

ANALISIS KONFIGURASI KOPLING PLTN DAN INSTALASI DESALINASI BERBASIS PERHITUNGAN EKONOMI

Erlan Dewita, Dedy Priambodo, Sudi Ariyanto

Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) - BATAN

Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710

E-mail : erland@batan.go.id

Masuk: 8 Juni 2011

Direvisi: 20 Juli 2011

Diterima: 27 September 2011

ABSTRAK

ANALISIS KONFIGURASI SISTEM KOPLING PLTN DAN INSTALASI DESALINASI BERBASIS PERHITUNGAN EKONOMI. *PLTN kogenerasi potensial diterapkan pada daerah yang mengalami krisis energi listrik dan air bersih melalui kopling antara PLTN dan instalasi desalinasi (desalinasi nuklir). Dewasa ini, terdapat beberapa desalinasi nuklir yang sudah beroperasi secara komersial menggunakan beberapa tipe reaktor sebagai sumber panas seperti: LWR (PWR dan BWR), walaupun tidak menutup kemungkinan penggunaan tipe reaktor lainnya, seperti: HTGR, HWR dan lain-lain. Sedangkan teknologi desalinasi yang sudah beroperasi secara komersial dan berproduksi dalam skala besar adalah Multi-Stage Flash (MSF), Multi-Effect Distillation (MED) untuk proses distilasi termal dan Reverse Osmosis (RO) untuk proses membran, maupun teknologi hibrid, seperti: MED-RO, MSF-RO dan MED-RO-TVC. Tujuan studi menganalisis konfigurasi sistem kopling PLTN dan instalasi desalinasi yang optimum ditinjau dari biaya air dengan pertimbangan aspek teknologi, ekonomi dan keselamatan. Metodologi yang digunakan adalah melakukan studi perbandingan beberapa konfigurasi kopling: PWR-RO, PWR-MED, PWR-MSF, PWR-MED-RO, PWR-MSF-RO, PWR-MED-RO-TVC dan HTGR-RO, HTGR-MED, HTGR-MSF, HTGR-MED-RO, HTGR-MSF-RO dan HTGR-MED-RO-TVC, serta melakukan simulasi menggunakan program DEEP.4, untuk reaktor dengan daya thermal 330 MWth, kapasitas produksi air 40.000 m³/hari, temperatur air laut 28,9°C, TDS 30.000 ppm dan discount rate 10%. Hasil studi menunjukkan biaya air hasil konfigurasi kopling HTGR-MED-RO lebih rendah dibanding untuk konfigurasi kopling lainnya.*

Kata kunci: konfigurasi, kopling, desalinasi, nuklir, PLTN

ABSTRACT

CONFIGURATION OPTIMIZATION FOR COUPLING SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANT AND DESALINATION INSTALLATION BASED ON ECONOMIC CALCULATION. *Cogeneration NPP is potential to be applied in areas with water and electricity deficit through coupling of NPP and desalination installation (nuclear desalination). Nowadays, there are several nuclear desalination that are commercially in operation and using several nuclear reactor types as heat source, such as : LWR (PWR dan BWR), LWR (PWR dan BWR), although there is also possibility the use of other reactor types, such as: HTGR, HWR and others. The desalination technology has already commercially operated and in the large-scale production, namely: multi-stage flash (MSF) and multi-effect distillation (MED) for thermal process, reverse osmosis (RO) for membrane process, and hybrid technologies, such as: MED-RO, MSF-RO and MED-RO-TVC. In order to analyze configurations for coupling system of NPP and desalination installation in order to get optimum water cost (lowest cost) by considering economic, safety and technology aspects. Study is done by comparing several coupling configurations: PWR-RO, PWR-MED, PWR-MSF, PWR-MED-RO, PWR-MSF-RO, PWR-MED-RO-TVC, HTGR-RO, HTGR-MED, HTGR-MSF, HTGR-MED-RO, HTGR-MSF-RO, HTGR-MED-RO-TVC. Simulation is done by using DEEP-4 programme, thermal power reactor: 330 MWth, water production capacity 40.000 m³/day, seawater temperature 28.9°C, TDS 30.000 ppm and discount rate 10%. The result showed that water cost of HTGR-MED-RO coupling configuration is lower than another coupling configurations.*

Keywords: configuration, coupling, desalination, nuclear, NPP

1. PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan yang sangat vital dalam kehidupan manusia. Air dimanfaatkan manusia sebagai bahan baku air minum, mencuci, mandi, dan kebutuhan lainnya. Ketersediaan air di dunia begitu melimpah, namun hanya sebagian kecil saja yang dapat dimanfaatkan, yaitu kira-kira hanya 0,003%. Sebagian besar air (~ 97%), ada di samudera atau laut, dan kadar garamnya terlalu tinggi untuk kebanyakan keperluan dan sisanya yang ada tersimpan dalam lapisan kutub atau sangat dalam di bawah tanah^[1]. Meningkatnya populasi manusia, berakibat semakin besar pula kebutuhan akan air bersih, sehingga ketersediaannya semakin berkurang. Di samping itu, kerusakan lingkungan juga merupakan salah satu penyebab berkurangnya sumber air bersih. Terkait dengan kondisi di Indonesia pada umumnya, hingga saat ini kebutuhan air bersih dipasok dari PDAM, air tanah, air sungai, danau dan air laut. Namun demikian, pasokan tersebut masih belum mencukupi kebutuhan air bersih penduduk Indonesia. Sebagai gambaran, kapasitas produksi air bersih di daerah perkotaan hingga saat ini rata-rata baru mencapai 105 m³/detik atau 40% dari kapasitas produksi yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan air bersih yakni 250 m³/detik^[2].

Pada umumnya terdapat beberapa metode yang bisa dilakukan untuk mendapatkan air bersih, seperti filtrasi, distilasi, evaporasi dan penukar ion. Desalinasi merupakan proses memisahkan garam dan mineral terlarut dalam air laut. Beberapa teknologi desalinasi sudah digunakan berdasarkan prinsip pemisahan yang berbeda. Beberapa dari teknologi desalinasi tersebut sudah dikembangkan secara sukses dan beberapa diantaranya sudah beroperasi secara komersial. Proses desalinasi air laut komersial yang sudah terbukti dan andal untuk produksi skala besar adalah MSF (*Multi-Stage Flash Distillation*) dan MED (*Multiple-Effect Distillation*) untuk distilasi proses termal, RO untuk proses membran dan sistem hibrid (MSF-RO atau MED-RO) serta yang masih dalam pengembangan adalah TVC (*Thermal Vapor Compression*). TVC merupakan teknologi desalinasi yang menjanjikan rasio konversi yang lebih tinggi. Energi utama yang digunakan adalah dalam bentuk energi termal dengan temperatur 100-130°C, namun akhir-akhir ini dikembangkan teknologi desalinasi menggunakan temperatur rendah (70°C). Teknologi desalinasi menggunakan temperatur rendah dipandang lebih menguntungkan karena dapat menurunkan korosifitas material. Keempat proses desalinasi tersebut mempunyai kelebihan dan kekurangan, namun sebagian besar kapasitas desalinasi dunia (53%) dipasok dari proses desalinasi menggunakan proses RO.

Semua teknologi desalinasi membutuhkan energi (termal dan/ atau listrik) dan semua tipe reaktor nuklir (PWR, BWR, HWR dan HTGR) dapat menyediakan panas/ listrik yang dibutuhkan untuk berbagai proses desalinasi. Jumlah energi listrik dan/atau panas) yang dibutuhkan untuk desalinasi dapat dipasok dengan uap kualitas rendah dan/ atau listrik yang diproduksi pembangkit listrik tenaga batubara/ minyak, seperti: PLTU atau PLTN.

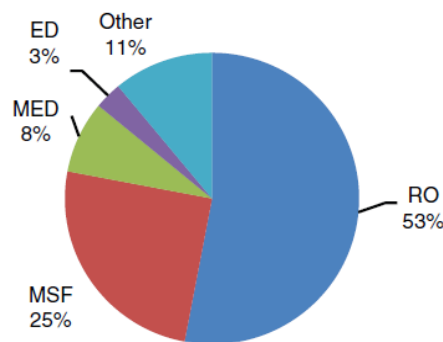
Pemanfaatan panas nuklir untuk proses desalinasi membutuhkan sistem kopling yang merupakan interface antara PLTN (reaktor) dengan instalasi desalinasi. Beberapa instalasi desalinasi nuklir sudah beroperasi di beberapa negara, seperti: USA, Jepang, Rusia, India, Pakistan dan Kazakstan^[3]. Studi yang telah dilakukan di beberapa negara menunjukkan bahwa reaktor nuklir daya kecil dan menengah (SMR) sangat potensial sebagai pilihan kopling untuk sistem desalinasi nuklir. Tujuan studi mendapatkan konfigurasi kopling yang optimum berdasarkan biaya air yang dihasilkan dengan memperhatikan aspek teknologi dan keselamatan menggunakan program DEEP-4 . Terdapat beberapa variabel yang berpengaruh terhadap biaya air desalinasi, seperti: kapasitas produksi, *discount rate*, teknologi desalinasi yang digunakan, jenis pembangkit panas dan MBT (*Maximum Brine Temperature*). Program DEEP (*Desalination Economic*

Evaluation Program) merupakan program yang digunakan untuk mendukung perhitungan ekonomi desalinasi metode MSF, MED, RO maupun hibrid yang merupakan hasil kopling dengan PLTN ataupun dengan PLTU batubara dan minyak bumi.

2. METODOLOGI

2.1. Deskripsi Teknologi Desalinasi

Pada dasarnya, teknologi desalinasi dibagi menjadi 2 jenis, yaitu teknologi desalinasi termal dan teknologi membran. Kedua jenis teknologi tersebut adalah *multi-stage flash distillation* (MSF), *multi-effect distillation* (MED) dan *vapour compression* (VC) yang merupakan teknologi desalinasi termal dan *electrodialysis* (ED) dan *Reverse Osmosis* (RO) yang termasuk teknologi membran. Kedua jenis teknologi tersebut membutuhkan energi (termal/ listrik). Namun, teknologi desalinasi yang sudah digunakan secara komersial adalah MSF dan MED untuk proses termal, RO untuk proses membran dan hibrid yang merupakan integrasi dari teknologi membran dan termal, seperti MED-RO dan MSF-RO. Selanjutnya, terdapat teknologi desalinasi komersial lainnya yang aplikasinya sangat sedikit terkait ukuran unit yang kecil, seperti VC atau teknologi desalinasi yang diaplikasikan pada salinitas rendah seperti *electro dialysis* (ED). Gambar 1 menunjukkan kapasitas desalinasi global menurut proses yang digunakan, yaitu kapasitas desalinasi menggunakan proses membran menempati bagian yang terbesar (53%), dan selanjutnya diikuti oleh MSF 25% dan MED 8%, ED 3% dan lain-lain sebesar 11%.



Gambar 1. Kapasitas Desalinasi Dunia Menurut Proses Yang Digunakan^[4]

2.1.1. Teknologi Termal

Teknologi termal berbasis pada konsep penggunaan proses distilasi dan evaporasi. Hampir 40% air hasil desalinasi dunia diproduksi menggunakan energi panas, yaitu air dipanaskan sampai titik didihnya (temperatur 100°C) pada kondisi atmosfer, namun seiring menurunnya tekanan, titik didih akan menurun. Sebagai gambaran pada seperempat dari tekanan normal, air akan mendidih pada temperatur 65°C dan pada kondisi sepersepuluh dari tekanan normal, air akan mendidih hanya pada temperatur 45°C. Untuk mengambil keuntungan dari prinsip ini, sistem dirancang untuk "*multiple boiling*" dalam rangkaian *effect* yang beroperasi berturut-turut pada temperatur dan tekanan yang lebih rendah.

Konsep distilasi air dengan *effect* yang beroperasi pada tekanan rendah sudah diaplikasikan dengan baik selama lebih dari satu abad. Hingga saat ini, MSF dan MED merupakan teknologi desalinasi termal utama yang sudah beroperasi secara komersial. MSF merupakan teknologi desalinasi termal yang terbukti paling andal dan sudah mendominasi pasar desalinasi termal selama 1980s sampai 1990s. Namun, dengan adanya perbaikan dalam teknologi RO, akhir-akhir ini instalasi yang menggunakan teknologi MSF cenderung

menurun yaitu hanya 25% dari total kapasitas dunia (Gambar 1). Namun, MSF masih mendominasi teknologi termal, khususnya di daerah Gulf, dimana terdapat 45 instalasi MSF, 32 instalasi MED, dan 41 instalasi RO di daerah Gulf⁽⁴⁾. MSF dapat memproduksi air bersih kualitas tinggi dengan konsentrasi garam yang sangat rendah (~10 ppm) dari konsentrasi garam dengan TDS 60,000 - 70,000 ppm, hampir 2 kali salinitas air laut. *Maximum brine temperature* (MBT, temperatur konsentrat garam yang meninggalkan *brine heater*) merupakan faktor utama dalam desain unit MSF.

Proses MED berlangsung dalam beberapa bejana atau *effect* dengan menggunakan prinsip evaporasi dan kondensasi pada tekanan ambang yang menurun. Biasanya setelah dilakukan pemanasan awal air umpan, selanjutnya air disemprotkan pada permukaan evaporator (*tubes*) dan dipanaskan sampai mencapai titik didihnya. Permukaan evaporator dalam *effect* pertama dipanaskan oleh *steam* dari *steam turbine* pembangkit listrik atau *boiler* dimana jumlah *steam* yang terkondensasi sesuai jumlah air yang disemprotkan pada evaporator dan menguap. Uap (*steam*) dari *effect* pertama digunakan untuk memanaskan permukaan *effect* berikutnya. Uap yang telah diproduksi dalam *effect* terakhir dikondensasikan dalam kondensor terakhir. Tidak semua air dikonversi menjadi *steam*, dalam setiap *effect* air yang tersisa membentuk larutan garam. Instalasi MED menggunakan sistem vakum untuk menjaga tekanan ambang yang berbeda dalam *effect* yang berbeda.

Pada aplikasi instalasi MED mendatang sebuah siklus kompresi termal uap (*vapor thermal compression cycle*) ditambahkan ke dalam instalasi untuk mengurangi jumlah *effect* dan luas permukaan yang dibutuhkan. MED sudah lama digunakan di beberapa proses industri dan mampu memproduksi air dengan kemurnian yang sama dengan MSF. Namun, pada dekade yang lalu MED gagal dalam berkompetisi dengan MSF sehubungan adanya masalah pergerakan. Perbaikan terhadap teknologi MED terus dilakukan, efisiensi proses MED dapat ditingkatkan dengan menambahkan sistem TVC (*Thermal Vapor Compression*) yang berfungsi untuk menaikkan tekanan, dimana fraksi uap dari *effect* terakhir masuk dan di kompres dengan satu atau dua *steam jet ejector*. Akhir-akhir ini, desain baru MED dengan pengoperasian pada MBT yang lebih rendah (~ 70°C) dan penggunaan TVC menjadi solusi untuk mengatasi korosi dan berimplikasi pada penggunaan material yang lebih murah. Kebutuhan energi listrik MED lebih rendah dari pada MSF dan sebagai akibatnya MED mulai dapat berkompetisi dengan MSF.

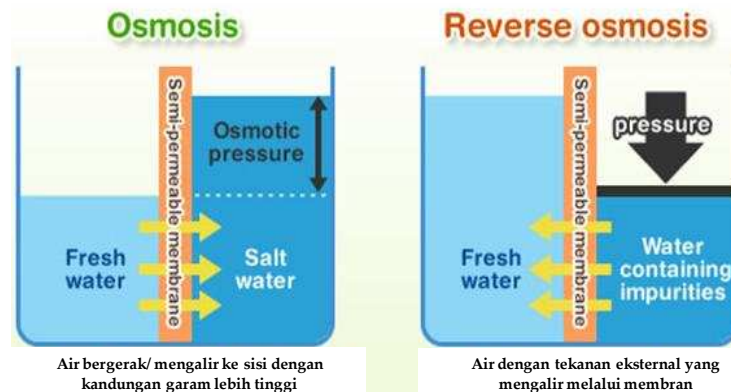
Proses desalinasi termal sering dipengaruhi oleh terbentuknya kerak yang terjadi bila zat kimia seperti karbonat dan sulfat di dalam air laut mengendap sehingga menyebabkan masalah mekanik dan panas. Kerak sulit dihilangkan dan dapat berakibat mengurangi efektivitas dari operasi desalinasi karena menghambat aliran, mengurangi perpindahan panas dan melapisi permukaan membran. Akhirnya pergerakan akan menyebabkan peningkatan biaya. Karena itu untuk memperlambat pembentukan kerak, maka temperatur dan titik didih perlu dijaga pada kondisi rendah. Desalinasi termal sudah mendominasi pasar desalinasi, khususnya di Timur Tengah. Pembentukan kerak harus dihindari karena fenomena ini akan mengurangi perpindahan panas yang berakibat konsumsi energi lebih tinggi dan kapasitas produksi lebih rendah. Pembentukan kerak dapat dikontrol melalui (i) tingkat konsentrasi air laut (ii) tingginya temperatur operasi alat (saat ini yang umum digunakan adalah 65°-80°C); atau (iii) menambahkan zat anti kerak *sulphuric acid*.

2.1.2. Reverse Osmosis (RO)

Reverse Osmosis (RO) merupakan proses menggerakkan/ mengalirkan air dari daerah/bagian dengan konsentrasi larutan tinggi menuju bagian/daerah konsentrasi rendah melalui membran menggunakan tekanan yang lebih besar dari tekanan osmotik. Proses berbasis pada prinsip osmosis dan membutuhkan membran untuk memisahkan garam dari

air laut. Proses RO terdiri dari sumber air umpan, pretreatment air umpan, pompa tekanan tinggi, membran RO. Mekanisme proses *reverse osmosis* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 menggunakan membran *semi permeable* untuk memisahkan garam dari air laut^[5]. Membran akan menahan garam, virus, mikro organisme dan bahan-bahan pengotor lainnya, sementara air hasil desalinasi mendifusi melalui membran. Air laut ditekan sampai diatas tekanan osmotiknya untuk menyediakan daya dorong proses. Dalam proses *reverse osmosis*, pertama dilakukan *pre-treatment* pada air laut untuk menghilangkan partikel yang akan menyumbat membran. Selanjutnya air laut dipompa dengan tekanan tinggi melalui membran untuk memisahkan garam dari air. Tekanan yang dibutuhkan yaitu sekitar 2-17 bar (30-250 psi) untuk air tawar dan payau, dan 40-70 bar (600-1000 psi) untuk air laut^[6]. Air payau mempunyai tekanan osmotik yang lebih rendah dibandingkan air laut, karena itu pada proses desalinasi membutuhkan energi yang lebih sedikit.

Membran RO membuang garam terlarut (ion) pada laju yang berbeda (tergantung pada berat atom dan valensi). Pada umumnya, laju pembuangan adalah lebih dari 99% untuk membran RO air laut dan lebih besar dari 97% untuk membran air payau. Proses desalinasi RO menggunakan energi lebih sedikit dibanding proses termal. Energi listrik hanya dibutuhkan untuk menggerakkan pompa tekanan tinggi untuk mengatasi tekanan osmotik air laut. Jumlah air desalinasi yang diproduksi dari proses *reverse osmosis* air laut sekitar 40-45% dari aliran air umpan. Oleh karena itu, sekitar 55-60% air umpan dikembalikan ke laut.



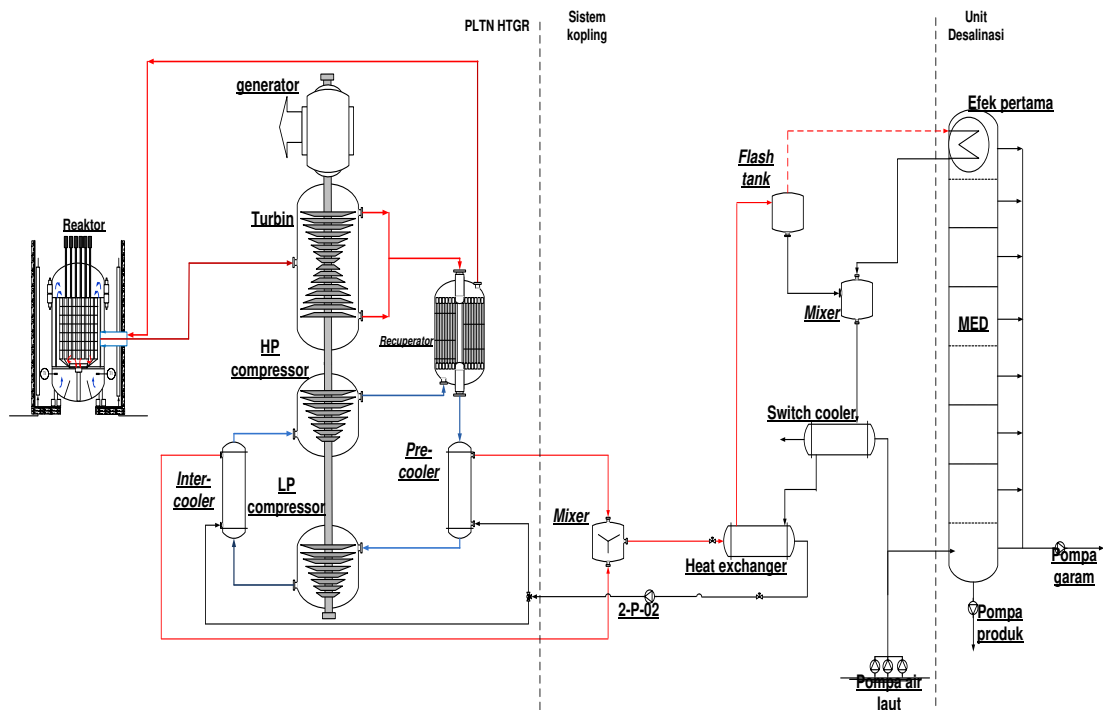
Gambar 2. Mekanisme Osmosis dan *Reverse Osmosis*^[5]

Sejak akhir tahun 1960, RO merupakan proses membran yang dikembangkan sebagai pemasok air desalinasi. Desalinasi proses membran merupakan teknologi yang *proven*, diaplikasikan secara komersial untuk mengurangi salinitas untuk air minum dan aplikasi industri yang memerlukan air dengan kemurnian tinggi, seperti industri kimia, komponen elektronik, farmasi, aplikasi medis dan air umpan *boiler*. Oleh karena itu, RO dipandang menjadi teknologi yang telah sukses digunakan untuk daerah yang mengalami kesulitan air. RO dapat diaplikasikan untuk desalinasi air permukaan ataupun air tanah. Kemajuan dalam manufaktur membran membuat RO menjadi proses terkemuka di pasar desalinasi air di seluruh dunia. Konsumsi energi proses desalinasi RO paling rendah diantara metode desalinasi komersial lainnya. Sedangkan kualitas air yang di produksi tergantung pada tekanan dan konsentrasi garam dalam air umpan. Kualitas air produk dari instalasi *reverse osmosis* dapat ditingkatkan dengan menambahkan tahapan pada proses membran.

2.1.3. Sistem Kopling Termal PLTN

Semua tipe reaktor nuklir/ PLTN mampu menyediakan energi listrik dan/atau panas untuk instalasi desalinasi. Oleh karena itu, PLTN dapat dikopel dengan instalasi desalinasi atau industri yang membutuhkan panas proses yang kemudian disebut dengan reaktor/ PLTN kogenerasi.

PLTN HTGR menggunakan Siklus Bryton dengan gas helium sebagai fluida kerjanya. Pada sistem kopling seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, helium keluar dari reaktor pada temperatur 850°C (71,2 bar) melalui *hot gas duct* kemudian diekspansikan dengan memutar turbin. Putaran turbin gas secara langsung memutar generator dan dua buah kompresor (tekanan tinggi/*high pressure compressor* dan tekanan rendah/*low pressure compressor*).



Gambar 3. Kopling Sistem Reaktor HTGR dengan Instalasi Desalinasi

Setelah diekspansikan, helium 510°C (26,6 bar) bertukar panas dengan helium yang akan kembali ke reaktor melalui *high effective Recuperator*. Alasan termodinamik, helium didinginkan terlebih dahulu di dalam *pre-cooler* sebelum ditekan di dalam kompresor, hingga mencapai temperatur helium 26°C. Helium dinaikkan tekanannya hingga sesuai dengan kondisi operasi reaktor 105°C (72,4 bar), menggunakan dua buah kompresor yang di antara keduanya dilengkapi dengan *intermediate cooler (inter-cooler)*. Sistem pembuangan panas pada *pre* dan *inter-cooler* menggunakan air sebagai media pendingin. Helium kemudian masuk ke *high effective recuperator* dan menerima panas hingga 490°C (72,4 bar). Setelah *recuperator* helium mengalir menuju reaktor untuk menerima panas dari reaksi inti di dalam teras reaktor. Sedangkan pada PLTN PWR digunakan siklus *Rankine* dengan air sebagai fluida kerja, siklus ini juga digunakan sebagai standar untuk instalasi pembangkit daya lain yang menggunakan air sebagai fluida kerja.

PLTN HTGR atau PWR kogenerasi dengan desalinasi terdiri dari tiga sistem yang saling terkait: PLTN HTGR, sistem kopling dan instalasi desalinasi proses termal. Sistem kopling yang dapat diterapkan pada PLTN dan/atau Pembangkit Listrik lainnya terdiri dari

dua jenis yaitu kopling listrik dan kopling termal. Sistem kopling PLTN dengan desalinasi berbasis membran merupakan sistem kopling listrik “*electric coupling*”, sistem ini lebih sederhana dibanding dengan sistem kopling termal pada desalinasi proses termal. Sistem kopling listrik hanya berupa koneksi listrik antara PLTN atau Pembangkit Listrik lainnya dengan instalasi desalinasi berbasis membran. Sementara itu sistem kopling termal pada PLTN PWR atau Pembangkit Listrik lainnya memanfaatkan uap panas dari sistem sekunder sehingga berakibat pada berkurangnya listrik yang diproduksi, potensi kehilangan produksi listrik tergantung pada optimalisasi skema sistem yang dilakukan.

Berbeda dengan PLTN PWR atau PLTU, sistem kopling termal PLTN HTGR dapat memanfaatkan panas sisa (*waste heat*) dari siklus helium, sehingga skema sistem kopling termal yang ditawarkan PLTN HTGR tidak akan mengganggu produksi listrik dari PLTN. Panas sisa yang dimaksud adalah panas sisa dari dua buah alat penukar panas pada PLTN HTGR yaitu *pre-cooler* dan *inter-cooler*. *Pre-cooler* adalah alat penukar panas yang bertugas menurunkan temperatur helium sebelum dinaikan tekanannya pada *Low pressure compressor*. Sedangkan *inter-cooler* (*intermediate cooler*) adalah alat penukar panas yang berada di antara dua buah kompresor (*low pressure dan high pressure compressor*).

Energi panas yang dihasilkan oleh *pre-cooler* dan *inter-cooler* pada PLTN HTGR berturut-turut adalah 171,6 MW_{th} dan 134,3 MW_{th}. Jika media pendingin dari ke dua alat penukar panas tersebut dicampur, maka energi termal yang dihasilkan diharapkan mencapai ± 305 MW_{th}, yang secara teoritis cukup untuk memasok kebutuhan panas untuk proses termal desalinasi dengan kapasitas ± 500,000 m³/hari untuk desalinasi tipe *Multiple effect Distillations (MED)* dan kapasitas ± 100,000 m³/hari untuk tipe *Multi-stage flash distillation (MSF)*. Temperatur keluaran fluida pendingin pada kedua penukar panas dapat berkisar 100-130°C. Kondisi pada kisaran temperatur tersebut ideal untuk proses desalinasi tipe MED, yang dapat dikopling diantara unit *mixer* (alat pencampur fluida pendingin dari *pre-cooler* dan *inter-cooler*) dan unit pendingin cadangan (*switch cooler*).

2.2. Program DEEP-4 (Desalination Economic Evaluation Programme Version 4.)

DEEP (*Desalination Economic Evaluation Programme*) merupakan program yang dikembangkan IAEA dan digunakan untuk mengevaluasi biaya dan kinerja dari berbagai konfigurasi dari sistem kogenerasi air dan listrik. Program DEEP terus dikembangkan dan DEEP versi terbaru adalah DEEP. 4 merupakan penyempurnaan dari versi sebelumnya. DEEP versi baru ini menekankan pada kemudahan penggunaan untuk menganalisis ekonomi dari kopling berbagai jenis pembangkit (pembangkit gas, uap, siklus kombinasi), berbagai bahan bakar (batubara, minyak, nuklir) dan berbagai teknologi desalinasi (*Multi-Effect Distillation (MED)*, *Multi-Stage Flash (MSF)*, *Reverse Osmosis (RO)* serta sistem hibrid. Program ini juga meliputi perumusan dari berbagai alternatif seperti *intermediate loop*, *back up heat*, berbagai konfigurasi turbin, biaya transport air dan *carbon tax*.

2.3. Data Input :

- PLTN (PWR, HTGR) dan PLTU (batubara, minyak) dengan daya thermal: 330 MW_{th}
- Kapasitas Produksi: 40.000 m³/hari
- Teknologi Desalinasi: MED-RO (70%-30%)
- TDS (Total Dissolved Solid): 30.000 ppm
- Temperatur Air Laut: 28,9°C
- Discount Rate: 10%
- Interest Rate: 5%
- Top Brine Temperature (TBT): 70°C untuk MED dan 110°C untuk MSF
- Efisiensi termal untuk reaktor tipe PWR: 35% dan reaktor tipe HTGR: 45%

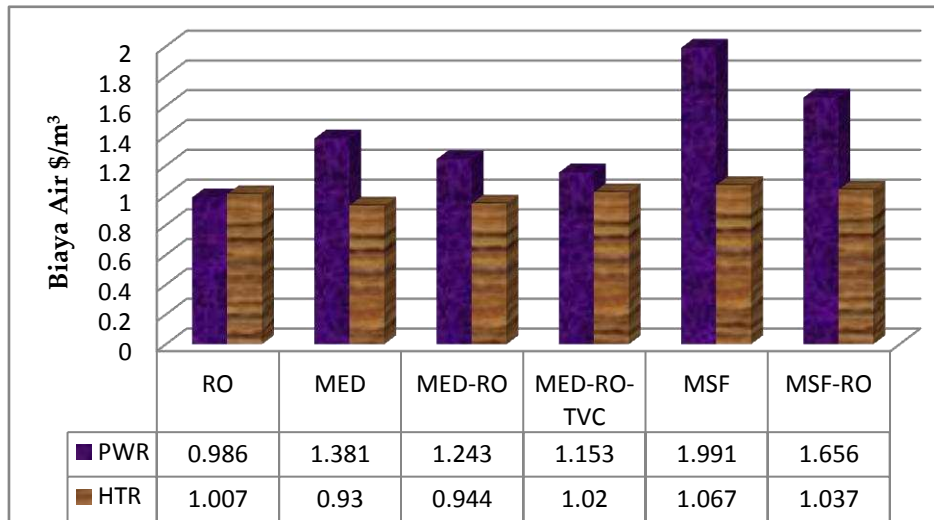
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil menunjukkan bahwa terdapat 2 jenis teknologi desalinasi yang sudah beroperasi secara komersial, yaitu teknologi termal (MSF dan MED), teknologi membran (RO, VC) serta teknologi hybrid (MED-RO). Teknologi desalinasi termal merupakan teknologi yang membutuhkan energi panas untuk proses dan listrik (pemompaan). Sedangkan teknologi desalinasi membran hanya membutuhkan energi listrik pada proses desalinasinya. Jumlah energi yang dibutuhkan untuk proses desalinasi diperoleh dari uap kualitas rendah dan /atau listrik yang dihasilkan oleh PLTN. Namun demikian kedua jenis teknologi tersebut membutuhkan energi (panas dan/ listrik) dengan jumlah yang berbeda, dimana hal itu akan berpengaruh pada biaya air dari proses desalinasi. Reaktor kogenerasi dapat memasok energi untuk proses desalinasi baik dalam bentuk panas ataupun listrik. Pada dasarnya, terdapat beberapa faktor yang berpengaruh terhadap biaya air desalinasi, yaitu jenis reaktor sebagai sumber panas, teknologi desalinasi, kapasitas desalinasi, kualitas air umpan yang ditunjukkan dengan TDS (*Total Dissolved Solid*), dan *maximum brine temperature*.

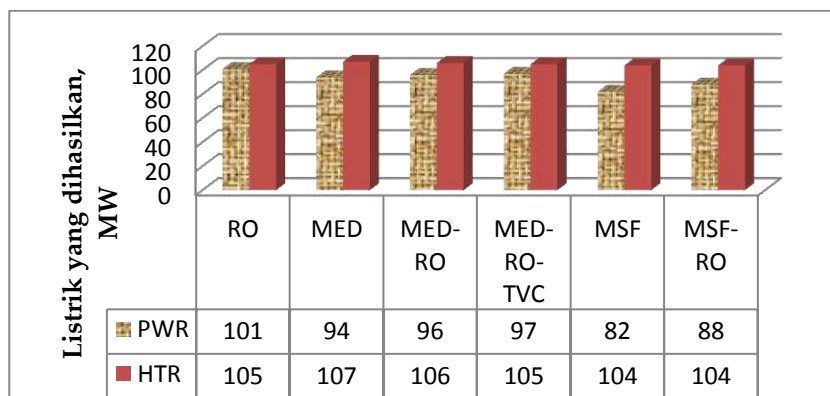
Hasil simulasi menggunakan program DEEP-4 ditunjukkan pada Gambar 4, hasil terlihat bahwa biaya air hasil kopling instalasi desalinasi dengan reaktor tipe HTGR relatif lebih rendah dibanding hasil kopling dengan reaktor jenis PWR. Hal ini disebabkan pada kopling dengan reaktor HTGR, energi (panas/ listrik) untuk proses desalinasi menggunakan panas lebih (*excess/ waste heat*) dari reaktor (PLTN) setelah panas nuklir digunakan untuk produksi listrik, sedangkan pada kopling dengan reaktor jenis PWR, energi (panas dan/ listrik) yang digunakan adalah mengambil sebagian energi yang digunakan untuk memproduksi listrik. Namun demikian keadaan pada PLTN tipe HTGR ini akan dibatasi oleh panas lebih reaktor. Kapasitas produksi air tinggi sehingga panas lebih (*excess*) dari HTGR tidak dapat mencukupi keperluan proses tersebut, dan mengakibatkan biaya air hasil kogenerasi reaktor HTGR dengan instalasi desalinasi akan menjadi lebih murah pada kapasitas produksi air tertentu.

Ditinjau dari konfigurasi PLTN dan instalasi desalinasi (Gambar 4), biaya air terendah diperoleh dari konfigurasi kopling antara reaktor tipe HTGR dengan proses desalinasi MED, yaitu 0,93 \$/m³, sedangkan terendah ke dua (0,944 \$/m³) adalah hasil konfigurasi reaktor tipe HTGR dengan proses desalinasi MED-RO. Namun, mengingat TDS air yang diperoleh dari proses MED relatif rendah (25 ppm) dan TDS air hasil desalinasi proses RO adalah 243 ppm, sedangkan kebutuhan air akan digunakan untuk memasok air minum (TDS air minum adalah < 1000 ppm) dan industri yang memerlukan air dengan kemurnian tinggi, seperti industri kimia, komponen elektronik, farmasi, aplikasi medis dan air umpan *boiler*, maka konfigurasi reaktor tipe HTGR dan proses desalinasi hibrid (MED-RO) merupakan pilihan tepat untuk memasok air di daerah yang mengalami defisit air bersih. Hal ini diperjelas pada Gambar 5. yang menunjukkan daya listrik yang dihasilkan dari reaktor kogenerasi tipe PWR dan HTGR.

Gambar 5 menunjukkan bahwa daya listrik yang diproduksi dari reaktor kogenerasi tipe HTGR lebih tinggi dibandingkan reaktor tipe PWR, listrik yang dihasilkan dari konfigurasi PLTN tipe PWR dengan proses desalinasi MED adalah 94 MWe dan 96 MWe dari hasil konfigurasi dengan proses desalinasi MED-RO, sedangkan listrik yang dihasilkan dari konfigurasi PLTN tipe HTGR dengan proses desalinasi MED adalah 107 MWe dan 106 MWe dari hasil konfigurasi dengan proses desalinasi MED-RO. Hal ini menunjukkan bahwa pada reaktor kogenerasi tipe HTGR, panas yang digunakan untuk proses desalinasi diperoleh dari panas lebih dan tidak mengambil panas yang digunakan untuk produksi listrik. Hal ini berbeda dengan tipe reaktor PWR.



Gambar 4. Perbandingan Biaya Air Berbasis Teknologi Desalinasi dan Tipe Reaktor

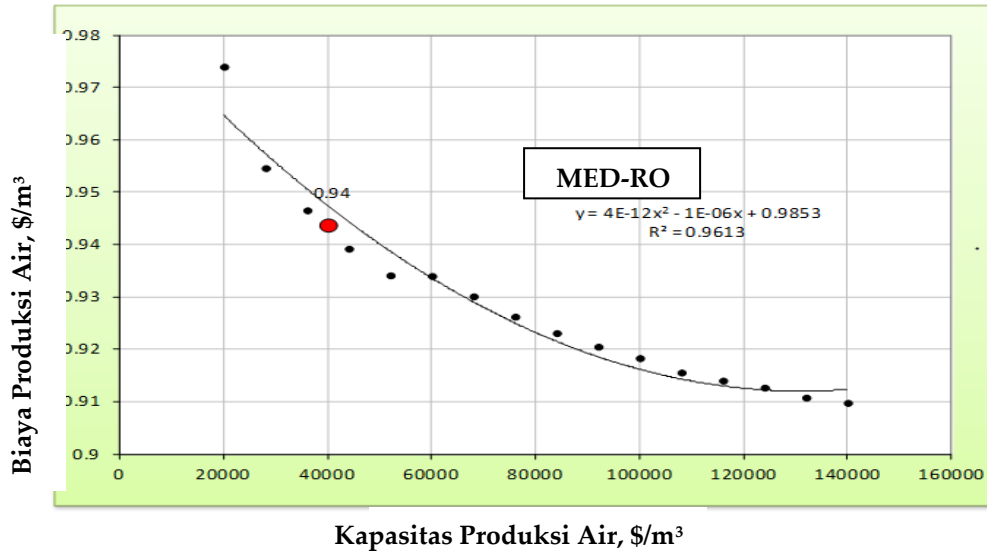


Gambar 5. Pengaruh Tipe Reaktor Kogenerasi terhadap Listrik yang Dihasilkan

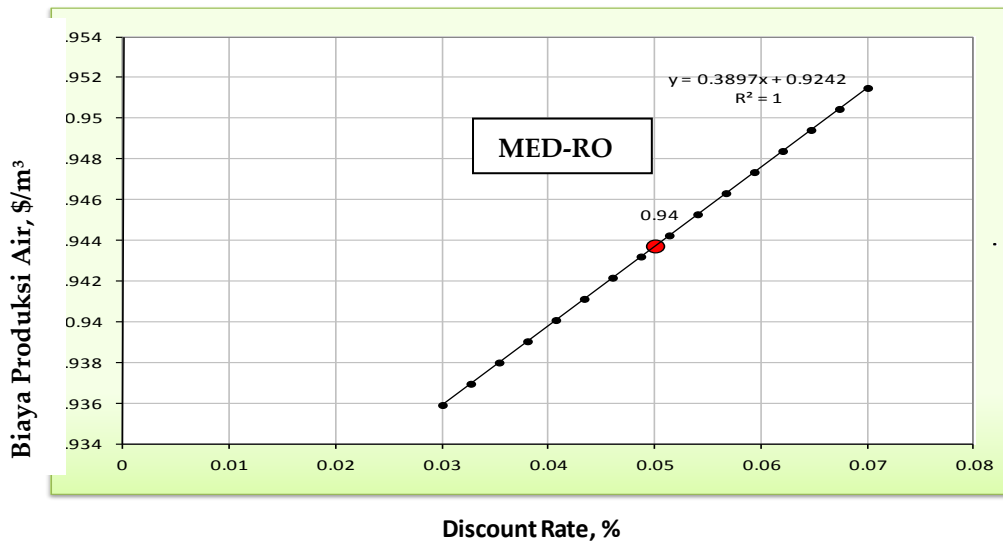
Selain jenis reaktor, biaya air juga dipengaruhi oleh kualitas air umpan seperti : TDS dan *Maximum Brine Temperature* (MBT).

Kualitas air umpan yang ditunjukkan dengan nilai TDS (*Total Dissolved Solid*) juga berpengaruh terhadap biaya air, makin tinggi TDS, makin tinggi pula biaya air desalinasi. Hal ini disebabkan proses desalinasi air umpan dengan konsentrasi TDS rendah, akan membutuhkan energi yang lebih sedikit untuk *treatment* dibanding air umpan TDS tinggi. Selain itu, air umpan TDS rendah memungkinkan tingkat konversi yang lebih tinggi pada instalasi sehingga dapat beroperasi menggunakan bahan kimia anti karat dengan konsentrasi yang lebih rendah. Instalasi desalinasi memproduksi air dengan nilai TDS berkisar 1-50 ppm untuk proses termal dan TDS berkisar antara 10-500 ppm untuk teknologi RO. Sedangkan menurut WHO (*World Health Organization*), nilai TDS untuk air minum adalah < 1000 ppm. Air produk desalinasi lebih murni dibanding air standard untuk air minum.

Pengaruh kapasitas desalinasi terhadap biaya produksi air ditunjukkan pada Gambar 6, yaitu biaya produksi air akan menurun dengan meningkatnya kapasitas desalinasi. Meskipun instalasi dengan kapasitas besar akan membutuhkan biaya modal awal yang tinggi, karena penggunaan pompa, tangki penyimpanan air dan sistem distribusi air yang lebih besar. Namun demikian efek-efek ini akan diimbangi dengan modularitas sistem dan skala ekonomi.

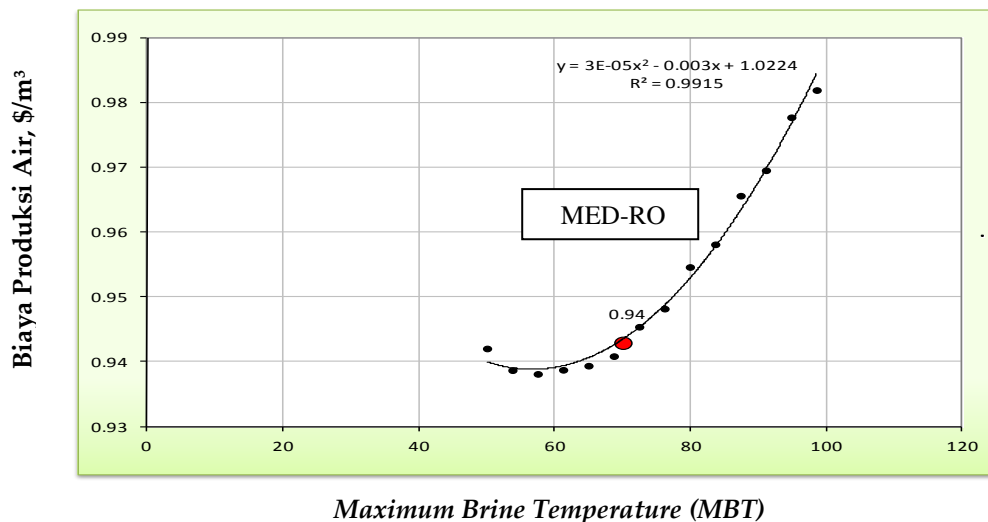


Gambar 6. Sensitivitas Kapasitas Air terhadap Biaya Air Desalinasi



Gambar 7. Sensitivitas *Discount Rate* terhadap Biaya Produksi Air

Gambar 7 menunjukkan sensitivitas biaya produksi air terhadap *discount rate*, yaitu biaya produksi air meningkat dengan makin meningkatnya *discount rate*. Pengaruh *Maximum Brine Temperature* (MBT) terhadap biaya produksi air ditunjukkan pada Gambar 8, yaitu meningkatnya MBT akan meningkat pula biaya produksi air. Hal ini disebabkan: (i) makin tinggi nilai MBT akan mempermudah terbentuknya kerak dan mempengaruhi menurunnya perpindahan panas, sehingga proses memerlukan energi yang lebih tinggi, (ii) makin tinggi nilai MBT akan diperlukan *steam* dengan temperatur yang lebih tinggi. Makin tinggi MBT, makin tinggi pula biaya produksi air desalinasi, walaupun dewasa ini ada teknologi MED yang dapat mengatasi masalah tersebut.



Gambar 8. Sensitivitas MBT terhadap Biaya Produksi Air

4. KESIMPULAN

Hasil analisis yang dilakukan terhadap konfigurasi kopling PLTN (PWR, HTGR) dan instalasi desalinasi (RO, MED, MED-RO, MED-RO-TVC, MSF, MSF-RO) dengan berbasis pada biaya air menunjukkan bahwa biaya air yang terendah adalah konfigurasi kopling PLTN tipe HTGR dengan instalasi desalinasi MED. Namun demikian, pertimbangan pasokan air desalinasi untuk air minum dan proses industri yang membutuhkan air kemurnian tinggi, yaitu TDS air hasil proses desalinasi MED relatif rendah (25 ppm) dan TDS air hasil desalinasi proses RO 243 ppm, maka konfigurasi reaktor tipe HTGR dengan proses desalinasi hibrid (MED-RO) merupakan pilihan tepat sebagai pemasok air bersih.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. _____, "Air Bersih", http://id.wikipedia.org/wiki/Air_bersih, 21 Maret 2011, diakses 4 Juli 2011.
- [2]. _____, "Kapasitas Produksi Air bersih baru 40%", www.hydro.co.id, 5 Juli 2011, diakses 6 Juli 2011.
- [3]. MAJUMDAR D, "Desalination and Other Non-Electric Applications of Nuclear Energy", Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors: Physics, Design and Safety, Trieste, 25 February – 28 March 2002.
- [4]. MEZHER T, FATH H, ABBAS Z, KHALED A, "Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies, desalination". Elsevier 266 p.263-273, 2011.
- [5]. _____, "Reverse osmosis", http://www.thefullwiki.org/Reverse_osmosis. diakses 23 Februari 2011.
- [6]. _____, "Desalination", http://www.hitachi.com/environment/showcase/solution/industrial/desalination_plant.htm, diakses 23 Februari 2011.