

## PEMODELAN SISTEM KONVERSI ENERGI RGTT200K UNTUK MEMPEROLEH KINERJA YANG OPTIMUM

Ign. Djoko Irianto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) BATAN

### ABSTRAK

**PEMODELAN SISTEM KONVERSI ENERGI RGTT200K UNTUK MEMPEROLEH KINERJA OPTIMUM.** RGTT200K adalah konsep Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT) yang didesain berdaya termal 200 MW. Reaktor ini berpendingin gas helium dengan temperatur *outlet* reaktor 950 °C. Sistem konversi energi untuk pemanfaatan energi termal dari reaktor ini menerapkan sistem kogenerasi untuk pembangkit listrik, produksi hidrogen dan desalinasi air laut. Sistem konversi energi RGTT200K dimodelkan sebagai siklus Brayton dengan menempatkan turbin gas dalam satu siklus langsung. Selain turbin gas, komponen utama dalam sistem konversi energi RGTT200K adalah *Intermediate Heat Exchanger* (IHX), rekuperator, *precooler* dan kompresor gas. Dalam makalah ini diuraikan hasil pemodelan sistem konversi energi RGTT200K untuk memperoleh hasil kinerja yang optimum. Analisis pemodelan sistem konversi energi dilakukan dengan memvariasikan temperatur *outlet* reaktor. Pemodelan dan perhitungan parameter termodinamika dilakukan dengan menggunakan paket program komputer ChemCAD 6.1.4. Efisiensi termal dan faktor pemanfaatan energi (*Energy Utilization Factor* / EUF) digunakan sebagai parameter pembandingan. Pemodelan dengan variasi temperatur *outlet* reaktor dilakukan antara 900 °C hingga 1000 °C pada kondisi daya termal reaktor 200 MW. Hasil perhitungan model sistem konversi energi RGTT200K menunjukkan bahwa efisiensi termal dan faktor pemanfaatan energi (EUF) optimal diperoleh pada temperatur *outlet* reaktor 950 °C.

**Kata kunci:** RGTT200K, sistem konversi energi, ChemCAD, efisiensi termal, EUF

### ABSTRACT

*ENERGY CONVERSION SYSTEMS MODELING OF RGTT200K TO OBTAIN THE OPTIMUM PERFORMANCE.* RGTT200K is the concept of High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) with 200 MW thermal power generation. This reactor employs helium gas as coolant with an outlet temperature of 950 °C. Energy conversion systems for the utilization of thermal energy from the reactor is implementing cogeneration systems for power generation, hydrogen production and desalination of sea water. RGTT200K energy conversion system is modeled as a Brayton cycle gas turbine by putting in a direct cycle. In addition to the gas turbine, the main components in energy conversion systems RGTT200K are Intermediate Heat Exchanger (IHX), recuperator, precooler and gas compressors. This paper described the modeling results RGTT200K energy conversion systems for optimum performance results. Modeling analysis is conducted by varying the reactor outlet temperature. Modeling and calculation of thermodynamic parameters is done using a computer program package ChemCAD 6.1.4. The thermal efficiency and energy utilization factor (EUF) are used as a comparing parameters. While modeling the variation of reactor outlet temperatur are carried between 900 °C to 1000 °C at the condition of 200 MW thermal power reactors. The results of RGTT200K energy conversion system model calculations showed that the thermal efficiency and optimal EUF obtained at the reactor outlet temperatur 950 °C.

**Keywords:** RGTT200K, energy conversion systems, ChemCAD, thermal efficiency, EUF

## PENDAHULUAN

Kegiatan pengembangan sistem energi nuklir di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTRKN-BATAN) dimaksudkan untuk memperoleh desain konseptual Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (RGTT) berdaya termal 200 MW. Kegiatan ini merupakan pelaksanaan tugas seperti tertuang dalam Renstra BATAN 2010-2014 yang menyatakan bahwa keluaran pada tahun 2014 adalah diperolehnya desain konseptual reaktor riset inovatif; desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi serta evaluasi teknologi<sup>[1]</sup>.

Desain konseptual RGTT berdaya termal 200 MW kogenerasi ini dikenal dengan nama RGTT200K<sup>[2,3]</sup>. 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 tekanan 5 MPa. Sistem pendingin utama RGTT200K berfungsi sebagai sistem konversi energi. Sistem konversi energi pada RGTT200K menerapkan siklus langsung di mana seluruh komponen utamanya yang meliputi *Intermediate Heat Exchanger* (IHX), turbin gas, kompresor, rekuperator dan *precooler*<sup>[3]</sup> berada dalam satu lintasan aliran pendingin. Siklus langsung memiliki keunggulan yaitu efisiensinya lebih tinggi dibanding dengan siklus tak langsung<sup>[4]</sup>.

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan berbagai analisis termodinamika untuk menetapkan konfigurasi sistem konversi energi RGTT200K<sup>[4]</sup>. 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<sup>[4]</sup>. Pada siklus langsung juga dilakukan perhitungan untuk memperoleh konfigurasi terbaik dengan membandingkan sistem konversi energi RGTT200K menggunakan 1 kompresor dan 2 kompresor.

Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk keperluan desain sistem konversi energi RGTT200K penerapan siklus langsung dengan 1 kompresor cukup memadai<sup>[5]</sup>.

Dalam makalah ini dilakukan pemodelan siklus Brayton pada sistem konversi energi RGTT200K, perhitungan termodinamika dan analisis hasil perhitungan dengan varian temperatur *outlet* reaktor. Pemodelan proses termodinamika siklus Brayton dilakukan dengan menggunakan paket program komputer ChemCAD 6.1.4<sup>[6]</sup>. ChemCAD 6.1.4 adalah perangkat lunak komputer yang dapat digunakan untuk simulasi perhitungan termodinamika dan rekayasa proses (*process engineering*). Pada penelitian sebelumnya<sup>[5]</sup> telah digunakan program komputer ChemCAD 6.1.4 untuk perhitungan termodinamika sistem konversi energi, hasilnya cukup memadai dengan margin kesalahan relatif kurang dari 1,4%<sup>[5]</sup>. Parameter kinerja sistem konversi energi RGTT200K yang dihitung meliputi distribusi energi, efisiensi termal untuk pembangkitan listrik dan faktor pemanfaatan energi (*Energy Utilization Factor / EUF*) untuk masing-masing pemanfaatan energi pada sistem

konversi energi RGTT200K sebagai fungsi laju alir masa pendingin reaktor.

## 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 jalan, maka kerja yang diberikan oleh turbin gas dapat dihitung menggunakan persamaan<sup>[7]</sup> sebagai berikut:

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

dengan

$W_{turbin}$  = kerja yang diberikan oleh turbin

$\dot{m}$  = laju alir massa pendingin

$c_p$  = kapasitas panas spesifik tekanan tetap

$T_1$  = temperatur *inlet* turbin

$T_2$  = temperatur *outlet* turbin

### 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<sup>[7]</sup> sebagai berikut:

$$W_{kompresor} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (2)$$

dengan

$W_{kompresor}$  = kerja kompresor

$\dot{m}$  = laju alir massa pendingin

$c_p$  = kapasitas panas spesifik tekanan tetap

$T_1$  = temperatur *inlet* kompresor

$T_2$  = temperatur *outlet* 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. Laju perpindahan panas dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut:

dengan

$$q = U A \frac{\Delta T_{out} - \Delta T_{in}}{\ln(\Delta T_{out} / \Delta T_{in})} = U A \Delta T_{LMTD} \quad (3)$$

$q$  = laju perpindahan panas aktual pada IHX

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

$A$  = luas permukaan perpindahan panas

$T$  = temperatur

$\Delta T_{LMTD}$  = LMTD (*Logarithmic Mean Temperature Difference*)

## Perhitungan Efisiensi Termal dan Faktor Pemanfaatan Energi

Salah satu tujuan RGTT didesain dengan temperatur keluaran reaktor yang cukup tinggi sekitar 950 °C adalah agar dapat dikopel dengan sistem konversi energi untuk menghasilkan konfigurasi 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 ( $h_{ther}$ ) merupakan hasil perkalian antara efisiensi generator listrik dengan daya mekanik yang merupakan selisih antara daya turbin gas dan daya kompresor<sup>[7]</sup>. 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)* meliputi seluruh unit yang memanfaatkan energi termal dari reaktor.

Dengan sistem kogenerasi, nilai faktor pemanfaatan energi termal (EUF) dapat mencapai 80%<sup>[8]</sup>. Nilai EUF yang tinggi akan meningkatkan nilai keekonomian sistem kogenerasi dan efisiensi pemanfaatan cadangan bahan bakar. Nilai EUF sistem konversi energi dapat didefinisikan sbb<sup>[9]</sup>.

$$EUF = (W + Qu) / F \quad (4)$$

dengan

- EU = nilai faktor pemanfaatan energi
- F = energi total yang diberikan kepada instalasi kogenerasi
- W = kerja yang dihasilkan dari instalasi kogenerasi
- Qu = energi termal yang tidak dimanfaatkan dari instalasi kogenerasi

## METODOLOGI PEMODELAN DAN PERHITUNGAN

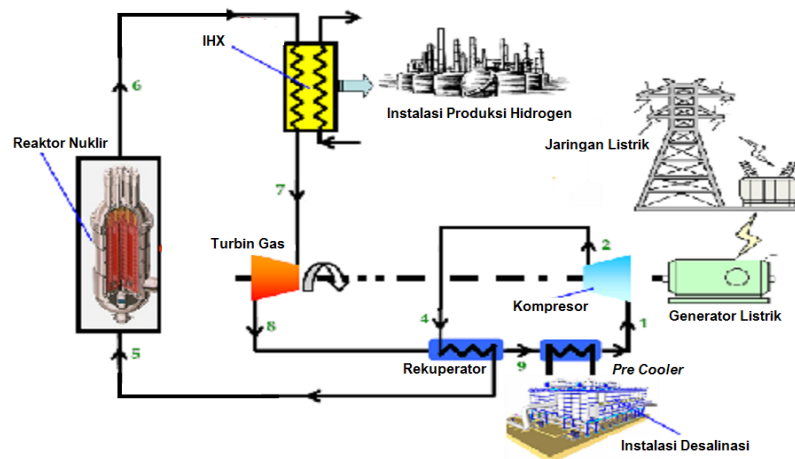
Sistem konversi energi pada RGTT200K dimodelkan sebagai siklus langsung di mana semua komponen utama yaitu : IHX, turbin gas, rekuperator, *precooler*, dan kompresor berada dalam satu alur siklus aliran pendingin. Energi termal untuk produksi gas hidrogen diambil melalui IHX, sedangkan untuk proses desalinasi diambil dari *precooler*. Untuk proses produksi gas hidrogen diperlukan IHX yang mampu menyediakan energi termal dengan temperatur tinggi yaitu minimal 850 °C<sup>[10]</sup>. 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<sup>[9,10]</sup>. *Precooler* yang dipasang pada *inlet* kompresor didesain menggunakan tipe *shell and tube*, sisi panas *precooler* mengalir melalui *tube* sedangkan sisi dingin mengalir melalui *shell*.

Diagram skematik sistem konversi energi RGTT200K ditunjukkan pada Gambar 1. Sumber energi termal di sini adalah reaktor gas temperatur tinggi (RGTT) berdaya termal 200 MW dengan dan tekanan *outlet* 5 MPa<sup>[2,3,4,5]</sup>.

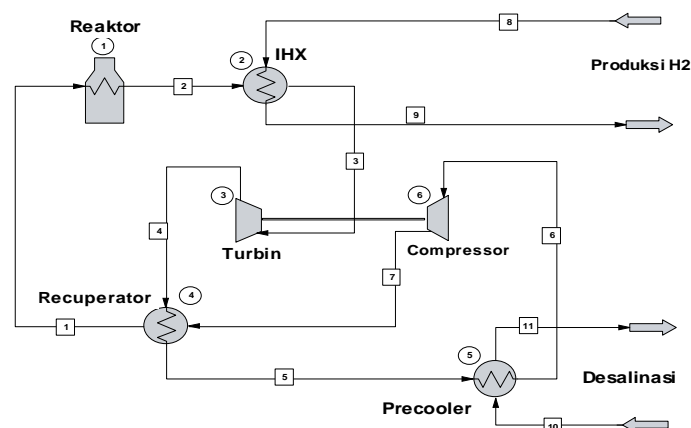
Gas helium sebagai pendingin primer mengalir dari reaktor membawa energi termal melalui IHX, turbin gas, rekuperator, *precooler*, kompresor dan kembali ke reaktor. Instalasi produksi gas hidrogen menerima energi termal dari sistem konversi energi kogenerasi melalui IHX. Untuk keperluan produksi gas hidrogen dengan proses daur *sulfur-iodine* diperlukan energi termal dengan temperatur minimal 850 °C<sup>[8]</sup>, sedangkan untuk keperluan instalasi desalinasi air laut energi termal diambil dari sistem konversi energi melalui *precooler* yang dipasang pada *inlet* kompresor.

Dalam penelitian sebelumnya<sup>[5]</sup> telah dilakukan validasi pemodelan sistem konversi

energi menggunakan ChemCAD 6.1.4 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 6.1.4 cukup memadai<sup>[5]</sup>. Untuk keperluan analisis termodinamika atau perhitungan parameter kinerja sistem konversi energi RGTT200K, maka sistem konversi energi tersebut dimodelkan menggunakan program komputer ChemCAD 6.1.4 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Skematik sistem konversi energi RGTT200K dengan kogenerasi



Gambar 2. Model sistem konversi energi RGTT200K menggunakan ChemCAD 6.1.4

Unit reaktor sebagai penyedia energi termal dimodelkan sebagai reaktor Gibbs. Dalam program komputer ChemCAD 6.1.4, 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 meminimisasi 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.

Model IHX ditetapkan bertipe *shell and tube* dengan mengacu pada desain konseptual IHX GTHTR300C<sup>[10]</sup>. 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 6.1.4 dalam perhitungan parameter kinerja sistem konversi energi RGTT200K ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data *input* untuk setiap komponen

Parameter	Nilai
Daya termal reaktor	200 MW
Tekanan <i>outlet</i> reaktor	5,04 MPa
<i>Pressure drop</i> pada reaktor	0,12 MPa
<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>shell</i> IHX	0,04 MPa
<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>tube</i> IHX	0,08 MPa
Efisiensi politropik turbin gas dan kompresor	0,96
<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>shell</i> rekuperator	0,06 MPa
<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>tube</i> rekuperator	0,08 MPa
<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>shell</i> rekuperator	0,04 MPa
<i>Pressure drop</i> pada sisi <i>tube</i> rekuperator	0,08 MPa
Temperatur <i>heat sink</i>	28,0 °C

Dalam perhitungan ini daya termal reaktor dan tekanan *outlet* reaktor diasumsikan tetap yaitu sebesar 200 MW dengan tekanan 5,04 MPa. Temperatur *outlet* reaktor divariasi mulai dari 900 °C hingga 1000 °C. Laju alir massa pada sisi dingin IHX ditetapkan sebesar 140 kg/s, hal ini didasarkan pada pertimbangan bahwa temperatur keluaran dari IHX minimal sebesar 850 °C agar dapat digunakan untuk

proses produksi hidrogen.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan distribusi daya pada komponen utama ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 3. Grafik pada Gambar 3 menunjukkan bahwa pada daya termal reaktor sebesar 200 MW dan tekanan tetap sebesar 5,04 MPa, perubahan temperatur *outlet* reaktor

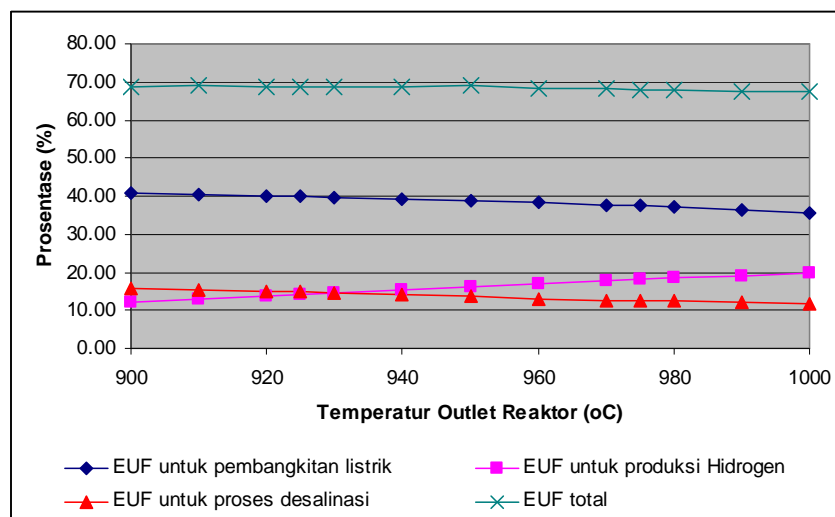
berpengaruh pada distribusi daya termal pada komponen utama sistem konversi energi RGTT200K.

Penurunan temperatur *outlet* reaktor mengakibatkan penurunan temperatur *outlet* sekunder IHX yang digunakan 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<sup>[8]</sup>.

Sebaliknya naiknya temperatur *outlet* reaktor mengakibatkan penurunan energi termal yang ditransfer melalui *precooler* untuk proses desalinasi. Grafik pada Gambar 3 tersebut menunjukkan kenaikan daya yang ditransfer melalui IHX dan penurunan daya yang ditransfer melalui *precooler* berpotongan pada temperatur *outlet* reaktor 950 °C, sedangkan daya mekanik yang digunakan untuk pembangkit listrik mengalami sedikit penurunan apabila temperatur *outlet* reaktor

naik. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan daya termal dari reaktor untuk konfigurasi kogenerasi seperti pada Gambar 1 akan optimal pada temperatur *outlet* reaktor 950 °C.

Dari Tabel 2 dan Gambar 3 terlihat bahwa daya termal untuk pembangkitan listrik yang merupakan selisih antara daya termal akibat ekspansi turbin dan daya termal kompresor menurun seiring dengan turunnya temperatur *outlet* 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 naik seiring dengan peningkatan temperatur *outlet* reaktor. Dengan menggunakan persamaan (4) maka efisiensi termal dan EUF pada sistem konversi energi RGTT200K dapat dihitung dan hasil perhitungannya dapat digambarkan pada grafik Gambar 4.



Gambar 4. Grafik EUF masing-masing aplikasi pada RGTT200K sebagai fungsi temperatur *outlet* reaktor.