

ANALISIS PENGARUH LAJU ALIR MASSA PENDINGIN TERHADAP KINERJA SISTEM KONVERSI ENERGI RGTT200K

Ign. Djoko Irianto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN

Kawasan Puspipstek Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan 15310

email: igndjoko@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH LAJU ALIR MASSA PENDINGIN TERHADAP KINERJA SISTEM KONVERSI ENERGI RGTT200K. RGTT200K adalah Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT) berdaya termal 200 MW berpendingin helium dengan tekanan *outlet* reaktor 5,0 MPa. Reaktor ini didesain dengan konsep kogenerasi untuk pembangkit listrik, produksi hidrogen dan desalinasi air laut. Salah satu kelengkapan desain konseptual RGTT200K adalah desain sistem konversi energi yang mencakup, antara lain, analisis kinerja sistemnya. Dalam makalah ini diuraikan hasil analisis pengaruh laju alir massa pendingin terhadap kinerja sistem konversi energi RGTT200K. Analisis dilakukan dengan cara menghitung parameter kinerja sistem konversi energi dengan varian laju alir massa pendingin dari 105 kg/s hingga 140 kg/s pada kondisi daya termal reaktor 200 MW. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program komputer ChemCAD. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin tinggi laju alir massa pendingin maka temperatur keluaran reaktor menurun. Dampak penurunan temperatur keluaran reaktor adalah penurunan daya termal yang ditransfer dari IHX untuk produksi hidrogen, sementara daya untuk pembangkit listrik dan untuk proses desalinasi naik. Kenaikan laju alir massa pendingin reaktor juga menyebabkan kenaikan nilai efisiensi termal untuk pembangkit listrik dan nilai faktor pemanfaatan energi (*Energy Utilization Factor - EUF*) secara keseluruhan, sedangkan faktor pemanfaatan energi untuk produksi hidrogen menurun. Pada laju alir massa pendingin 120 kg/s diperoleh nilai EUF sebesar 78,99%, daya termal untuk produksi hidrogen sebesar 62,06 MW dan daya termal untuk pembangkit listrik sebesar 77,94 MW. Dengan demikian, untuk pertimbangan desain operasi, kapasitas produksi hidrogen dan pembangkit listrik dapat ditentukan dengan cara mengatur laju alir massa pendingin.

Kata kunci: RGTT200K, sistem konversi energi, laju alir massa pendingin, efisiensi termal, EUF

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF COOLANT MASS FLOWRATE ON THE PERFORMANCE OF RGTT200K ENERGY CONVERSION SYSTEM. RGTT200K is the High Temperature Gas-cooled Reactor (RGTT) with 200 MW thermal power generation. This reactor employs helium gas as coolant with 5.0 MPa operating pressure. This reactor is designed with cogeneration concept for electricity generation, hydrogen production and for sea water desalination. One of the completeness of RGTT200K conceptual design is the design of energy conversion system that includes, among others, the system performance analysis. In this paper described the analysis results of the influence of coolant mass flow rate on the performance of RGTT200K energy conversion systems. The analysis was done by calculating the performance parameters of the energy conversion system with a variant mass flow rate of 105 kg/s to 140 kg/s on the condition of the reactor thermal power 200 MW. The calculation is done using the computer program package ChemCAD. Calculation results shows that the higher of coolant mass flow rate the outlet reactor temperature decreases. The impact of decreasing the reactor outlet temperature is the decreasing of thermal energy which be transferred from the IHX to the production of hydrogen, while the power for electricity generation and for the desalination process up. The increase in reactor coolant mass flow rate also causes an increase in the value of thermal efficiency for electricity generation and the energy utilization factor (EUF) as a whole, while the energy utilization factor for hydrogen production decreased. In the coolant mass flow rate of 120 kg/s of the obtained value of 78.99% EUF, thermal power for the production of hydrogen gas of 62.06 MW and thermal power for electricity generation of 77.94 MW. Thus the design considerations for the operating capacity of hydrogen production and electricity generation can be determined by regulating the coolant mass flow rate.

Key words: RGTT200K, energy conversion systems, coolant mass flowrate, thermal efficiency, EUF

PENDAHULUAN

Kegiatan pengembangan sistem energi nuklir berbasis Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (RGTT), terus dilakukan di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTRKN-BATAN). Kegiatan ini merupakan pelaksanaan tugas seperti yang tertuang dalam Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2010 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2010-2014^[1] dan Renstra BATAN 2010-2014. Secara tegas dinyatakan dalam Renstra BATAN 2010-2014 bahwa keluaran pada tahun 2014 adalah diperolehnya desain konseptual reaktor riset inovatif; desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi serta evaluasi teknologi^[1].

Berbagai kegiatan awal yang mendukung kegiatan desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi telah dilakukan. Kegiatan tersebut meliputi penetapan URD (*User Requirement Document*), pemilihan jenis reaktor maju dan desain konseptual teras reaktor daya maju. Sementara itu, desain konseptual sistem konversi energi untuk reaktor daya maju masih terus dilakukan.

Jenis reaktor daya maju yang dikembangkan adalah Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (RGTT) berdaya termal 200 MW dengan konsep kogenerasi yang dikenal dengan nama RGTT200K^[2,3]. Konsep kogenerasi RGTT200K ditujukan untuk pembangkit listrik, produksi hidrogen dan proses desalinasi air laut. RGTT200K didesain berpendingin gas helium dengan temperatur *outlet* reaktor 950 °C dan bertekanan 5 MPa. Sistem konversi energi pada RGTT200K menerapkan siklus langsung (siklus Brayton) dimana seluruh komponen utamanya yang meliputi *Intermediate Heat Exchanger* (IHX), turbin gas, kompresor, rekuperator dan *precooler*^[3] berada dalam satu lintasan aliran pendingin. Siklus langsung memiliki keunggulan yaitu efisiensinya lebih tinggi dibanding dengan siklus tak langsung^[4], tetapi kelemahan pada siklus langsung antara lain kemungkinan menyebarnya radioisotop karbon-14 hingga ke turbin gas. Oleh karena itu pada siklus langsung juga harus dipasang sistem pemurnian helium yang memadai.

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan berbagai analisis termodinamika untuk menetapkan konfigurasi sistem konversi energi RGTT200K yang optimal^[4]. Analisis dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan efisiensi termal pada konfigurasi siklus langsung dan siklus tak langsung. Hasil perhitungan dan analisis menunjukkan bahwa konfigurasi siklus langsung memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi.^[4] Pada siklus langsung juga dilakukan perhitungan untuk memperoleh konfigurasi yang optimal dengan membandingkan sistem konversi energi RGTT200K menggunakan 1 kompresor dan 2 kompresor. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk keperluan desain sistem konversi energi RGTT200K yang optimal adalah siklus langsung dengan 1 kompresor^[5], pada konfigurasi ini nilai optimal untuk efisiensi termal adalah 39,33% dan nilai faktor pemanfaatan energi (*Energy Utilization Factor – EUF*) adalah 79,76%.^[5]

Kelengkapan desain konseptual RGTT200K^[2] adalah desain konseptual teras reaktor, desain konseptual sistem konversi energi kogenerasi dan desain konseptual sistem pemanfaatan energi. Pekerjaan utama dalam desain konseptual sistem konversi energi adalah penyusunan diagram alir (*flowsheet*) sistem, analisis kinerja (*performance*) sistem dan analisis neraca massa dan neraca energi. Salah satu aspek yang perlu dianalisis dalam rangka melengkapi desain konseptual sistem

konversi energi RGTT200K adalah analisis kinerja sistem konversi energi bila terjadi perubahan laju alir massa pendingin reaktor.

Dalam makalah ini dilakukan analisis hasil perhitungan termodinamika siklus Brayton untuk mengukur pengaruh laju alir massa pendingin reaktor terhadap kinerja sistem konversi energi RGTT200K. Perhitungan dilakukan dengan pemodelan proses termodinamika siklus Brayton pada sistem konversi energi untuk RGTT200K menggunakan paket program komputer ChemCAD^[6] dengan variasi laju alir massa pendingin. Pada penelitian sebelumnya telah digunakan program komputer ChemCAD untuk perhitungan termodinamika sistem konversi energi RGTT200K, hasilnya cukup memadai dengan margin kesalahan relatif yang cukup kecil yaitu kurang dari 1,4%^[5]. Hasil perhitungan menggunakan ChemCAD digunakan untuk melakukan analisis kinerja sistem konversi energi RGTT200K.

LANDASAN TEORI

Perhitungan Turbin Gas

Secara ideal, proses yang terjadi pada turbin gas adalah proses ekspansi isentropis. Gas sebagai medium kerja mengalami ekspansi dengan entropi konstan. Pada proses ekspansi, gas mengalami penurunan temperatur dan tekanan yang disertai dengan penambahan entropi. Dengan menerapkan persamaan energi aliran mantap berkembang penuh di sepanjang rotor atau sudu, maka kerja yang diberikan oleh turbin gas dapat dihitung menggunakan persamaan^[7] sebagai berikut:

$$W_{turbin} = \dot{m} c_p (T_1 - T_2) \dots\dots\dots (1)$$

dengan

W_{turbin} = kerja yang diberikan oleh turbin gas

\dot{m} = laju alir massa pendingin

c_p = kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan

T_1 dan T_2 = temperatur *inlet* dan *outlet* turbin gas

Sedangkan rasio tingkat tekanan antara tekanan *inlet* dan tekanan *outlet* pada turbin gas dapat dihitung menggunakan persamaan^[7] sebagai berikut:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \dots\dots\dots (2)$$

dengan

P_1 dan P_2 = tekanan *inlet* dan *outlet* pada turbin gas

$\gamma = c_p / c_v$ = rasio kapasitas panas spesifik

T_1 dan T_2 = temperatur *inlet* dan *outlet* turbin gas

Temperatur *outlet* dari turbin gas dapat dihitung menggunakan persamaan^[7] sebagai berikut:

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \eta_s \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\} \dots\dots\dots (3)$$

dengan

P_1 dan P_2 = tekanan *inlet* dan *outlet* pada turbin gas

$\gamma = c_p / c_v$ = rasio kapasitas panas spesifik

T_1 dan T_2 = temperatur *inlet* dan *outlet* turbin gas

η_s = efisiensi isentropis turbin gas

Pada persamaan (1) sampai dengan persamaan (3) di atas, subskrip 1 untuk titik masuk (*inlet*) turbin gas dan subskrip 2 untuk titik keluar (*outlet*) turbin gas.

Perhitungan Kompresor Gas

Proses termodinamika ideal dalam kompresor gas adalah proses isentropik. Dalam proses ideal ini, gas ditekan sehingga tekanannya naik tanpa disertai oleh adanya penambahan entropi. Kenaikan tekanan diikuti dengan kenaikan temperatur. Dengan menggunakan persamaan energi untuk aliran mantap dan berkembang penuh pada rotor kompresor aksial, maka besarnya kerja kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan^[7] sebagai berikut:

$$W_{kompresor} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (4)$$

dengan

$W_{kompresor}$ = besarnya kerja kompresor

\dot{m} = laju alir massa pendingin

c_p = kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan

T_1 dan T_2 = temperatur *inlet* dan *outlet* kompresor

Sedangkan rasio tingkat tekanan antara tekanan *outlet* dan tekanan *inlet* pada kompresor aksial dapat dihitung menggunakan persamaan^[7] sebagai berikut:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \dots\dots\dots (5)$$

dengan

P_1 dan P_2 = tekanan *inlet* dan *outlet* pada kompresor

γ = rasio kapasitas panas spesifik

T_1 dan T_2 = temperatur *inlet* dan *outlet* pada kompresor

Temperatur *outlet* dari kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan^[7] sebagai berikut:

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_s} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^\gamma - 1 \right] \right\} \dots\dots\dots (6)$$

dengan

P_1 dan P_2 = tekanan *inlet* dan *outlet* pada kompresor

γ = rasio kapasitas panas spesifik

T_1 dan T_2 = temperatur *inlet* dan *outlet* pada kompresor

η_s = efisiensi isentropis kompresor

Perhitungan Alat Penukar Panas

Alat penukar panas digunakan untuk mentransfer energi panas dari satu sistem fluida ke sistem fluida yang lain tanpa terjadi pencampuran massa fluida. Ada berbagai tipe penukar panas, pemilihan tipe penukar panas ditentukan oleh tujuan penggunaan dan kinerja penukar panas. Kinerja penukar panas antara lain laju perpindahan panas dan efektivitas penukar panas. Laju perpindahan panas dan efektivitas penukar panas dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut:

$$q = U A \frac{\Delta T_{out} - \Delta T_{in}}{\ln(\Delta T_{out} / \Delta T_{in})} = U A \Delta T_{LMTD} \dots\dots\dots (7)$$

dengan

q = laju perpindahan panas aktual pada IHX

U = koefisien perpindahan panas keseluruhan (*overall heat transfer coefficient*)

A = luas permukaan perpindahan panas

ΔT_{LMTD} = LMTD (*Logarithmic Mean Temperature Difference*)

Nilai LMTD adalah nilai yang berkaitan dengan perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin IHX. Dengan asumsi bahwa aliran pendingin mengalir dalam kondisi tunak (*steady state*), tidak ada kehilangan panas secara keseluruhan, tidak ada perubahan fase pendingin, maka nilai LMTD dapat dihitung menggunakan persamaan sbb.^[3,4,5]:

$$LMTD = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln \left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}} \right)} \dots\dots\dots (8)$$

dengan

$LMTD$ = *Logarithmic Mean Temperature Difference*

$T_{h,in}$ dan $T_{h,out}$ = Temperatur *inlet* dan *outlet* pada sisi panas

$T_{c,in}$ dan $T_{c,out}$ = Temperatur *inlet* dan *outlet* pada sisi dingin

Nilai efektivitas (ε) penukar panas sangat dipengaruhi oleh laju alir fluida pendingin, temperatur *inlet* dan temperatur *outlet* pada sisi panas dan sisi dingin penukar panas. Nilai efektivitas penukar panas dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{C_h (T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{C_c (T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \dots\dots\dots(9)$$

dimana $C_h = (\dot{m} c_p)_h$ dan $C_c = (\dot{m} c_p)_c$

dengan

- ε = Nilai efektivitas penukar sisi panas
- $T_{h,in}$ dan $T_{h,out}$ = Temperatur *inlet* dan *outlet* pada sisi panas
- $T_{c,in}$ dan $T_{c,out}$ = Temperatur *inlet* dan *outlet* pada sisi dingin
- \dot{m} = laju alir massa pendingin
- c_p = kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan
- C_{\min} = laju kapasitasansi panas minimum

Perhitungan Efisiensi Termal dan Faktor Pemanfaatan Energi

Salah satu keuntungan sistem RGTT adalah kemampuannya menghasilkan temperatur keluaran reaktor yang sangat tinggi hingga mencapai 1000 °C. Temperatur keluaran reaktor yang tinggi, sangat ideal untuk dikopel dengan sistem konversi energi untuk menghasilkan konfigurasi sistem kogenerasi. Dengan sistem kogenerasi, reaktor nuklir dapat digunakan untuk memasok energi termal dan untuk keperluan industri maupun untuk pembangkit daya listrik. Dengan demikian, efisiensi sistem tidak semata dihitung berdasarkan kemampuan pembangkitan daya listrik, tetapi juga kemampuan menyediakan energi termal untuk keperluan industri lain.

Efisiensi pembangkitan daya listrik atau efisiensi termal (η_{ther}) merupakan hasil perkalian antara efisiensi generator listrik dengan daya mekanik yang merupakan selisih antara daya turbin gas dan daya kompresor^[7]. Efisiensi pembangkitan daya listrik secara individual akan lebih tinggi dibanding dengan efisiensi pembangkitan daya listrik dalam sistem kogenerasi. Dalam sistem kogenerasi, efisiensi dihitung berdasarkan nilai faktor pemanfaatan energi termal atau *Energy Utilization Factor (EUF)* yang meliputi seluruh unit yang memanfaatkan energi termal dari reaktor. Dengan sistem kogenerasi, nilai faktor pemanfaatan energi termal (EUF) dapat mencapai 80%^[8], sedangkan yang 20% adalah energi termal yang dibuang ke lingkungan dalam bentuk energi panas. Nilai EUF yang tinggi akan meningkatkan nilai keekonomian sistem kogenerasi dan efisiensi pemanfaatan cadangan bahan bakar. Nilai EUF dapat didefinisikan sbb^[9]..:

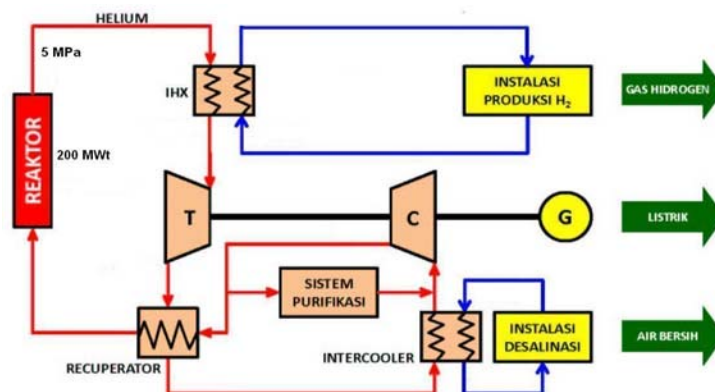
$$EUF = (W + Qu) / F \dots\dots\dots(10)$$

dengan W adalah kerja yang dihasilkan dari instalasi kogenerasi, Q_u adalah energi termal yang tidak dimanfaatkan dari instalasi kogenerasi dan F adalah energi total yang diberikan kepada instalasi kogenerasi.

METODOLOGI PERHITUNGAN

Sistem konversi energi pada RGTT200K didesain dengan konfigurasi siklus langsung dimana semua komponen utama yaitu : IHX, turbin gas, rekuperator, *precooler*, dan kompresor berada dalam satu alur siklus aliran pendingin seperti pada Gambar 1. IHX adalah unit penukar panas yang digunakan sebagai penyedia energi termal untuk proses produksi gas hidrogen. Untuk proses produksi gas hidrogen diperlukan IHX yang mampu menyediakan energi termal dengan temperatur tinggi yaitu minimal $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.^[10] Karena itu IHX dipasang langsung pada *outlet* reaktor agar memperoleh temperatur tertinggi. IHX untuk RGTT200K didesain dengan tipe *shell and tube* dengan modifikasi sisi *tube* yang dibentuk secara *helical*. Dimensi pada model desain IHX RGTT200K mengacu pada desain IHX untuk GTHTR300C^[9,10]. *Precooler* yang dipasang pada *inlet* kompresor selain berfungsi untuk menurunkan temperatur *inlet* pada kompresor, juga berfungsi untuk menyediakan energi termal pada proses desalinasi.

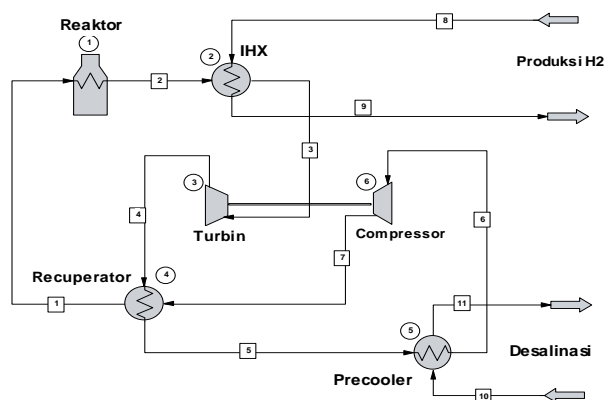
Dalam diagram alir desain konseptual sistem konversi energi pada RGTT200K seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, sebagai sumber energi termal adalah reaktor gas temperatur tinggi (RGTT) berdaya termal 200 MW dengan dan tekanan *outlet* 5 MPa^[2,3,4,5]. Gas helium sebagai pendingin primer mengalir dari reaktor membawa energi termal melalui IHX, turbin gas, rekuperator, *precooler*, kompresor dan kembali ke reaktor. Instalasi produksi gas hidrogen menerima energi termal dari unit konversi energi kogenerasi melalui IHX. Untuk keperluan produksi gas hidrogen dengan proses daur *sulfur-iodine* diperlukan energi termal dengan temperatur minimal $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.^[8] Sedangkan untuk keperluan instalasi desalinasi air laut mengambil energi termal dari unit konversi daya melalui *precooler* yang dipasang pada *inlet* kompresor.



Gambar 1. Diagram Alir Desain Konseptual Sistem Konversi Energi RGTT200K^[2,3,4,5]

Dalam penelitian sebelumnya telah dilakukan validasi pemodelan sistem konversi energi menggunakan ChemCAD dengan mengambil acuan reaktor GTHTR300. Hasil validasi

menunjukkan bahwa margin kesalahan relatif tertinggi sebesar 1,43%, hal ini menunjukkan bahwa perhitungan termodinamika sistem konversi energi RGTT200K menggunakan program komputer ChemCAD cukup memadai^[5]. Untuk keperluan analisis termodinamika atau perhitungan parameter kinerja sistem konversi energi RGTT200K dengan diagram alir seperti pada Gambar 1, maka sistem konversi energi tersebut dimodelkan menggunakan program komputer ChemCAD seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Model sistem konversi energi RGTT200K menggunakan ChemCAD

Unit reaktor sebagai penyedia energi termal dimodelkan sebagai reaktor Gibbs. Dalam program komputer ChemCAD, reaktor Gibbs digunakan untuk simulasi neraca massa dan neraca energi dalam suatu sistem proses. Komposisi, produk dan kondisi termal keluaran dari reaktor Gibbs dihitung dengan minimisasi energi bebas Gibbs. Fluida kerja untuk sistem konversi energi termasuk unit reaktor dispesifikasikan sebagai gas inert, dalam hal ini gas helium. Dalam perhitungan ini *pressure drop* pada reaktor diasumsikan sebesar 0,12 MPa, asumsi ini didasarkan pada asumsi yang digunakan untuk validasi model.

Model IHX ditetapkan bertipe *shell and tube* dengan mengacu pada desain konseptual IHX GTHTR300C^[10]. Ukuran dimensi untuk model IHX mengadopsi dimensi IHX pada GTHTR300C. Demikian pula model rekuperator dan model *precooler* memakai pendekatan yang sama yaitu penukar panas tipe *shell and tube*. Dalam pemodelan sistem konversi energi RGTT200K, diasumsikan *pressure drop* pada sisi *shell* untuk ketiga penukar panas sebesar 0,04 MPa, sedangkan *pressure drop* pada sisi *tube* sebesar 0,08 MPa. Model turbin gas dan kompresor gas dipasang satu poros memakai tipe aliran aksial dengan masing-masing memiliki efisiensi politropik sebesar 0,96. Data *input* untuk program komputer ChemCAD dalam perhitungan parameter kinerja sistem konversi energi RGTT200K ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data input untuk setiap komponen

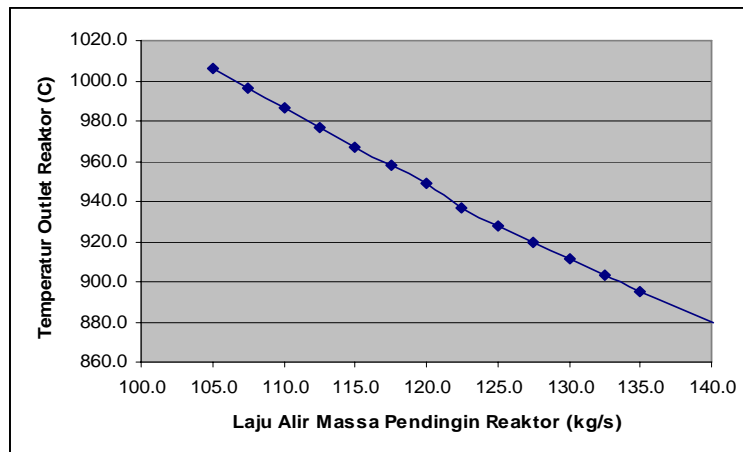
No.	Parameter	Nilai
1.	Daya termal reaktor	200 MW
2.	Tekanan <i>outlet</i> reaktor	5,04 MPa
3.	<i>Pressure drop</i> pada reaktor	0,12 MPa
4.	<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>shell</i> IHX	0,04 MPa
5.	<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>tube</i> IHX	0,08 MPa
6.	Efisiensi politropik turbin gas dan kompresor	0,96
7.	<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>shell</i> rekuperator	0,06 MPa
8.	<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>tube</i> rekuperator	0,08 MPa
9.	<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>shell</i> rekuperator	0,04 MPa
10.	<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>tube</i> rekuperator	0,08 MPa
11.	Temperatur <i>heat sink</i>	28,0 °C

Dalam perhitungan ini daya termal reaktor dan tekanan *outlet* reaktor diasumsikan tetap yaitu sebesar 200 MWt dengan tekanan 5,04 MPa. Laju alir massa pendingin divariasikan mulai dari 105 kg/s hingga 140 kg/s. Penetapan varian laju alir massa sebesar 140 kg/s didasarkan pada pertimbangan bahwa temperatur keluaran dari IHX minimal sebesar 850 °C agar dapat digunakan untuk proses produksi hidrogen. Sedangkan laju alir massa pendingin reaktor 105 kg/s adalah batas laju alir terendah agar temperatur *outlet* reaktor berada di sekitar 1000 °C.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan perhitungan beberapa parameter kinerja sistem konversi energi RGTT200K sebagai fungsi terhadap laju alir massa pendingin reaktor. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program komputer ChemCAD.

Hasil perhitungan parameter termodinamika sistem konversi energi RGTT200K dengan menggunakan program komputer ChemCAD ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 3 sampai dengan Gambar 7. Grafik pada Gambar 3 menunjukkan bahwa pada daya sebesar 200 MWt dan tekanan tetap sebesar 5,04 MPa, bertambahnya laju alir massa pendingin reaktor menyebabkan penurunan temperatur *outlet* reaktor. Penurunan temperatur *outlet* reaktor mengakibatkan penurunan temperatur *outlet* sekunder IHX untuk proses produksi gas hidrogen. Agar instalasi produksi gas hidrogen dapat beroperasi maka temperatur *outlet* IHX pada sisi sekunder tidak boleh kurang dari 850 °C.^[8] Pada laju alir massa pendingin reaktor sebesar 140,1 kg/s, temperatur *outlet* reaktor hasil perhitungan adalah 880 °C dan temperatur *outlet* IHX untuk proses produksi gas hidrogen sebesar 850 °C. Dengan demikian, laju alir massa pendingin reaktor sebesar 140,1 kg/s diusulkan menjadi batas tertinggi agar proses produksi gas hidrogen dapat beroperasi.

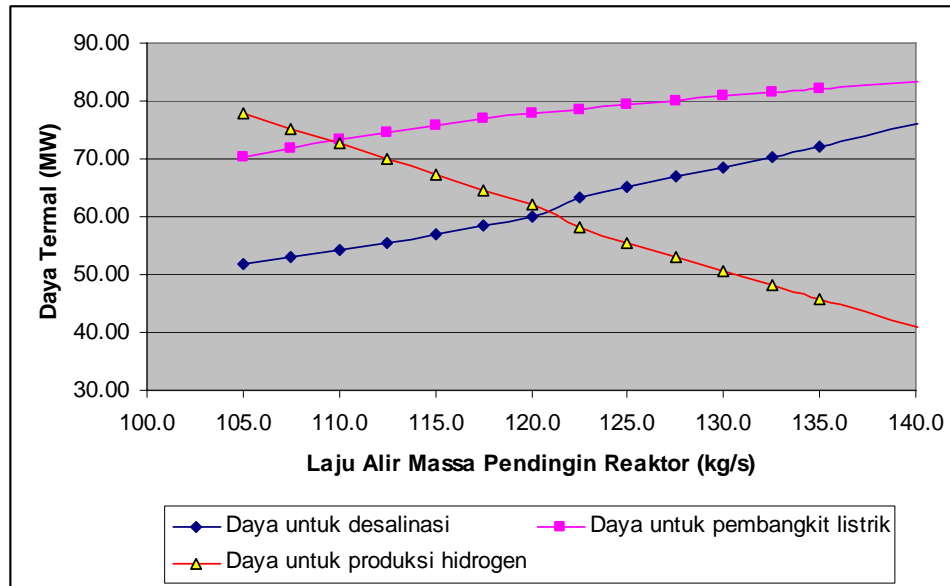


Gambar 3. Grafik temperatur outlet reaktor sebagai fungsi laju alir massa pendingin reaktor

Dari Tabel 2 dan Gambar 4 terlihat bahwa daya termal untuk pembangkitan listrik yang merupakan selisih antara daya termal akibat ekspansi turbin dan daya termal kompresor meningkat seiring dengan naiknya laju alir massa pendingin reaktor. Hal yang sama terjadi pada daya termal yang ditransfer dari *precooler* yang digunakan untuk proses desalinasi air laut. Sedangkan daya termal yang digunakan untuk produksi gas hidrogen yang ditransfer dari IHX menurun seiring dengan peningkatan laju alir massa pendingin reaktor. Penurunan daya termal yang ditransfer dari IHX disebabkan oleh menurunnya temperatur *outlet* reaktor.

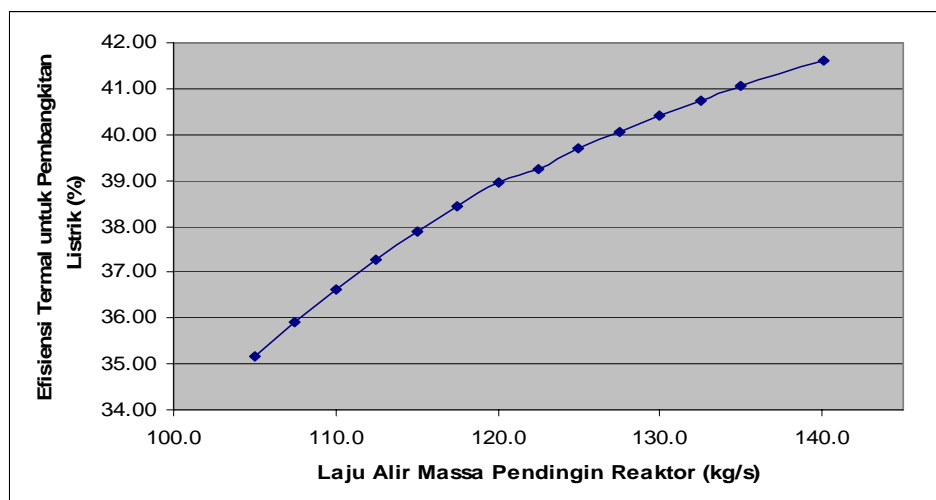
Tabel 2. Distribusi daya termal pada komponen utama sistem konversi energi RGTT200K sebagai fungsi laju alir massa pendingin reaktor.

Laju Alir Massa (kg/s)	Daya Reaktor (MWt)	T _{out} Reaktor (°C)	Distribusi daya			
			IHX (MWt)	Turbin (MWt)	Kompresor (MWt)	Precooler (MWt)
105.00	200,00	1006,00	77,96	-121,39	51,06	51,71
107,50	200,07	996,10	75,29	-124,09	52,22	52,91
110,00	200,09	986,30	72,60	-126,75	53,48	54,22
112,50	200,04	976,60	69,89	-129,38	54,79	55,57
115,00	200,06	967,30	67,26	-131,98	56,18	57,00
117,50	200,07	958,20	64,64	-134,56	57,64	58,50
120,00	200,08	949,30	62,06	-137,12	59,18	60,07
122,50	200,08	936,50	58,17	-139,40	60,90	63,41
125,00	200,02	927,80	55,57	-141,88	62,45	65,05
127,50	200,04	919,50	53,07	-144,35	64,25	66,86
130,00	200,01	911,25	50,56	-146,79	65,97	68,63
132,50	200,04	903,30	48,12	-149,21	67,71	70,42
135,00	200,01	895,35	45,66	-151,60	69,48	72,24
140,05	200,06	880,00	40,85	-156,36	73,14	75,94



Gambar 4, Grafik distribusi daya termal pada komponen utama sistem konversi energi RGTT200K sebagai fungsi laju alir massa pendingin reaktor,

Efisiensi termal untuk pembangkitan listrik adalah efisiensi pembangkitan daya termal untuk pembangkitan listrik, Daya termal untuk pembangkitan listrik merupakan selisih antara daya termal pada turbin dan daya termal pada kompresor, Grafik efisiensi termal untuk pembangkitan listrik sebagai fungsi laju alir massa pendingin ditunjukkan pada Gambar 5, Dari Gambar 5 ditunjukkan bahwa efisiensi termal untuk pembangkitan listrik meningkat seiring dengan peningkatan laju alir massa pendingin reaktor, Terlihat pula bahwa peningkatan efisiensi termal relatif lebih tajam (lebih signifikan) pada laju alir massa pendingin reaktor yang rendah yaitu antara 105 kg/s hingga 120 kg/s, Pada laju alir massa diatas 120 kg/s, kenaikan efisiensi termal terhadap kenaikan laju alir massa lebih landai,

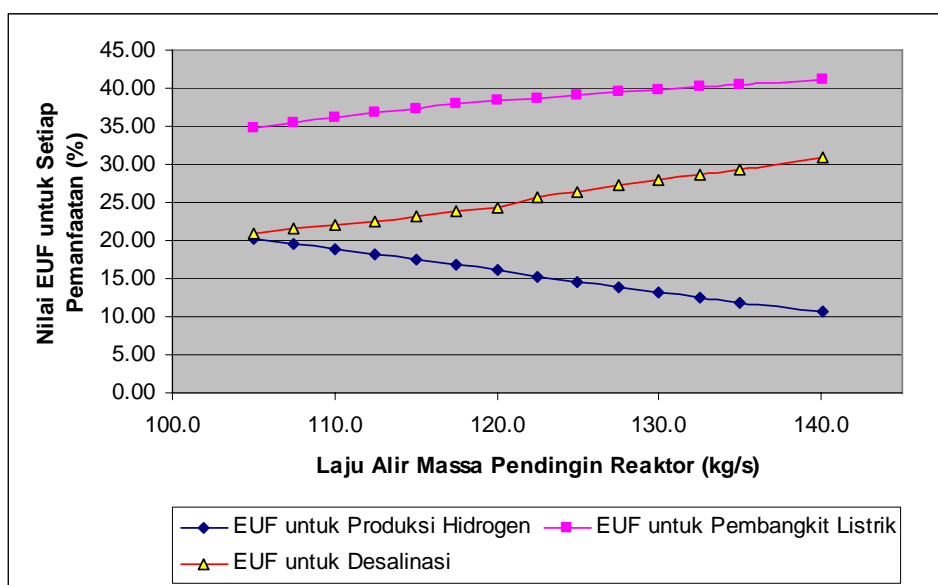


Gambar 5, Grafik efisiensi termal untuk pembangkitan listrik sebagai laju alir massa pendingin reaktor,

Nilai faktor pemanfaatan energi termal (EUF) dihitung untuk setiap pemanfaatan yaitu : untuk produksi gas hidrogen, untuk pembangkitan listrik dan untuk proses desalinasi air laut, EUF untuk pembangkitan listrik merupakan perkalian antara daya mekanik untuk pembangkitan listrik dengan efisiensi generator listrik dibagi dengan daya termal reaktor, Daya mekanik untuk pembangkitan listrik merupakan selisih antara daya ekspansi turbin dan daya termal untuk kompresi pada kompresor, Dalam perhitungan ini, efisiensi generator listrik diasumsikan sebesar 98,66%^[7],

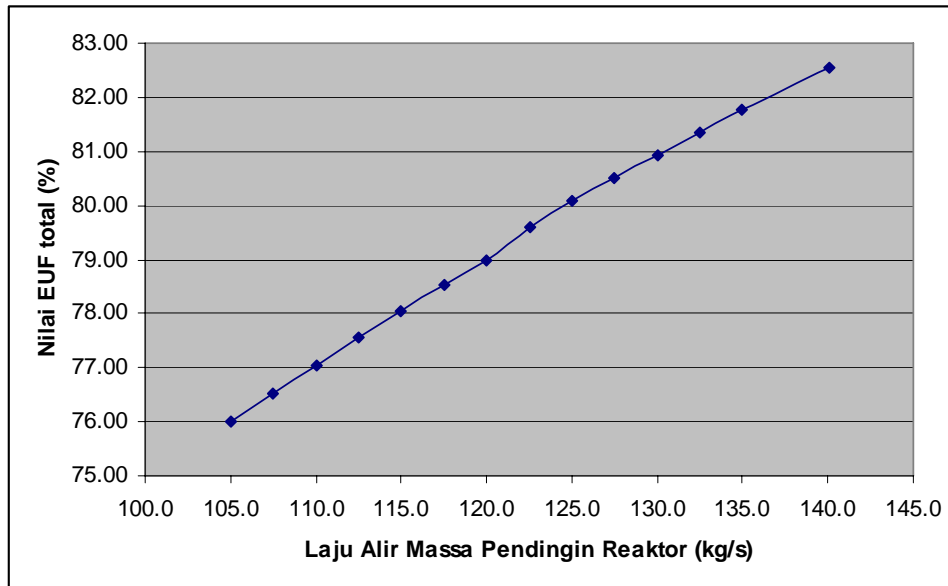
Efisiensi maksimum yang dapat dihasilkan oleh instalasi produksi gas hidrogen dengan termokimia adalah 52%^[12], Dengan demikian, nilai EUF untuk produksi gas hidrogen adalah hasil bagi daya termal yang ditransfer dari IHX dengan daya termal reaktor dikalikan dengan efisiensi maksimum untuk produksi gas hidrogen, Terlihat pada Gambar 6 bahwa peningkatan laju alir massa pendingin berdampak pada penurunan EUF untuk produksi gas hidrogen,

Instalasi desalinasi memanfaatkan panas buangan dari *precooler*, Untuk proses desalinasi ini digunakan metode *Low-Temperature Multi-Effect Evaporation (LT-MEE)* yang dapat beroperasi pada temperatur 70 °C^[13], Dengan metode LT-MEE, efisiensi proses desalinasi air laut adalah 81,3%^[12], Dengan cara yang sama, seperti pada perhitungan EUF untuk produksi gas hidrogen, maka nilai EUF untuk proses desalinasi adalah hasil bagi daya termal yang ditransfer dari *precooler* dengan daya termal reaktor dikalikan dengan efisiensi proses desalinasi, Nilai EUF untuk masing-masing pemanfaatan energi termal sebagai fungsi laju alir massa pendingin reaktor ditunjukkan pada Gambar 6, Terlihat pada Gambar 6 bahwa nilai EUF untuk proses desalinasi air meningkat seiring dengan peningkatan laju alir massa pendingin,



Gambar 6, Nilai EUF untuk masing-masing pemanfaatan energi termal sebagai fungsi laju alir massa pendingin reaktor,

Nilai EUF total adalah hasil jumlahan dari nilai EUF untuk masing-masing pemanfaatan energi termal, Nilai EUF total sebagai fungsi laju alir massa pendingin reaktor ditunjukkan pada Gambar 7, Dari Gambar 7 terlihat bahwa nilai EUF total cenderung naik dengan peningkatan laju alir massa pendingin reaktor, meskipun nilai EUF untuk produksi gas hidrogen menurun dengan kenaikan laju alir massa pendingin reaktor,



Gambar 7, Nilai EUF total sebagai fungsi dari laju alir massa pendingin reaktor,

KESIMPULAN

Kenaikan laju alir massa pendingin reaktor menyebabkan penurunan temperatur *outlet* reaktor, penurunan nilai faktor pemanfaatan energi (EUF) untuk produksi gas hidrogen dan penurunan daya termal yang ditransfer dari IHX untuk instalasi produksi gas hidrogen, Sebaliknya, peningkatan laju alir massa pendingin reaktor akan menaikkan efisiensi termal, nilai faktor pemanfaatan energi secara keseluruhan, daya termal untuk pembangkitan listrik dan daya termal untuk proses desalinasi air laut, Untuk pertimbangan desain operasi, kapasitas produksi hidrogen dan pembangkitan listrik dapat ditentukan dengan cara mengatur laju alir massa pendingin reaktor, Pada laju alir massa pendingin reaktor sebesar 120 kg/s maka diperoleh nilai EUF total sebesar 78,99%, daya termal untuk produksi hidrogen sebesar 62,06 MW dan daya termal untuk pembangkitan listrik sebesar 77,94 MW,

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan Program Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekayasa (PI-PKPP) tahun 2012 dari Kementerian Riset dan Teknologi dengan judul “Desain Keselamatan Sistem Konversi Daya Reaktor Gas Temperatur Tinggi 200 MWt Kogenerasi”, Karena itu kami sampaikan ucapan terima kasih kepada Menteri Riset dan Teknologi dan semua pejabat terkait dengan PI-PKPP tahun 2012 atas dukungan dan fasilitas yang diberikan

dalam pelaksanaan penelitian ini, Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Ir, Marliyadi Pancoko, M,Eng, dari Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional (PRPN – BATAN) atas kesediaannya meluangkan waktu untuk berdiskusi dalam penyelesaian penelitian ini, terutama dalam pengoperasian program komputer ChemCAD,

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. BAPPENAS, “Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2010 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2010-2014”, Jakarta, 2010,
- [2]. M, DHANDHANG PURWADI, “Desain Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT”, Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Surabaya, 28 Juli 2010,
- [3]. IGN, DJOKO IRIANTO, “Desain Konseptual Unit Konversi Daya Berbasis Kogenerasi untuk Reaktor Tipe RGTT200K”, Prosiding Seminar Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir ke-17, Yogyakarta, 1 Oktober 2011,
- [4]. IGN, DJOKO IRIANTO, “Pemodelan Sistem Konversi Energi Berbasis Kogenerasi Reaktor Tipe RGTT Untuk Pembangkit Listrik dan Produksi Hidrogen”, Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir III, Banten, 24 Juni (2010),
- [5]. IGN, DJOKO IRIANTO, “Analisis Termodinamika Untuk Optimasi Sistem Konversi Energi RGTT200K”, dipersentasikan dalam Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Penegtaahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 04 Juli 2012,
- [6]. PT, INGENIOUS, “ChemCAD Process Simulation: Software Training”, BATAN–Serpong, 2011,
- [7]. WIRANTO ARISMUNANDAR, “Pengantar Turbin Gas dan Motor Propulsi”, Penerbit ITB, 2002
- [8]. SAITO, S., “Nuclear Energy and Hydrogen Production – The Japanese Situation”, Policy Debate on The Potential Contribution of Nuclear Energy to Production of Hydrogen, OECD/NEA, 15 October 2004,
- [9]. XIAO FENG, et al., “New Performance Criterion For Cogeneration System”, Elsevier Science, Energy Convers Mgmt Vol,39 No,15, pp,1607-1609, 1998,
- [10]. KAZUHIKO KUNITOMI, et al., “JAEA’S VHTR For Hydrogen And Electricity Cogeneration : GTHTR300C”, Nuclear Engineering and Technology, Vol,39 No,1., February (2007),
- [11]. KAZUHIKO KUNITOMI, et al., “Research and Development for Gas Turbine System in GTHTR300”, JSME International Journal, Series B, Vol,47, No,2, 2004,
- [12]. BROWN L,C, et,al., “High Efficiency Generation of Hydrogen Fuel Using Nuclear Power”, GA-A24285, Nuclear Energy Research Initiative (NERI) Program for US-DOE, 2003,

- [13]. YONG QING WANG, et.al., "Thermoeconomic Analysis of a Low-Temperature Multi-Effect Thermal Desalination System Coupled with an Absorption Heat Pump", Elsevier, Energi 36, 3878-3887, 2011,

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1, PERTANYAAN: (Karina Anugrahwati, Pendidikan Fisika UPI - Bandung)

- Bagaimana bisa sebuah reaktor dapat menghasilkan air bersih?
- Mengapa ketika lajunya (laju alir massa pendingin) diperbesar hidrogen yang dihasilkan semakin berkurang?

JAWABAN: (Ign. Djoko Irianto, PTRKN-BATAN)

- Konsep kogenerasi RGTT200K adalah untuk pembangkit listrik, produksi hidrogen dan desalinasi air laut, Ada beberapa metode untuk produksi hidrogen maupun metode desalinasi air laut, Proses desalinasi air laut bertujuan untuk menghasilkan air bersih, Proses desalinasi mengambil energi termal dari precooler yang dipasang sebelum kompresor, Jadi jelas bahwa reaktor (RGTT200K) juga digunakan untuk menghasilkan air bersih,
- Jika laju alir masa pendingin diperbesar, maka temperatur outlet reaktor menurun, demikian juga energi termal yang ditransfer oleh IHX (Intermediate Heat Exchanger) dari sistem pendingin RGTT200K ke instalasi produksi gas hidrogen, Meskipun temperatur memenuhi untuk proses produksi gas hidrogen, karena energi termal yang diberikan berkurang maka hidrogen yang dihasilkan juga berkurang,

2, PERTANYAAN: (Sri Sumardiasih, Mahasiswa UPI - Bandung)

- ☑ Tiga manfaat atau penggunaan RGTT200K tersebut apakah dalam jumlah yang sama? Sebab gas hidrogen yang dihasilkan bergantung pada perubahan temperatur, tetapi listrik yang dihasilkan tidak,
- ☑ Energy Utility Factor (EUF) total untuk RGTT200K sebesar 78,99%, artinya ada kurang lebih 20% energi yang terbuang, Pembuangan (sisa 20%) yang tidak dimanfaatkan akan dikemanakan?

JAWABAN: (Ign. Djoko Irianto, PTRKN-BATAN)

- ☑ Konsep kogenerasi RGTT200K adalah untuk pembangkit listrik, produksi hidrogen dan desalinasi air laut, Ketiga manfaat atau kegunaan tersebut tidak dalam jumlah yang sama, Seperti terlihat dalam Gambar 4 yaitu grafik distribusi daya termal pada komponen utama sistem konversi energi RGTT200K sebagai fungsi laju alir massa pendingin reaktor, terlihat bahwa ketiga manfaat atau kegunaan tersebut tidak sama,
- ☑ EUF menggambarkan energi termal yang dapat dimanfaatkan, Dengan EUF 78,99% berarti sebanyak 21,01% energi termal tidak dapat dimanfaatkan, Energi termal yang tidak dimanfaatkan dibuang ke lingkungan,



Situasi Presentasi Sidang POSTER Dalam “Seminar Nasional ke-18 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir”