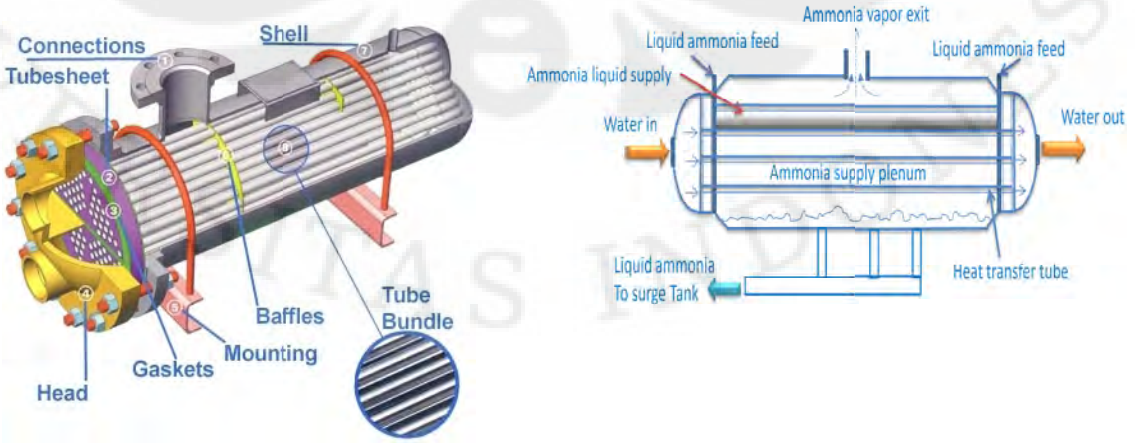
Mengingat kompleksitas dari cairan kerja dan proses perpindahan panas, yang tergantung pada geometri dan variabel keadaan, analisa yang terperinci umumnya digantikan dengan suatu hubungan empiris yang hanya berlaku untuk desain geometri yang dikembangkan saja. Tujuan utamanya adalah untuk membuat *gains* atau pun penguatan yang besar dalam keseluruhan koefisien perpindahan energi panas yang akan mengurangi biaya per kilowatt daya bersih yang dihasilkan peralatan penukar panas. Untuk itu perlu dilakukan eksplorasi terhadap berbagai jenis potensi berbagai tipe penukar panas yang sesuai dengan fitur yang dirancang untuk OTEC agar dapat diaplikasikan secara optimal.

3.3.1 Pemilihan Tipe Penukar panas

Ada beberapa tipe penukar panas yang digunakan pada sistem OTEC, yaitu:

a) Shell & Tube Heat Exchanger [3]

Jenis ini merupakan jenis penukar panas yang paling banyak digunakan untuk evaporator dan kondensor di industri. Desain skematik dari *penukar panas* jenis ini dapat dilihat pada gambar 3.2 . Permukaan transfer panas disediakan oleh tabung parallel, biasanya berdiameter sekitar 25 mm (1 in), yang mana pada bagian ujung yang di-*seal* dimasukkan ke dalam *header* atau *tubesheets*. *Tubesheet* memisahkan bagian tengah bejana silinder dari dua *kompartemen* terakhir. Untuk aplikasi OTEC, air mengalir melalui tabung dan cairan kerja mengalir pada bagian tengah dari seluruh *bank tube*.



Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Gambar 3.2
Shell & Tube Heat Exchanger [3]

Pada mode operasi evaporator konvensional, fluida yang memasuki pusat *kompartmen* berupa cairan kemudian diuapkan oleh sisi luar permukaan tabung, yang mana dipanaskan secara internal oleh air laut panas yang mengalir melalui tabung dari ujung *header* yang satu ke ujung *header* yang lain. Uap yang dihasilkan oleh pemanasan permukaan tabung kemudian naik melalui celah diantara tabung dan keluar dari bagian atas. Pada *shell-and-tube* kondensor, media kerja yang masuk bagian tengah atas tabung berupa uap, kemudian mengembun karena pengaruh air dingin dan mengalir keluar sebagai cairan melalui bagian bawah. Penukar panas dapat dipasang secara horisontal maupun vertikal.

b) *Fluted & Corrugated Heat Exchanger*[3]

Cairan yang mengalir di bawah permukaan tabung vertikal dengan bukit longitudinal yang akan diambil kedalam lembah diantara bukit-bukit longitudinal oleh tegangan permukaan. Hal ini akan menyebabkan lapisan tipis (*film*) cairan yang melewati bukit-bukit harus dipertipis, dengan demikian dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas pada saat penguapan maupun pada saat kondensasi.

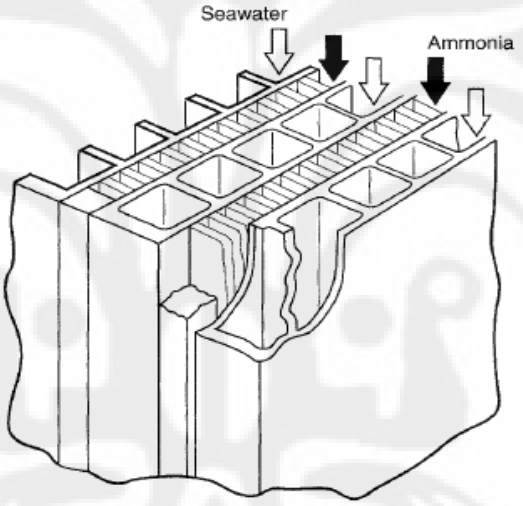
c) *Plated Heat Exchanger* [3]

Besarnya volume dan sulitnya pengemasan *shell-and-tube heat exchanger* untuk aplikasi OTEC menjadi penyebab untuk mencari alternatif penukar panas lain yang lebih sederhana, memiliki kinerja yang lebih baik, serta secara ekonomi lebih murah. Pada *plate heat exchanger*, air dan cairan kerja mengalir di dalam saluran dipisahkan dengan menggunakan *plate paralel*. *Manifold* digunakan untuk mengarahkan aliran cairan ke saluran yang tepat. Karakteristik permukaan yang digunakan untuk meningkatkan koefisien perpindahan panas pada *shell-and-tube exchanger* juga berlaku untuk *plate heat exchanger*. Peralatan penukar panas ini memungkinkan untuk meningkatkan *gain* koefisien perpindahan panas 100%

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

hingga 200% dibandingkan dengan desain *shell-and-tube heat exchanger* konvensional.

Tipe *plate heat exchanger* pada prinsipnya sederhana dan efisien dalam pemanfaatan ruang, meskipun pada prakteknya kehandalan untuk perangkat penukar panas ini sulit untuk didapatkan. Hal ini disebabkan karena beberapa panas yang disimpan hilang, sehingga membutuhkan metode pabrikasi dan isolasi saluran untuk mencegah kebocoran dan menghindari korosi. Konstruksi *flat plate* juga membutuhkan pelat yang cukup tebal untuk mencegah distorsi dan keruntuhan akibat perbedaan tekanan internal dan lingkungan (eksternal). Di dalam perancangan perbedaan tekanan dan hilangnya cairan kerja harus diperhitungkan.



Gambar 3.3
Plate Heat Exchanger [3]

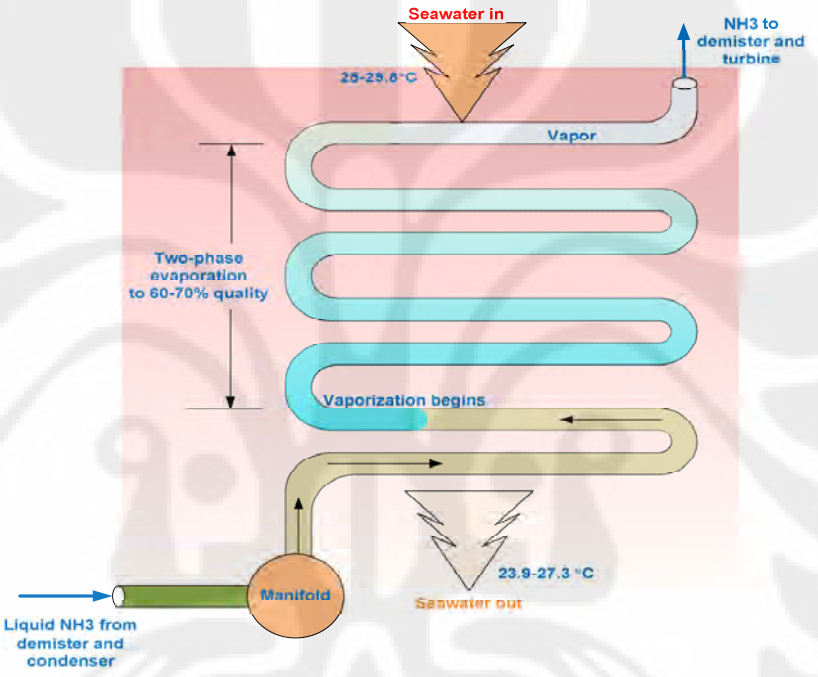
d) Folded-Tube Heat Exchanger [3]

Pada penukar panas tipe ini, cairan kerja mengalir di sepanjang sisi dalam tabung yang berkelok-kelok membentuk elemen vertikal seperti terlihat pada gambar 3.4. Peralatan penukar panas ini dibenamkan didalam aliran air laut yang mengalir di dalam *platform* OTEC. Koefisien perpindahan panas untuk tipe penukar panas ini kira-kira sama dengan tipe *shell-and-tube* konvensional.

Keuntungan desain penukar panas ini diantaranya adalah tidak perlu menghilangkan tekanan khusus pada perangkat penukar panas, mengurangi biaya fabrikasi dan material, serta memperbolehkan saluran air untuk dimasukkan

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

sebagai bagian *integral* dari desain struktural *platform*. Pada penukar panas dengan kinerja yang tinggi, perpindahan kalor yang relatif rendah membuat koefisien perpindahan kalor kurang peka terhadap *biofouling*. Penelitian menunjukkan bahwa meskipun performansi penukar panas menurun, biaya per kilowatt daya bersih dari sistem OTEC dapat lebih rendah daripada pilihan jenis peralatan penukar panas yang lain. Kelemahan dari desain *folded-tube heat exchanger* adalah *unconventionality,* kurangnya produksi dan pengalaman operasional penukar panas jenis ini.



Gambar 3.4
Folded Tube Heat Exchanger

3.3.2 Desain Peralatan Penukar panas [3]

Laju perpindahan kalor dari satu fluida ke fluida yang lain yang dipisahkan oleh suatu dinding pembatas (*separator*) dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{Q} = UA(T_1 - T_2) \qquad (3.2)$$

dimana $\dot{Q}$ menyatakan laju perpindahan kalor, U menyatakan koefisien hantaran panas $(kW/m^2°C)$, A menyatakan luas permukaan (m^2), T_1 menyatakan temperatur fluida pertama (°C), T_2 menyatakan temperatur fluida kedua (°C).

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Untuk laju perpindahan kalor dari air panas ke ammonia di dalam evaporator,

$$\dot{Q}_e = U_e A_e (T_{ww} - T_{ae}) \quad (3.3)$$

dimana $\dot{Q}_e$ menyatakan laju perpindahan kalor di evaporator, U_e menyatakan koefisien hantaran panas untuk evaporator $(kW/m^2°C)$, A_e menyatakan luas permukaan evaporator (m^2), T_{ww} menyatakan temperatur air panas (°C), T_{ae} menyatakan temperatur ammonia di dalam evaporator (°C).

Untuk laju perpindahan kalor dari ammonia ke air dingin di dalam kondensor,

$$\dot{Q}_c = U_c A_c (T_{ac} - T_{cw}) \quad (3.4)$$

dimana $\dot{Q}_c$ menyatakan laju perpindahan kalor di dalam kondensor, U_c menyatakan koefisien hantaran panas untuk kondensor $(kW/m^2°C)$, A_c menyatakan luas permukaan kondensor (m^2), T_{ac} menyatakan temperatur ammonia di dalam kondensor (°C), T_{cw} menyatakan temperatur air dingin (°C).

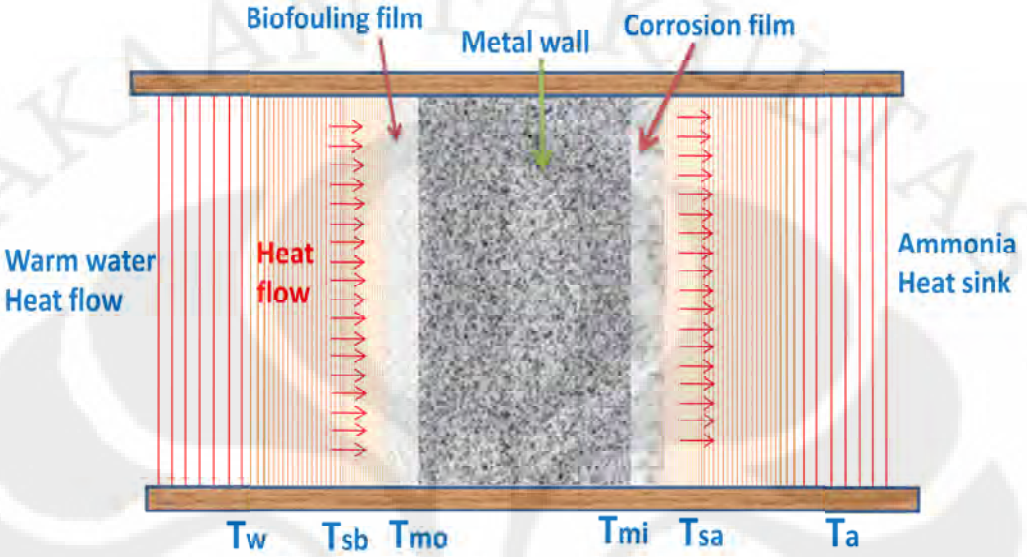
Karena penukar panas dibatasi oleh dimensi dan besarnya kalor yang dipindahkan oleh aliran air ke permukaan penukar panas, maka temperatur air yang berada pada evaporator lebih rendah daripada temperatur yang berada di *inlet*. Titik didih dan titik kondensasi ammonia ditentukan oleh tekanan pada evaporator dan kondensor dan diperkirakan besarnya konstan. Laju perpindahan kalor dari air ke ammonia berubah-ubah sesuai posisinya di dalam penukar panas.

Nilai dari koefisien hantaran panas U tergantung pada karakteristik termodinamika dari fluida, kecepatan aliran, fraksi penguapan ammonia pada titik khusus di dalam penukar panas, komposisi dan konstruksi dari material separator (mesin pemisah) antara permukaan pembatas dengan fluida, karakteristik permukaan pada kedua sisi separator (kekasaran, skala ketersediaan, *biofouling*, dll), serta desain dan dimensi penukar panas.

Gambar 3.5 menunjukkan proses perpindahan panas di dalam penukar panas. Jika banyaknya kalor, Q, mengalir dari air ke ammonia, maka yang pertama kali yang harus dilewati adalah permukaan *separator*. Disini perbedaan temperaturnya, $T_w - T_{sw}$, yang nilai *magnitude*-nya tergantung pada

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

karakteristik aliran pada titik tersebut. Di dalam perputarannya, tergantung pada geometri lintasan alirannya.



Gambar 3.5

Proses Perpindahan Panas di dalam Penukar panas

Kalor kemudian mengalir melewati suatu lapisan tipis biofouling, dimana terjadi penurunan temperatur, $T_{sb} - T_{mo}$. Kemudian kalor melewati hambatan lain dan pada akhirnya kalor akan memanaskan cairan ammonia. Dengan demikian laju perpindahan kalor dari air panas ke ammonia dapat dituliskan kembali menurut persamaan berikut:

$$\dot{Q} = h_w(T_w - T_{sb}) = h_{sb}(T_{sb} - T_{mo}) = (k/x)(T_{mo} - T_{mi})$$
$$= h_{sa}(T_{mi} - T_{sa}) = h_a(T_{sa} - T_a) = U(T_w - T_a) \qquad (3.5)$$

dimana T_w = temperatur air, T_{sb} = temperatur permukaan pada lapisan skala biofouling, T_{mo} = temperatur permukaan di bagian luar logam penukar panas, T_{mi} = temperatur permukaan di bagian dalam logam penukar panas, T_{sa} = temperatur permukaan pada lapisan skala ammonia, T_a = temperatur ammonia, h_w, h_{sb}, h_{sa}, dan h_a = koefisien perpindahan panas pada lapisan yang bersangkutan, k = konduktivitas thermal dinding penukar panas yang memisahkan air dan ammonia, x = ketebalan dinding penukar panas.

Dari gambar 3.5 diatas juga dapat diketahui bahwa:

$$T_w - T_a = (T_w - T_{sb}) + (T_{sb} - T_{mo}) + (T_{mo} - T_{mi}) + (T_{mi} - T_{ac}) + (T_{ac} - T_a) \quad (3.6)$$

dengan demikian juga dapat dituliskan juga bahwa:

$$1/U = 1/h_w + 1/h_{sb} + x/k + 1/h_{sa} + 1/h_a \quad (3.7)$$

Karena proses secara fisika sangatlah kompleks, sangatlah sulit untuk mendapatkan nilai yang akurat untuk besarnya nilai U dengan menurunkan prinsip-prinsip dasar fisika. Walaupun demikian, cukup banyak formula yang telah diturunkan dari data eksperiment, dimana dapat digunakan untuk mendapatkan hasil eksperiment yang sesuai dan digunakan sebagai dasar membandingkan desain dan memprediksi performansi dari perangkat penukar panas.

3.3.3 Dimensi Penukar panas [4]

Laju perpindahan kalor dari Sistem OTEC yang rendah membuat penukar panas memerlukan area permukaan yang luas. Untuk koefisien laju perpindahan kalor tertentu dan ΔT penukar panas mendekati 5.6°C, daya bersih yang dikirimkan sekitar 0.16 kWe per m^2 dari total area permukaan perpindahan kalor [12]. Dengan demikian, untuk membangkitkan energi sebesar 10 MWe penukar panas harus mempunyai total area permukaan perpindahan panas (evaporator dan kondensor) sekitar 60.000 m^2.

Faktor utama yang menentukan ukuran penukar panas OTEC adalah panjang dan luas area persilangan sekat-sekat (*cross-sectional*) yang dibutuhkan untuk menampung air dan ammonia. Kecepatan aliran air di dalam penukar panas sekitar 1 - 3 m/s. Dengan demikian, untuk menampung 23 m^3/s aliran yang dibutuhkan oleh modul penukar panas 10 MWe, membutuhkan area *cross-sectional* inlet di evaporator sekitar 12.5 sampai 25 m^2, luas area yang sama juga dibutuhkan di kondensor [3].

Area aliran yang dibutuhkan oleh ammonia lebih sulit untuk dikarakteristikkan karena ammonia memasuki penukar panas sebagai cairan dan kemudian dikonversi menjadi uap, yang berarti bahwa akan terjadi

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

peningkatan volume ammonia yang melewati penukar panas. Dengan mengasumsikan bahwa penukar panas didesain untuk membuat aliran ammonia mengalir secara paralel dan kira-kira sama dengan bagian persilangan untuk lintasan air. Area cross-sectional evaporator dan kondensor yang digunakan untuk menampung aliran untuk modul 10 MWe (kotor) akan menjadi 25 – 50 m^2. Area tambahan akan dibutuhkan untuk bagian dinding dan fitur struktural [3].

Kedalaman penukar panas (z) ditentukan oleh waktu yang dibutuhkan untuk memindahkan kalor dari air ke cairan ammonia untuk mengubah temperatur *bulk* air oleh sejumlah desain. Dengan mempertimbangkan saluran sempit air dinding paralel, seperti ditunjukkan oleh gambar 3.6 [12], dengan ketebalan saluran y, lebar saluran satu satuan, dan kedalaman saluran z, dimana kalor berpindah melalui kedua sisinya. Laju perpindahan kalor rata-rata dari air ke ammonia dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\dot{Q} = 2U(T_w - T_a)z = 2U(T_w - T_a)vt \tag{3.8}$$

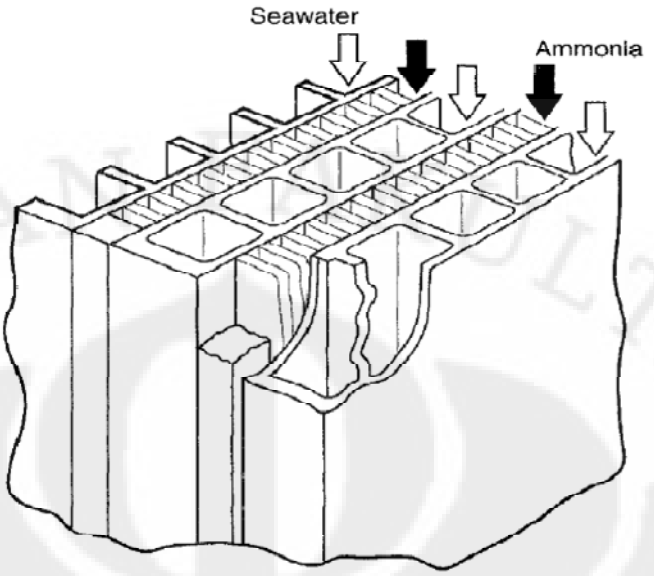
dimana v adalah laju aliran dan t adalah waktu. Banyaknya kalor yang dipindahkan selama aliran melalui penukar panas adalah:

$$\dot{Q}t = \rho C_p zy(T_{w\,in} - T_{w\,out}) = 2U(T_w - T_a)zt \tag{3.9}$$

dimana ρ adalah kerapatan cairan ammonia dan C_p adalah kapasitas kalor. Karena $t = z/v$, maka:

$$z = \frac{\rho C_p yv(T_{w\,in} - T_{w\,out})}{2U(T_w - T_a)} \tag{3.10}$$

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009



Gambar 3.6
Lintasan Aliran Fluida di dalam Piringan Penukar panas [3]

Jika area inlet lintasan air dan ammonia disamakan dan ketebalan dinding sebesar (1/20)y, total area *cross-sectional* dari tiap penukar panas untuk modul 10 MWe akan menjadi sekitar 106 m^2. Area platform yang diperlukan oleh penukar panas 54 MWe kira-kira sekitar 572 m^2 untuk nilai-nilai parameter yang diberikan.

3.4 Pemilihan Cairan Kerja

Sebagian besar cairan kerja yang dikembangkan untuk sistem *air-conditioning* (AC) sangatlah potensial untuk dijadikan cairan kerja *(working fluid)* untuk sistem OTEC[12]. Faktor-faktor utama yang menjadi pertimbangan dalam pemilihan cairan kerja untuk sistem OTEC adalah.

1. Tekanan uap berada dalam kisaran 700-1400 kPa (100-200 psi) pada temperatur 27°C.
2. Volume aliran fluida kerja yang rendah untuk menghasilkan per kilowatt daya
3. Memiliki koefisien perpindahan panas yang tinggi, yaitu memiliki resistansi termal yang rendah untuk memindahkan kalor dari uap panas

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

(*bulk vapor*) ke permukaan penukar panas melalui lapisan tipis (*liquid film*).

4. Secara kimia memiliki stabilitas dan kompatibilitas dengan material dan struktur dari siklus daya, seperti penukar panas, turbin, *seal*, dan minyak pelumas.
5. Pertimbangan keamanan cairan (*safety*) dan dapat diterima oleh lingkungan.
6. Biaya yang rendah.

Berdasarkan karakteristik termodinamika dari fluida, terdapat empat fluida yang potensial untuk digunakan sebagai cairan kerja OTEC. Keempat fluida tersebut adalah *ammonia* (NH_3), *propana* (C_3H_8), *butana* (C_4H_{10}), dan R-22 (CHF_2Cl). Karakteristik termodinamika dari keempat fluida tersebut ditunjukkan pada tabel 3.1.

Table 3.1

Property of Heat Engine Working Fluid of Interst for OTEC (15.56°C) [3]

Property	Ammonia	Propane	Butane	R-22
Formula	NH_3	C_3H_8	C_4H_{10}	CHF_2Cl
Molecular weight (M)	17.03	44.09	58.12	123.46
Density(l) (kg/m^3)	616.73	508.60	583.73	1229.78
Density(v) (kg/m^3)	5.82	16.19	4.61	33.89
Vapor pressure(sat) (kPa)	741.88	741.40	179.40	801.93
Heat of vaporization (kJ/kg)	1214.63	350.63	374.64	193.51
Specific heat(l) (kJ/kg K)	4.68	2.56	2.37	1.22
Specific heat(v) (kJ/kg K)	2.92	2.01	1.76	0.78
Viscocity(l) (Pa s)	$1.596x10^{-4}$	$1.199x10^{-4}$	$1.782x10^{-4}$	2.121^{-4}
Viscocity(v) (Pa s)	$1.100x10^{-5}$	$8.681x10^{-5}$	$7.606x10^{-5}$	$1.277x10^{-5}$
Thermal conductivity (l) (W/m K)	0.50343	0.101551	0.1211	0.092382
Thermal conductivity(v) (W/m K)	0.02595	0.018684	0.015397	0.01038
B (kPa M kJ/kg)	$1.535\ x10^7$	$1.146\ x10^7$	$3.906\ x10^6$	$1.916\ x10^7$
$k^3\rho^2\lambda/\mu$	$7.796\ x10^2$	$1.678\ x10^2$	$1.889\ x10^2$	$1.816\ x10^2$

[s]l saturated liquid; v vapor

Volume aliran minimum yang dibutuhkan untuk menghasilkan per kilowatt daya berbanding terbalik dengan perkalian tekanan p_v, *enthalphy* penguapan H_{lg}, dan berat molekul M. Nilai maksimum dari perkalian ini, B,

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

sesuai dengan keperluan volume minimum untuk turbin dan terkait dengan saluran dan katup:

$$B = p_v \Delta H_{lg} M \tag{3.11}$$

Koefisien perpindahan panas sangat tergantung pada proses perpindahan panas. Untuk kondensasi uap pada tabung horizontal maupun vertikal berdiameter D, koefisien perpindahan panas h oleh persamaan Nusselt dinyatakan sebagai berikut:

$$h = \left(\frac{k^3 \rho^2 H_{lg}}{D \mu \Delta T} \right)^{1/4} \tag{3.12}$$

dimana k adalah konduktivitas termal, rapat jenis zat cair, dan μ adalah viskositas dinamik. Untuk temperatur dan diameter tabung yang diberikan,

$$h = const\left(k^3 \rho^2 H_{lg}/\mu\right)^{1/4} = const\ x\ \phi \tag{3.13}$$

Nilai maksimum dari ϕ dikaitkan dengan area minimum penukar panas. Ketergantungannya umumnya lemah, hal ini dikarenakan koefisien perpindahan kalor dari sisi air secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan koefisien perpindahan kalor dari sisi cairan kerja. Walaupun demikian, tetap mempunyai pengaruh yang besar terhadap nilai keseluruhan koefisien perpindahan panas. Dari kriteria volume aliran dan koefisien perpindahan panas untuk pemilihan cairan kerja OTEC, ammonia merupakan cairan kerja terbaik diantara keempat cairan yang lain.

Pada prakteknya, penggunaan cairan kerja harus kompatibel dengan material konstruksi dan pemeliharaan. Ammonia tidak kompatibel dengan campuran logam tembaga (*copper alloy*), sehingga apabila ammonia dipilih sebagai cairan kerja OTEC harus dihindari penggunaan tembaga, tidak hanya untuk komponen penukar panas yang terkena cairan kerja tetapi juga untuk pipa, valve, dan lainnya yang umum digunakan dalam peralatan komersial.

Ammonia tidak larut dalam lemak dan minyak, yang mana banyak digunakan untuk pelumas turbin maupun katup (*valve*). Hal ini berarti bahwa jika ada uap yang dihasilkan dari pelumas ini, mereka akan cenderung tertumpuk dan tetap pada permukaan perpindahan panas pada kondensor dingin yang pada akhirnya akan menurunkan performansi dari kondensor. Hidrokarbon dan Freon

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

tidak mempunyai kekurangan seperti yang dimiliki oleh ammonia. Walaupun demikian, kelebihan lain yang dimiliki oleh ammonia menyebabkan ammonia banyak dipakai oleh para desainer sebagai cairan kerja sistem OTEC. Kekurangan yang dimiliki ammonia dapat dihindari dengan mendesain sistem yang sesuai.

Untuk kriteria *safety*, mempertimbangkan tentang sifat racun, bahaya ledakan dan kebakaran yang terkait dengan penggunaan cairan kerja. Meskipun nilainya relatif berbeda di antara cairan, semua pertimbangan tersebut digunakan oleh sistem OTEC secara luas dan disetujui untuk keperluan umum sesuai dengan keselamatan standard yang telah ditetapkan.

Karena besarnya jumlah cairan kerja yang akan terlibat dalam OTEC, diperlukan pertimbangan khusus dari bahaya yang akan timbul apabila terjadi bencana kecelakaan. Dari sudut pandang ini, cairan hidrokarbon paling berbahaya karena apabila terjadi kebocoran yang signifikan dapat membentuk kumpulan *denser* dari udara gas yang dapat menyebabkan kebakaran dan ledakan yang akan merambat keseluruh cairan kerja dan menghancurkan kapal maupun instalasi OTEC. Beberapa ratus ton atau lebih hidrokarbon mudah terbakar dapat habis dalam sebuah kecelakaan yang melibatkan plant OTEC yang besar.

Peraturan keselamatan yang dikeluarkan oleh Interstate Commerce Commission mengklasifikasikan ammonia sebagai bahan yang tidak mudah meledak untuk pengiriman dan pemeliharaan. Kebocoran ammonia yang besar akan menghasilkan gas yang mematikan setelah beberapa menit pembukaan dimanapun konsentrasi ammonia melebihi per seribu bagian. Ammonia mempunyai kelarutan yang di dalam air, dan jika ammonia tercampur dengan air laut maka akan secara cepat menyebar dalam area yang luas, dapat mengakibatkan terjadinya evolusi panas yang besar, pemanasan, dan memproduksi uap air yang hebat. Konsentrasi dari ammonia yang larut dapat mematikan kehidupan laut dalam jangkauan yang cukup besar (dapat mencapai satu kilometer atau lebih) tergantung besarnya arus laut dan pencampuran. *Fluorinated hydrocarbon* tidak beracun dan tidak mudah terbakar tetapi lebih padat daripada air, bila tertumpah akan membuat awan tebal dengan diameter yang dapat mencapai ratusan meter.

Dalam pandangan keamanan distribusi hidrokarbon dan ammonia secara luas dengan menggunakan kapal tongkang dan tanker dalam kuantitas jutaan ton

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

per tahun, sebaik menggunakan *Fluorinated hydrocarbon* sebagai cairan kerja di dalam mesin pendingin komersial, bahaya penggunaan cairan tersebut sebagai cairan kerja tidak dapat diabaikan dalam menentukan pilihan cairan kerja untuk sistem OTEC.

Meluasnya komersial plant dan plantship OTEC akan mengakibatkan beberapa pelepasan cairan kerja ke dalam lingkungan lautan dan atmosfer. Untuk ammonia dan hidrokarbon, kuantitas emitted tidak berarti dalam membandingkan dengan industri hidrokarbon untuk transportasi dan pemanas, dan ammonia yang digunakan untuk pupuk. Campuran *fluorine-chlorine-carbon* (Freon) tidak ramah lingkungan karena apabila freon memasuki atmosfer maka dapat mempengaruhi lapisan ozon dan apabila di dalam air laut dapat masuk ke dalam rantai makanan, semakin lama konsentrasinya akan semakin banyak dan pada akhirnya akan mencapai tingkat konsentrasi beracun (contoh, plankton dimakan oleh ikan kecil yang kemudian dimakan oleh ikan besar dan mungkin pada akhirnya dikonsumsi oleh manusia). Untuk itu pengumpulan data dan informasi tentang cairan kerja OTEC perlu dilakukan sehingga dapat digunakan untuk memperkirakan efek dan potensi jangka panjang dalam penggunaan cairan kerja OTEC ini. Dengan demikian diharapkan dapat mengurangi dampak yang mungkin akan terjadi bila menggunakan cairan kerja tersebut.

Biaya yang dihabiskan untuk cairan kerja OTEC tergantung pada desain pembangkit listrik (*power plant*) dan penyimpanan (*storage*). Biaya cairan kerja sekitar $5/kW untuk ammonia dan $35/kW untuk freon R-22. Dengan demikian, biaya cairan kerja tidak dipertimbangkan terlalu signifikan dalam pemilihan cairan kerja. Dari total penilaian terhadap keenam kriteria OTEC yang dilakukan oleh komunitas OTEC lebih memilih ammonia sebagai cairan kerja OTEC.

3.5 Saluran (Pipa) Air

Pada bagian ini akan dibahas mengenai peralatan dan struktur yang dibutuhkan dalam penyaluran air panas dan dingin dari lautan, menghubungkannya dengan penukar panas, dan membuangnya kembali ke lautan. Penyaluran air merupakan bagaian utama dalam sistem OTEC karena volume air

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

yang besar harus dapat dihandel dan dibutuhkan ukuran dan panjang yang tepat khususnya untuk pipa air dingin.

Sistem OTEC menggunakan air dingin yang diambil pada kedalaman 1000 m di bawah permukaan laut. Air dingin ini digunakan untuk mendinginkan dan mencairkan uap yang berasal dari turbin. Pipa air dingin (*cold water pipe*, CWP) dan perlengkapannya harus didesain untuk menahan beban statik maupun dinamik yang disebabkan oleh berat pipa, gerakan relatif pipa, dan pengaruh gelombang, arus serta induksi oleh pengisapan pompa air. CWP harus mempunyai dimensi yang cukup untuk menghandel kebutuhan aliran air, rugi pengisapan yang rendah, materialnya harus dapat bertahan lama di dalam air laut dan tahan terhadap segala bentuk korosi atau pun erosi, serta tidak menyebabkan korosi pada penukar panas dan dapat diterima oleh lingkungan.

Panjang CWP ditentukan oleh kedalaman pengambilan air dimana temperatur air mendekati 5°C. Laju aliran air ditentukan oleh besarnya daya keluaran yang diharapkan dan besarnya efisiensi pembangkit OTEC dalam mengkonversi energi thermal menjadi energi mekanik yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Pemilihan diameter CWP untuk menghasilkan daya keluaran OTEC sesuai yang diinginkan didasarkan pada *trade-off* antara biaya CWP (perbandingan antara diameter, ketebalan dinding dan panjang pipa) dan daya pompa yang dibutuhkan untuk mengatasi terjadinya isapan aliran (*flow drag),* yang mana dapat meningkat sebanding dengan pangkat tiga dari kecepatan air didalam CWP [7]. Sudut yang diperkenankan antara CWP dan platform ditentukan oleh proyeksi pergerakan kapal dan *platform* yang akan terjadi dalam waktu 100 tahun pada kondisi dan tempat pembangkit OTEC beroperasi.

Daya yang dibutuhkan untuk memompa air dingin ke sistem kondensor OTEC ditentukan oleh hasil aliran massa air dan jumlah kepala hidrolik [12,38]. Kepala hidrolik ditentukan oleh beberapa faktor:

1. Kebutuhan daya untuk mengkompensasi penurunan ketinggian level air laut didalam CWP. Karena air di dalam CWP lebih padat daripada rata-rata air laut, posisi keseimbangan dari permukaan atas air di dalam kolom air dingin kira-kira 0.6 m dibawah level air laut.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

2. Kepala hidrolik sampai 3 m dibutuhkan untuk mengatasi penurunan tekanan di dalam kondensor.
3. Daya (P_d) yang harus dikeluarkan untuk mengatasi penurunan tekanan yang disebabkan oleh gesekan air yang mengalir melalui CWP.
4. Rugi-rugi lain yang disebabkan oleh sekat dan hilangnya tekanan dinamik pada titik-titik tertentu di dalam aliran yang disebabkan oleh berubahnya area secara tiba-tiba.

Point 1, 2 dan 4 tidak tergantung pada diameter CWP. Akan tetapi point 3, akan meningkat sebesar pangkat tiga dari kecepatan aliran dan pada akhirnya akan menjadi bahan pertimbangan dalam memilih diameter pipa. Dimana sesuai dengan persamaan laju aliran fluida:

$$w = \rho A v = \rho D^2 (\pi/4) v \quad (3.14)$$

Besarnya gaya isap per unit aliran sama dengan kepala hidrolik, maka:

$$h_d = f(v^2/2g)(L/D) \quad (3.15)$$

dimana f adalah koefisien gesekan. Karena daya yang dibutuhkan untuk mengatasi terjadinya isapan aliran besarnya sama dengan perkalian antara laju aliran fluida dengan kepala hidrolik, maka:

$$P_d = (f v^3/8g) L \rho D \pi \quad (3.16)$$

Dengan demikian maka besarnya kepala hidrolik yang digunakan untuk mengatasi terjadinya tarikan pipa adalah sebesar:

$$h_d = \frac{P_d}{w} = \frac{8 f v^2 L}{D^5 \pi^2 \rho^2 g} \quad (3.17)$$

Dari persamaan diatas terlihat bahwa besarnya kepala hidrolik yang digunakan untuk mengatasi gaya isapan pipa merupakan bagian kecil dari total kepala yang digunakan untuk mendesain *baseline* ini. Terlihat dengan jelas bahwa diameter CWP lebih besar daripada yang dibutuhkan. Pemilihan ukuran CWP yang optimal lebih bergantung pada biaya CWP yang lebih rendah untuk mengurangi peningkatan biaya pembangkit per kilowatt yang disebabkan oleh berkurangnya daya bersih akibat daya memompa yang meningkat. Sebagai gambaran dapat dilihat pada table 3.2 .

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Table 3.2
Effect of CWP diameter on net OTEC power cost [3]
[40-MWe (net) demonstration plant]

CWP diameter (m)	h_d (m)	P_d (MWe)	P_e (MWe)	Plant power (MWe net)	$\$/kW^a$	$\$/kW^b$
9.1	0.20	0.26	4.28	40.0	3610	3610
8.2	0,34	0.45	4.47	39.8	3582	3540
7.3	0.60	0.80	4.82	39.5	3563	3488
6.4	1.17	1.57	5.59	38.7	3589	3489
5.5	2.50	3.33	7.41	36.9	3714	3594

[a]CWP cost proportional to CWP diameter
[b]CWP cost proportional to CWP diameter squared

Tabel 3.2 menunjukkan bahwa diameter CWP yang optimal adalah antara 6.4 m dan 7.3 m untuk desain 40 MWe. Hasil yang lebih penting menunjukkan bahwa biaya per kilowatt daya bersih dari pembangkit OTEC akan optimal untuk variasi diameter dan biaya CWP yang tidak terlalu besar.

Analisa dan test menunjukkan bahwa CWP dapat dibangun dengan teknologi yang ada. Terdapat dua desain khusus untuk memasang CWP:

1. Bentuk artikulasi CWP dari bagian pipa beton berbobot ringan. Bagian pipa diangkut ke platform dimana CWP dihubungkan yang satu dengan lainnya dari platform OTEC ke bawah sampai kedalaman 1000 m.
2. Membuat pipa dari material plastic yang diperkuat, dimana akan dikontruksi secara onshore sebagai pipa tunggal sepanjang 1000 m dan kemudian tabung diangkut ke platform OTEC, kemudian sah satu ujungnya ditenggelamkan dan ujung lainnya dimasukkan kedalam suatu tempat di kapal yang disediakan khusus untuk memasng pipa.

3.5.1 Installasi CWP untuk OTEC

Plant OTEC terapung secara komersial dirancang untuk menghasilkan daya bersih dalam kisaran 100-350 MW. Hal ini menunjukkan bahwa CWP dengan diameter 20 m atau lebih, mungkin diperlukan jika hanya menggunakan *single* CWP untuk plant OTEC tersebut. Terdapat alternatif

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

layout desain plant, dalam hubungannya dengan manufaktur dan penilaian *deployment*, yaitu dengan melakukan pendekatan modular untuk memperluas area untuk memasukkan air ke sistem *inlet* maupun *outlet* [36]. Hal ini mengarah pada desain sistem OTEC dengan modul 60 -80 MW sebagai unit dasar, yang kemudian dapat digabung untuk menciptakan sebuah plant dengan ukuran yang lebih besar. Dengan desain modular seperti ini dibutuhkan CWP dengan diameter 10 – 12 m.

Karakteristik statik dan dinamik CWP dapat dianalisa dengan mengaplikasikan rumus dan teknik yang dikembangkan untuk kulit tabung dibawah tekanan (*cylindrical shells under tension*). Analisis tersebut cukup rumit karena beban yang didistribusikan sepanjang pipa tergantung pada material dan metode kontruksi yang digunakan, serta nilainya berubah terhadap waktu. Gaya dinamis yang utama diberikan oleh pergerakan *platform* pada terusan laut yang ditransmisikan ke CWP melalui peralatan tambahan ke platform OTEC. Beban yang mungkin terjadi selama pipa mengalami pergeseran juga harus dianalisa secara tepat.

Persiapan untuk penentuan persyaratan struktural CWP untuk sistem OTEC dapat dibuat dengan memperkirakan beban statis. Perkiraan ini dapat digunakan untuk memilih kesesuaian material dengan metode konstruksi dan untuk menunjukkan pilihan desain yang akan digunakan untuk analisis dan pengujian dinamik. Pilihan desain yang terakhir yang kemudian akan dipilih berdasarkan evaluasi kelayakan konstruksi dan *deployment* serta pertimbangan biaya.

3.5.2 Beban Statis

Evaluasi dari beban statis memberikan dasar pemilihan awal material konstruksi dan mendefinisikan rincian struktural. Silinder kapal yang terbuat dari baja, alumunium, beton, dan dikuatkan dengan plastik secara komersial banyak tersedia dengan diameter lebih dari 10 m. Material dan teknik konstruksi kapal ini dapat diterapkan untuk desain CWP OTEC.

Gaya statis yang bekerja pada CWP selama OTEC beroperasi adalah:

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

1. *Moment bending* (tekukan) pada sambungan antara CWP dan platform. Untuk sebuah CWP berdiameter 10 m sepanjang 1000 m, yang melekat pada platform, *moment bending* akan melebihi $3x10^7$ kgm jika diproyeksikan mencapai 100 tahun dengan semburan mencapai 3,2 knot. Magnitude dari moment menunjukkan bahwa diperlukannya sebuah poros sambungan. *Moment bending* juga diakibatkan oleh arus bawah laut yang bervariasi terhadap kedalaman laut. Moment bending dapat dikurangi dengan merancang CWP menjadi fleksibel, baik dengan menggunakan material yang sesuai atau dengan menggabungkan sambungan yang fleksibel antara bagian-bagian pipa yang keras (kaku).
2. Tegangan longitudinal yang diakibatkan oleh berat dari pipa di dalam air laut. Tegangan ini berkurang sedikit selama OTEC beroperasi yang diakibatkan oleh gaya tarikan dari aliran air dingin yang mengalir keatas melalui pipa.
3. Beban jatuh (*collapse load*) yang diakibatkan oleh tekanan hisap pipa.
4. Beban *ovalling* yang dihasilkan oleh perbedaan tekanan disekeliling pipa.

3.5.2.1 Beban *Bending*

Gaya mendesak yang diakibatkan oleh aliran air secara horisontal yang melewati CWP pada kedalaman tertentu yang terdiri dari tiga komponen:

$$F_d' = C_d' A \rho_w v^2/2$$
$$F_d'' = C_d'' A \rho_w v'^2/2 \qquad (3.18)$$
$$F_l = C_l A \rho_w (v' - v)^2/2$$
$$F_d = F_d' + F_d''$$

dimana F_d' adalah gaya tarik yang berkaitan dengan aliran normal disekitar silinder; F_d'' merupakan gaya intermitent yang dihasilkan oleh perputaran penumpahan (*eddy shedding*); F_l gaya angkat *intermittent lateral* yang berkaitan dengan perubahan dalam aliran; v' kecepatan sesaat aliran dan v kecepatan rata-rata aliran.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Nilai maksimum gaya dapat diestimasi dengan menentukan nilai dari koefisien [28]:

$$C_d' = 0{,}3;\ C_d'' = 0.03;\ C_l = 0.4$$

Nilai maksimum *shear force* (gaya pencukuran) pada kedalaman tertentu dirumuskan:

$$F = (F_d^2 + F_l^2)^{1/2} \quad (3.19)$$

Karena ada arus bawah laut yang bervariasi terhadap kedalaman laut, maka nilai kecepatan aliran yang digunakan untuk penghitungan momen dan gaya pencukuran (*shear force*) harus dicari dengan menggunakan vektor kecepatan aliran yang melewati CWP pada setiap perubahan kedalaman yang diakibatkan oleh pergerakan platform secara horisontal dan kecepatan arus. Beban *bending* maksimum kemudian ditentukan dengan mengintegrasi disepanjang pipa.

3.5.2.2 Gaya Longitudinal

Tegangan dalam sebuah pipa homogen yang disebabkan oleh berat pipa yang terendam dapat dirumuskan:

$$T_z = (\rho_p - \rho_w)(L_0 - L_z) \quad (3.20)$$

Dimana T_z adalah unit tegangan; ρ_p rata-rata kerapatan dinding CWP; ρ_w kerapatan air laut; L_0 panjang pipa yang didesain; L_z panjang pipa pada kedalaman z. Gaya tarikan keatas (*upward force*) yang disebabkan oleh hisapan internal aliran air pada dinding pipa dirumuskan oleh persamaan:

$$F = 4f\frac{L}{D}\rho\frac{v_p^2}{2g} \quad (3.21)$$

dimana f koefisien gesekan pipa= $4f'$, f' koefisien *fanning* = 0.004

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -4log_{10}\left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{1.256}{Re^{0.5}}\right] \quad (3.22)$$

dimana ϵ faktor kekasaran permukaan pipa (0,3 mm beton halus, dan 0,05 mm untuk baja); Re = $1.7\ x\ 10^6$; v_p = kecepatan aliran didalam CWP; D = diameter dalam CWP; L = panjang CWP.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

3.5.2.3 *Collapse Load* (Beban Jatuh)

Perbedaan tekanan hisap yang melintasi CWP merupakan penjumlahan dari Δp yang disebabkan oleh hisapan didalam pipa, perbedaan massa jenis antara air dingin dengan air hangat di permukaan,dan Δp yang mempercepat kelajuan aliran air dingin di dalam pipa. Kerugian kecil yang diakibatkan oleh saringan inlet dan pembatasan lainnya pada aliran juga harus dipertimbangkan. Daya memompa juga harus diberikan untuk mengatasi hilangnya tekanan pada penukar panas dan saluran yang terkait.

$$\Delta p = f\frac{L}{D}\rho\frac{v_p^2}{2g} + \int_0^L \frac{\rho_i(1-\rho_0)}{\rho_i}dy + \rho\frac{v_p^2}{2g} + \Delta p_{HX} + \Delta p_{misc} \qquad (3.23)$$

dimana ρ_0 kerapatan air diluar CWP (tergantung dengan kedalaman), v_p kecepatan aliran air pada CWP, y kedalaman, f koefisien gesekan pipa= $4f'$, L/D ratio panjang pipa terhadap diameternya, dan ρ_i kerapatan air didalam CWP.

Perhitungan nilai-nilai Δp aliran air dingin untuk nilai L/D dan v yang mewakili level daya 40, 60, dan 80 MWe (bersih), ditunjukkan pada Tabel 2.3. Nilainya dihitung pada kecepatan aliran air dingin 3,4 m^3/s per MWe (bersih), yang didapatkan optimal pada desain *baseline* 40 MWe .

3.5.2.4 *Ovalling Load*

Ovalling pipa dapat terjadi karena perbedaan tekanan antara di dalam dan di luar pipa. Efeknya kecil dalam mendesain CWP secara praktis dan dapat diabaikan.

3.5.3 Beban Dinamik

Pembelokkan arus dan pergerakkan depan kapal. Kebebasan yang mendukung CWP untuk menambatkan subject platform untuk memantapkan arus laut akan mengasumsikan sebuah sudut yang mewakili keseimbangan gaya antara gaya lateral saat dikenakan arus dan gaya pemulih yang timbul karena berat pipa. Nilai-nilai sudut dari berbagai material, diameter dan

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

panjang pipa yang telah diestimasi oleh Little untuk pipa kaku yang berporos pada platform. Penelitian ini menunjukkan bahwa gaya pada pipa akan ditentukan oleh interaksi dinamis pada mode getaran alami pipa dengan gelombang osilasi platform OTEC.

Tabel 3.3

Beban Jatuh (*Collapse Load*) pada CWP

Karakteristik	Power MWe (net)					
	40	**40**	**60**	**60**	**80**	**80**
V (m/s)	2,00	2,50	2,00	2,50	2,00	2,50
D (m)	9,30	8,32	11,40	10,19	13,16	11,77
L (m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
P (kPa)						
Friction	3,53	6,16	2,88	5,03	2,50	4,36
Density effect	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65
Dynamic loss	1,03	1,60	1,03	1,60	1,03	1,60
Miscellaneous	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
P(total) (kPa)	13,20	16,40	12,60	15,30	12,20	14,60
P (total) (psi)	1,90	2,40	1,80	2,20	1,80	2,10
P (800m) (kPa)	12,50	15,20	12,00	14,30	11,70	13,70

(kecepatan aliran air dingin 3,4 m3/s per MWe)

Gaya yang disebabkan karena gelombang dan angin pada platform OTEC akan menyebabkan terjadinya pergeseran pada bagian atas CWP. Hal ini akan menimbulkan gerakan lateral dan longitudinal sepanjang pipa yang besarnya tergantung pada mode getaran alami pipa dan efek peredaman dari struktur dan air melingkupi dan mengalir melalui pipa.

Analisa pembebanan dan perpindahan melibatkan beberapa asumsi dasar yang meliputi:

1. Frekuensi dan amplitudo gelombang yang bekerja pada platform dan CWP dapat dideskripsikan sebagai fungsi kerapatan *spectral,*

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

$S_w(f,\theta)$, yang menyatakan hubungan antara amplitudo dan frekuensi (f) dengan arah (θ) dari setiap komponen gelombang. Besarnya rata-rata kuadrat elevasi gelombang Y_w dirumuskan sebagai:

$$\overline{Y_w^2} = \int_0^{2\pi} d\theta \mid S_w(f,\theta)df \tag{3.24}$$

Untuk kasus-kasus gelombang tertentu, pendekatan platform dari satu atau beberapa arah akan lebih disukai. Fungsi tersebut kemudian akan dihitung sebagai suatu fungsi superposisi *unidirectional*. Pengaruh θ kemudian akan dihilangkan.

2. Jika respon dari platform dan sistem CWP untuk gelombang biasa dari satuan amplitudo dapat dinyatakan oleh respon fungsi alih amplitudo R(f), maka respon kerapatan *spectral* S_R(f), spektrum acak $S_w(f)$ diberikan oleh persamaan:

$$S_R(f) = R(f)^2 S_w(f) \tag{3.25}$$

Nilai rata-rata akar dari respon diberikan oleh:

$$\overline{R^2} = \int_0^{\infty} S_R(f)df$$
$$R = \left(\overline{R^2}\right)^{1/2} \tag{3.26}$$

3. Banyak karakteristik statistik dari response yang dapat diturunkan dari fungsi response, khususnya:
   a. Rata-rata nilai puncak dari response selama periode N siklus.
   b. Nilai yang diharapkan dari penyimpang tunggal yang paling besar selama N siklus dari response.
4. Fungsi kerapatan spectral yang diajukan oleh Bretschneider merupakan representasi yang valid dari $S_w(f)$. Formula ini memasukkan hasil dari sejumlah besar pengukuran keadaan laut dalam bentuk yang dapat dengan mudah digunakan untuk keperluan penghitungan.

$$S_w(f) = 5\left(\frac{H_s}{4}\right)^2 \frac{1}{f_0}\left(\frac{f_0}{f}\right)^5 exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f_0}{f}\right)^4\right] \tag{3.27}$$

Terdapat dua parameter bebas: H_s ketinggian gelombang yang signifikan dari terusan laut (*seaway*) secara acak. Nilai-nilai ketinggian gelombang

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

yang signifikan dan frekuensi rata-rata untuk potensi situs OTEC yang telah dihitung oleh Bretchneider [41] dari data historis kecepatan angin yang dikembangkan untuk angin topan. Bretchneider telah menggunakan data untuk menurunkan persamaan yang terkait dengan gelombang tinggi untuk kecepatan angin karena tergantung pada lokasi geografis.

3.6 Otimasi Sistem Pembangkit OTEC

3.6.1 Daya Keluaran

Daya keluaran optimum akan terjadi ketika perbedaan temperatur total antara air panas dan dingin yang masuk kedalam lingkar tertutup pembangkit OTEC terbagi sehingga sehingga setengah dari perbedaan temperatur tersebut digunakan untuk menaikkan perpindahan panas dari evaporator ke kondensor dan setengah perbedaan temperatur yang lain digunakan untuk mencapai suatu perbedaan tekanan uap antara evaporator dan kondensor, yaitu tekanan drop cross turbin. Untuk mendapatkan efisiensi mesin kalor sekitar 4% diperlukan temperatur air panas sekitar 22.2°C dan temperatur air dingin sekitar 4.4°C. Wu [12] menunjukkan suatu teori tentang efisiensi daya maksimum yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{max}(teori) = 1 - \sqrt{\frac{T_{cw}}{T_{ww}}} \qquad (3.28)$$

Untuk temperatur yang telah disebutkan, didapatkan $\eta_{P(max)} = 3.77\%$.

3.6.2 Ketergantungan daya pada aliran air.

Jika perbedaan temperatur total 22.2°C, daya output optimum akan terjadi ketika perubahan temperatur pada air yang mengalir diantara inlet dan yang keluar dari evaporator masih berada pada rentang 2.2 sampai 5°C. Perubahan temperatur optimum pada air dingin yang mengalir melalui kondensor juga mempunyai rentang yang sama yaitu antara 2.2°C sampai 5°C. Dikarenakan biaya saluran air dingin (CWP) lebih mahal daripada saluran air panas, lebih menguntungkan untuk mendesain sistem pembangkit yang mempunyai laju aliran air dingin lebih rendah di kondensor dibandingkan

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

aliran di dalam evaporator. Hal ini mengakibatkan perbedaan temperatur pada air dingin lebih tinggi daripada air panas.

Untuk perubahan temperatur air panas sekitar 3.33°C, energi thermal sebesar 13.9 kJ dipindahkan ke ammonia yang berada di dalam evaporator per kilogram per detik aliran air. Dengan mengasumsikan perbedaan temperatur pada turbin sekitar 11.1°C dan temperatur air di inlet 26.7°C, secara teori dapat dibangkitkan daya oleh turbin sekitar 0.49 kWe per kilogram per detik aliran air panas. Dengan mengasumsikan efisiensi turbin-generator sekitar 82%, maka generator dapat membangkitkan daya listrik sebesar 0.4 kWe per kilogram per detik aliran air [3].

Untuk menghasilkan daya satu megawatt pembangkit OTEC membutuhkan aliran air panas kira-kira 2350 kg/s, begitu pula aliran air dingin dalam jumlah yang sama dibutuhkan didalam kondensor. Sehingga volume total aliran air laut yang dibutuhkan diperkirakan sekitar 4.7 m^3/s per megawatt daya listrik kotor [8].

3.6.3 Daya Memompa Air.

Untuk kepala hidrolik 3.05 m dan efisiensi pompa air 75% (termasuk drive motor listrik), estimasi daya memompa, P_{we}, untuk evaporator 9600 kgm/s adalah 94 kWe, per megawatt daya listrik kotor. Kondensor membutuhkan daya 20% lebih tinggi bila dibandingkan dengan evaporator, atau kira-kira membutuhkan daya memompa air sekitar 21% dari nilai daya kotor yang dikirimkan [8].

3.6.4 Daya Memompa Ammonia.

Jumlah kalor yang dipindahkan ke ammonia per megawatt daya listrik yang dikembangkan adalah 32.7 MW (*thermal*). Kalor yang dipindahkan ke ammonia di dalam evaporator pertama kali dinaikkan temperaturnya sampai mulai menguap dan kemudian diserap sebagai kalor.

$$P_a = \rho v A\left[(T_e - T_c)C_p + H_v\right] \tag{3.29}$$

dimana P_a= daya memompa ammonia, ρ = kerapatan cairan ammonia (625 kg/m^3), v = kecepatan ammonia mengalir didalam inlet, A = luas area inlet, T_e

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

= temperatur evaporator, T_c = temperatur kondensor, C_p=kalor jenis ammonia (4.72 kJ/kg°C), H_v = kalor laten penguapan ammonia pada 21.1°C (1460 kJ/kg), rvA = 27 kg/s, dan vA = 0.043 m^3/s.

Untuk gambar 2.5, perbedaan tekanan pada pompa ammonia adalah 397 kPa. Perhitungan daya memompa ammonia, P_a = 23 kWe, jika efisiensi pompa 72%. Estimasi daya yang lebih akurat yang dibutuhkan untuk memompa ammonia dari kondensor ke evaporator membutuhkan rincian perencanaan data efisiensi pompa ammonia dan informasi sekitar sirkulasi cairan ammonia. Pompa ammonia akan membutuhkan sekitar 3% dari daya keluaran kotor generator OTEC.

3.6.5 Keluaran Daya Bersih OTEC

Sekitar 26% daya kotor yang dihasilkan oleh pembangkit OTEC yang beroperasi pada ΔT = 22.2°C akan dibutuhkan untuk operasi pembangkit OTEC. Dengan demikian, efisiensi operasi didefinisikan sebagai perbandingan daya bersih dengan daya kotor yang besarnya sekitar 74%. Dengan demikian kita dapatkan efisiensi bersih OTEC sekitar 0.74 x 3.7% = 2.7%.

Ketergantungan Daya Bersih pada ΔT. Dikarenakan daya OTEC tidak bebas linear dengan perbedaan temperatur antara air dan ammonia, besarnya daya kotor akan berubah-ubah tergantung kuadrat dari total perbedaan temperaturnya; akan tetapi daya parasitik akan bebas linear dengan perbedaan temperatur karena daya memompa dan daya lain yang dibutuhkan tidak mempengaruhi perubahan temperatur air permukaan. Untuk kasus khusus ini, daya bersih per megawatt dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_{net} &= a(\Delta T)^2 - 0.26 \\ 1.00\ MWe &= a(22.2)^2 - 0.26 \\ a &= (0.26 + 1.00)/493.8 = 2.557\ x\ 10^{-3} \end{aligned} \tag{3.30}$$

dengan demikian, untung rentang temperatur air permukaan antara 23.9°C sampai 30.0°C (total perbedaan temperatur antara 19.4°C sampai 25.6°C), variasi output akan berada pada rentang 0.70 MWe pada temperatur air permukaan 23.9°C sampai 1.42 MWe pada temperatur air permukaan 25.6°C.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Dengan demikian, dalam rentang temperatur air permukaan operasi OTEC ini, output daya bersih plant OTEC akan berubah-ubah kira-kira sebesar:

$$P_{net(30.0^{\circ}C)}/P_{net(23.9^{\circ}C)} = (\Delta T_{30.0^{\circ}C})/(\Delta T_{23.9^{\circ}C})^{n}\text{ , n = 2.55} \qquad (3.31)$$

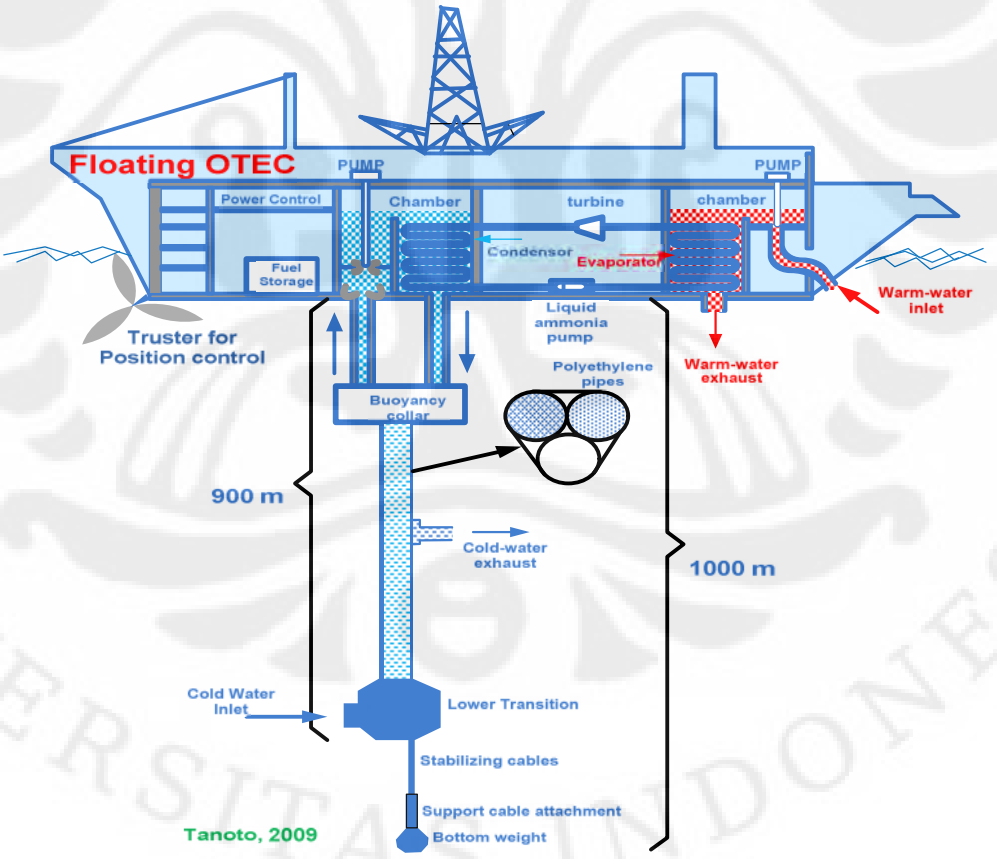
Pendalaman ketergantungan daya bersih pada temperatur air permukaan ini menunjukkan bahwa biaya per megawatt output daya bersih akan minimum pada lautan yang mempunyai temperatur air permukaan rata-rata yang tinggi. Biaya kontruksi dan distribusi daya pembangkit OTEC akan minimum apabila didesain untuk beroperasi pada lautan yang mempunyai temperatur air permukaan yang maksimum. Ini dapat menjadi pendorong untuk memfokuskan analisa ekonomi OTEC sebagai sumber energi alternatif.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

BAB 4
PEMBAHASAN

4.1. Aliran dan Siklus Air

Dalam sistem pembangkit OTEC, potensi energi yang bersumber pada perbedaan temperatur air laut dikonversikan menjadi tenaga listrik. Mula-mula potensi tenaga panas air laut dikonversikan menjadi tenaga mekanik dalam turbin uap, kemudian turbin uap tersebut akan memutar generator yang dapat membangkitkan tenaga listrik. Sistem pembangkit OTEC mengambil air laut pada level kedalaman yang berbeda, dimana air laut dengan temperatur sekitar 25-27 °C diambil dari level permukaan, sedangkan air laut dingin dengan temperatur sekitar 5°C diambil pada level kedalaman lebih dari 900 m (optimal 1000 m) di bawah permukaan laut.



Gambar 4.1.
Konstruksi sistem pembangkit OTEC terapung

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Dari gambar konstruksi sistem pembangkit OTEC diatas (gambar 4.1), terlihat bahwa air laut dipompakan masuk kedalam suatu *chamber* (ruangan tempat menampung air laut) melalui pipa-pipa air. Terdapat dua buah *chamber*, satu digunakan untuk menampung air laut dingin dan *chamber* yang lain digunakan untuk menampung air laut panas yang diambil dari permukaan laut. Untuk mengatur ketinggian level air, kestabilan temperatur, serta siklus aliran air di dalam *chamber*, setiap *chamber* dilengkapi dengan saluran pembuangan (*exhaust pipe*). Di dalam *chamber* yang berisi air laut panas terdapat *evaporator*, sedangkan di dalam *chamber* yang berisi air laut dingin terdapat *kondensor*. Ukuran *chamber* disesuaikan dengan ukuran dimensi dan jenis *heat exchanger* yang digunakan; sebagai contoh, untuk setiap modul evaporator 10 MWe membutuhkan area sekat 125 m^2 dengan kedalaman air rata-rata 16.6 m.

Air laut sisa yang dikeluarkan dari *chamber* ini dapat dimanfaatkan untuk keperluan yang lain. Misalnya, air dingin yang dikeluarkan dapat dimanfaatkan sebagai air pendingin *air conditioning*, didesalinasikan menjadi sumber air segar, maupun untuk irigasi pertanian dan perikanan. Namun, jika air keluaran dari *chamber* tersebut tidak akan dimanfaatkan, air tersebut dapat dibuang kembali ke dalam lautan. Pembuangan air laut hangat harus cukup jauh dan dalam dibandingkan dengan tempat air laut panas dipompakan masuk (dibuang pada kedalaman sekitar 75 m di bawah permukaan laut). Sedangkan untuk pembuangan air laut dingin harus lebih dangkal dibandingkan dengan tempat air laut dingin dipompakan masuk (dibuang pada kedalaman sekitar 400 m di bawah permukaan laut). Hal ini dimaksudkan agar sirkulasi potensi air laut panas maupun air dingin akan tersedia dalam kurun waktu yang lama.

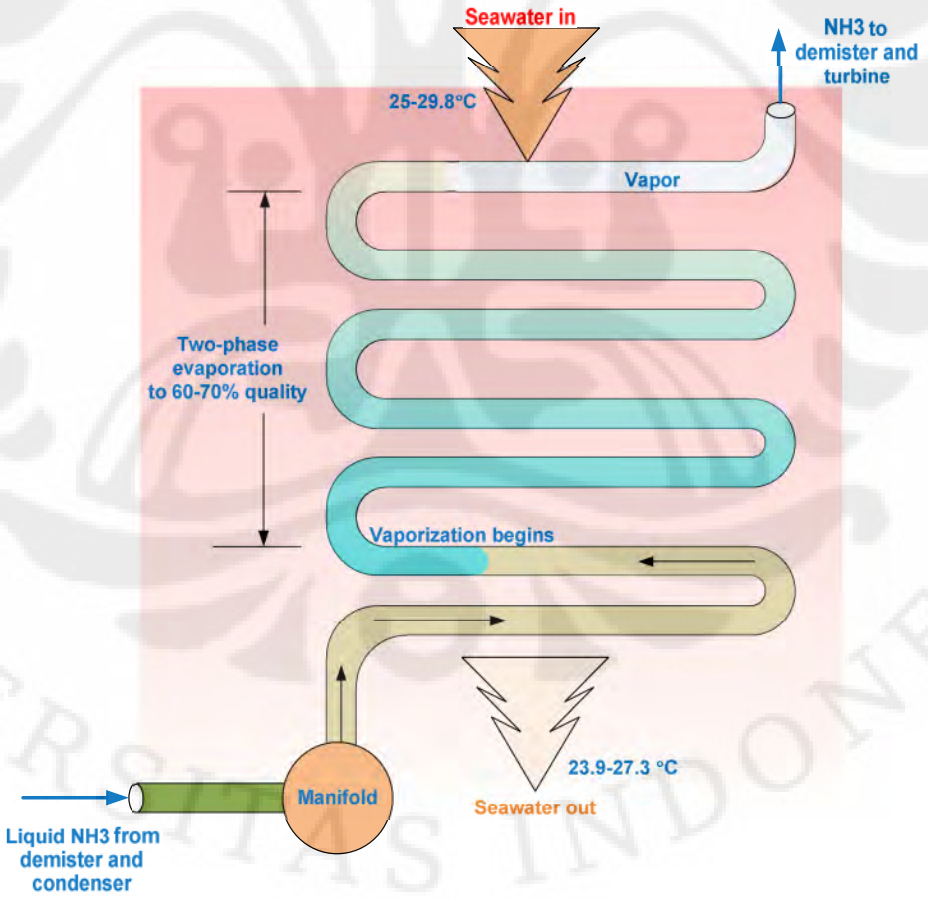
Air laut dingin dipompakan ke dalam *chamber* melalui pipa-pipa air dingin (*cold water pipe*, CWP) dengan laju aliran air 2 m/s. Kecepatan laju aliran tersebut dipilih dengan pertimbangan efisiensi. Jika laju aliran air dingin lebih kecil maka koefisien hantar kalor pada heat exchanger akan kecil. Sedangkan apabila aliran air dingin dipompa dengan kelajuan lebih dari 2 m/s maka akan membutuhkan daya memompa yang besar. Berdasarkan data-data yang dikemukakan oleh George dan Richard [14] untuk dapat membangkitkan daya

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

OTEC 40 MWe (bersih) yang optimal dibutuhkan diameter CWP 6.4 – 7.3 m. Dengan demikian debit aliran air laut yang masuk ke *chamber* 64 m^3/s sampai 83.7 m^3/s. Untuk memompa air laut dingin dari kedalaman 915 m pada kisaran debit tersebut membutuhkan *baseline* daya pompa 4.27 MWe.

4.2. Aliran dan Siklus Ammonia

Evaporator yang berada di dalam *chamber* akan dialiri air laut panas (temperatur 25-29.8°C) yang diambil dari permukaan laut. Ammonia NH3 sebagai cairan kerja evaporator akan mengalami pemanasan. Kalor air laut akan merambat disepanjang area permukaan evaporator yang kemudian akan memanaskan cairan ammonia. Besarnya kalor yang diterima ammonia tergantung pada besarnya koefisien hantar evaporator, laju aliran air, perbedaan temperatur ammonia dengan air, serta luas area sentuh permukaan evaporator (persamaan 8).

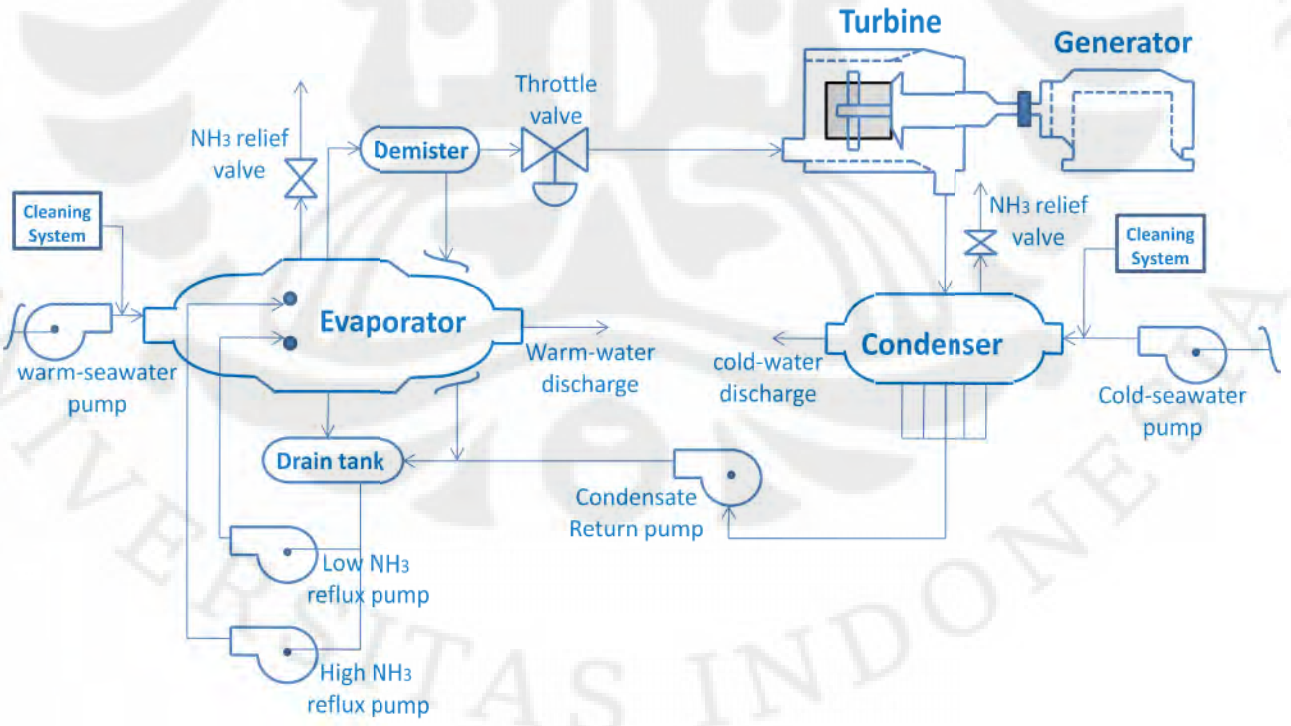


Gambar 4.2.

Aliran ammonia di dalam evaporator

Tekanan di dalam evaporator dinaikkan hingga tekanannya mencapai 857-1100 KPa. Pada tekanan tersebut ammonia akan menguap pada temperatur 20-28°C. Hal ini disebabkan karena pada tekanan dan temperatur tersebut ammonia berada pada titik saturasi cairan-uap. Uap ammonia akan terangkat ke atas dan bergerak ke luar menuju *demister*.

Demister berfungsi sebagai tempat untuk menampung uap ammonia sekaligus sebagai tempat untuk memisahkan ammonia uap dengan ammonia cair. Uap ammonia yang keluar dari evaporator tidak 100% berupa uap murni melainkan masih mengandung ammonia cair. Ammonia cair ini apabila masuk ke dalam turbin uap akan menurunkan tingkat efisiensi turbin. Oleh karena itu, ammonia cair akan dimasukkan kembali ke *drain tank* dan akan dicampur dengan ammonia yang telah dikondensasikan oleh kondenser. Hal tersebut menyebabkan cairan ammonia yang berasal dari kondensor mengalami peningkatan temperatur kembali sehingga akan mempercepat proses penguapan ammonia di dalam evaporator.



Gambar 4.3.

Komponen Installasi Sistem OTEC

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

Akibat penurunan temperatur ammonia sebelum masuk ke dalam turbin uap (temperatur ammonia menjadi 17-23°C), tekanan uap ammonia harus dijaga tetap pada tekanan saturasinya 780-945 kPa supaya tetap berada pada wujud uap.

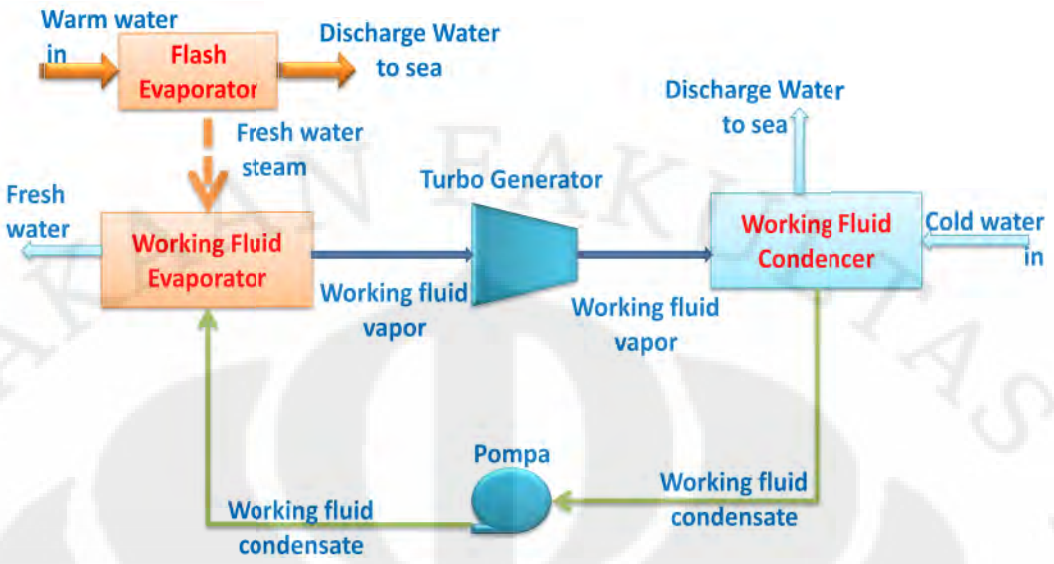
Perbedaan tekanan antara tekanan uap di demister dengan tekanan pada kondensor memberikan energi yang cukup untuk menggerakkan turbin uap bertekanan rendah. Turbin uap inilah yang mengkonversi energi uap menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang didapatkan dapat digunakan untuk memutar generator listrik. Generator listrik berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dari konversi energi uap tergantung pada tingkat efisiensi daripada turbin dan generator.

Dari turbin tekanan rendah, uap ammonia dialirkan ke kondensor untuk diembunkan. Kondensor memerlukan air pendingin untuk mengembunkan uap yang keluar dari turbin tekanan rendah. Air pendingin diambil dari air laut pada kedalaman sekitar 1000 m dengan temperatur sekitar 5°C. Proses perambatan kalor pada kondensor mirip dengan yang terjadi pada evaporator, perbedaannya pada kondensor energi kalor dari uap ammonia berpindah ke air pendingin. Setelah uap ammonia mengalami kondensasi menjadi ammonia cair, ammonia cair dipompakan ke dalam *drain tank* untuk dicampur dengan ammonia cair yang berasal dari *demister* yang selanjutnya akan dipompakan kembali kedalam evaporator.

4.3. Hybrid OTEC

Teknologi pembangkit OTEC terdiri dari dua jenis, yaitu open cycle yang menghasilkan produk utama berupa air segar (*fresh water*) dan closed cycle OTEC yang dapat menghasilkan listrik sebagai produk utama. Teknologi hybrid mengkombinasikan sistem open dan closed cycle untuk dapat menghasilkan dua produk utama tersebut yaitu air segar dan listrik (Gambar 4.4). Dengan menggunakan sistem hybrid ini diharapkan akan memperoleh efisiensi yang maksimum.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009



Gambar 4.4.
Sistem Hybrid OTEC

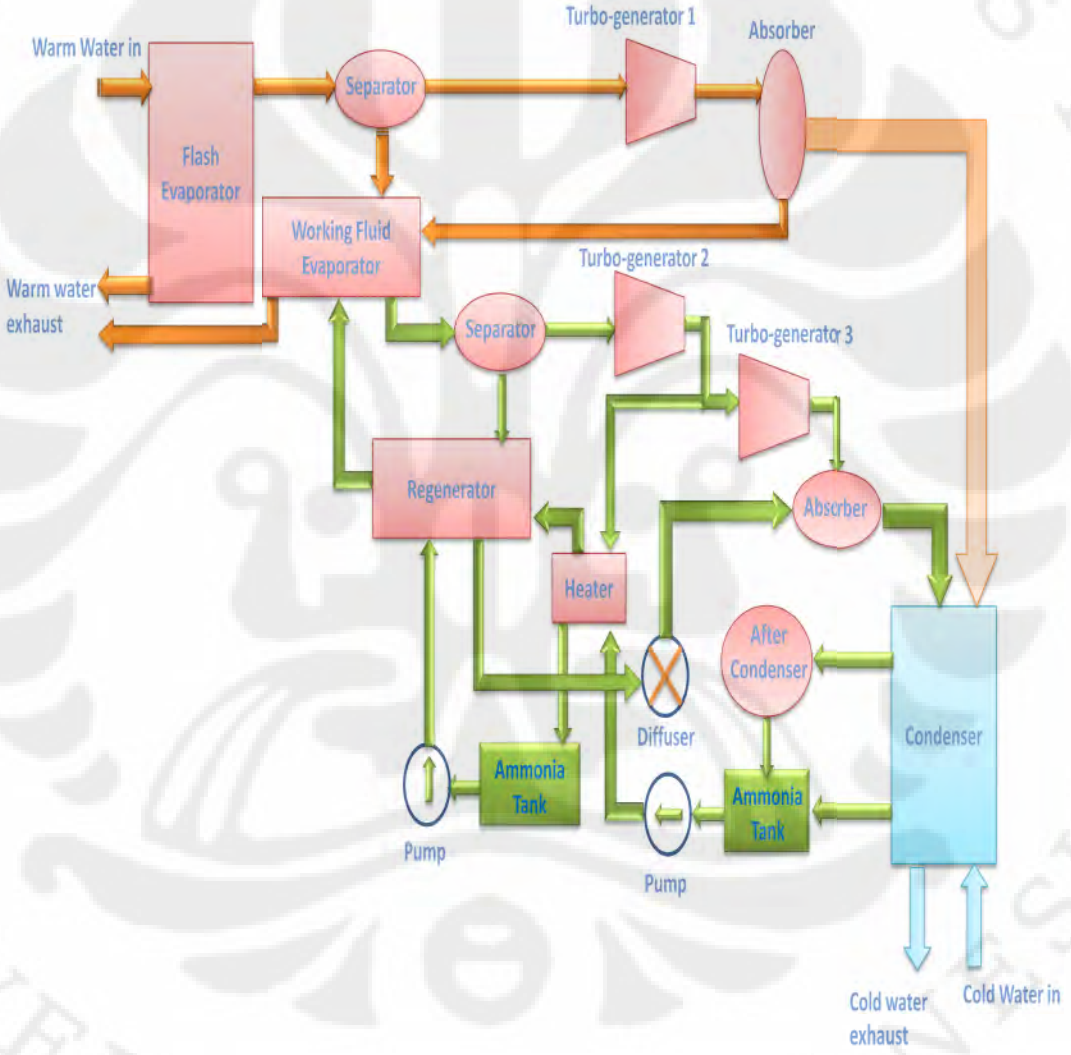
Air laut permukaan diambil dan dimasukan ke dalam suatu flash evaporator. Air laut diatur pada tekanan tertentu nenjadi uap air panas yang kemudian akan disemprotkan ke dalam evaporator cairan kerja. Panas dari uap air akan ditransfer ke cairan kerja evaporator yang berupa cairan ammonia. Pada tekanan tertentu, ammonia akan menguap. Ketika terjadi transfer energi dari uap air panas ke ammonia, uap air akan menjadi cair dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber air segar. Uap ammonia kemudian akan digunakan untuk menggerakan turbin uap. Turbin dihubungkan dengan suatu generator listrik, sehingga ketika turbin berputar generator dapat berputar juga dan menghasilkan daya listrik. Setelah melewati turbin, ammonia akan masuk ke dalam kondensor hingga mengalami kondensasi dan menjadi cairan ammonia. Cairan ammonia yang telah dikondensasikan akan dipompakan kembali ke dalam evaporator untuk dipanaskan kembali.

Dengan memanfaatkan teknologi hybrid ini, sistem OTEC dapat beroperasi secara optimal. Hal ini dikarenakan air laut permukaan tidak langsung digunakan untuk memanaskan ammonia, tetapi diubah menjadi uap air panas terlebih dahulu. Uap air panas yang dihasilkan kemudian disemprotkan ke dalam evaporator untuk memanaskan ammonia. Uap air panas tersebut setelah mengalami transfer energi ke ammonia akan menjadi air segar.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

4.4. Hybrid Uehara OTEC

Hybrid Uehara OTEC merupakan pengembangan dari hybrid OTEC. Pembangkit listrik yang menggunakan teknologi hybrid Uehara OTEC diharapkan dapat menghasilkan daya listrik lebih optimal dibandingkan dengan pembangkit yang hanya menggunakan teknologi hybrid OTEC. Hal ini dikarenakan pada sistem hybrid Uehara OTEC uap air panas digunakan sampai tiga tingkat (gambar 4.5).



Gambar 4.5
Sistem Hybrid Uehara OTEC

Prinsip kerja dari pembangkit listrik berteknologi hybrid uehara OTEC merupakan gabungan dari prinsip kerja *claude open cycle OTEC* dan u*ehara close*

cycle OTEC. Ketika air laut permukaan masuk ke *flash evaporator* yang tekanannya telah diatur, air akan mengalami penguapan.Uap air panas tersebut kemudian akan melewati suatu separator sehingga bagian uap yang telah mencair akan dimasukkan ke dalam evaporator yang akan dipergunakan untuk memanaskan ammonia. Sedangkan bagian uap panasnya akan dipergunakan untuk menggerakkan turbin-generator. Setelah melewati turbin-generator, sisa uap panas akan dimasukkan kedalam evaporator untuk memanaskan ammonia. Ammonia yang masuk ke dalam evaporator sebelumnya telah dipanaskan di dalam regenerator sehingga uap yang dihasilkan pada evaporator akan optimal. Uap ammonia akan digunakan untuk menggerakan turbin-generator 2 dan 3. Dengan demikian, diharapkan dengan pemanfaatan uap air panas dan uap ammonia secara maksimal, maka daya output yang dihasilkan pun akan optimal.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

BAB 5
KESIMPULAN

1. Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) akan bekerja dengan tingkat efisiensi maksimum jika dioperasikan dengan perbedaan temperatur laut sekitar 22°C.
2. Sistem pembangkit tenaga OTEC yang menggunakan sistem *closed-cycle* memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingskan sistem *open-cycle*..
3. Efisiensi praktis maksimum yang dapat dicapai OTEC sekitar 3,5-4%.
4. Dimensi yang dibutuhkan untuk CWP dan heat exchanger dapat diperkecil dengan membagi plant ke dalam beberapa modul yang sesuai.
5. Cairan kerja yang paling cocok digunakan pada sistem OTEC adalah ammonia.
6. Pembangkit OTEC dengan menggunakan teknologi hybrid uehara memiliki potensi yang besar untuk menghasilkan daya listrik keluaran yang optimal.
7. Wilayah perairan di Indonesia yang memiliki potensi besar untuk dibangun sistem pembangkit tenaga OTEC adalah disepanjang pantai selatan Jawa sampai Nusa Tenggara.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009

DAFTAR REFERENSI

01 Thomas H Daniel, "A Brief History of OTEC Research at NELHA", Natural Energy of Hawaii: Hawaii,1999

02. Haruo Uehara, "OTEC Power Generation Saves Mankind", Saga University: Saga, 2000

03. William H.Avery, Chih Wu,"Renewable Energy from the Ocean: A Guide to OTEC" , Oxford University Press: New york, 1994.

04. http://www.belmont.k12.ca.us/ralston/programs/itech/SpaceSettlement/spaceresvol2/images/fig17.GIF

05. Hiroki Kobayashi, Sadayuki Jitsuhara, Haruo Uehara, "The Present Status and Features of OTEC and Recent Aspects of Thermal Energy Conversion Technologies", Saga University: Saga

06. Noboru Yamada, Akira Hoshi, "Thermal Efficiency Enhancement of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Using Solar Thermal Energy", 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit(IECEC):California, 2006

07. Little T.E, J.D Marks, K.H Wellman, " Deep Water Pipe, Pump, and Mooring Study: Ocean Thermal Energy Conversion Program Final Report", Westinghouse Electric Corporation, 1979

08. Lasantha Meegahapola, lanka Udawatta, Sanjeeva Witharana, "The Ocean Thermal Energy Conversion Strategies and Analysis of Current Challenges", Second International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS):Sri Lanka, 2007

09. M.Teresa Pontes, Antonio Falcao, "Ocean Energies: Resources and Utilisation",World Energy Council: London, 2001.

Studi literatur..., Eko Wahyu Tanoto, FT UI, 2009