

ANALISIS KINERJA TURBIN KOMPRESOR UNTUK DESAIN KONSEPTUAL UNIT KONVERSI DAYA RGTT200K

Oleh

Ign. Djoko Irianto
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

ABSTRAK

ANALISIS KINERJA TURBIN KOMPRESOR UNTUK DESAIN KONSEPTUAL UNIT KONVERSI DAYA RGTT200K. RGTT200K adalah reaktor gas temperatur tinggi yang secara konseptual didesain untuk pemenuhan energi di Indonesia. RGTT200K adalah salah satu jenis reaktor generasi IV yang didesain dengan konsep kogenerasi untuk pembangkit listrik dan produksi hidrogen. Reaktor ini berpendingin gas helium dengan temperatur *outlet* 950 °C dan bertekanan 5 MPa. Keberhasilan desain konseptual RGTT200K sangat ditentukan oleh keberhasilan desain unit konversi dayanya termasuk didalamnya desain kinerja komponen-komponennya. Komponen utama untuk pembangkit listrik pada unit konversi RGTT200K adalah turbin dan kompresor. Unit konversi daya RGTT200K menerapkan siklus Brayton. Untuk keperluan desain konseptual unit konversi daya RGTT200K, turbin-kompresor dihitung dengan konfigurasi satu poros untuk turbin dan kompresor aksial. Analisis dilakukan dengan pemodelan proses termodinamika sistem, melalui pendekatan metode volume kendali. Semua komponen sistem, meliputi reaktor, *intermediate heat exchanger*, turbin, kompresor, rekuperator, unit produksi hidrogen dan unit desalinasi dimodelkan secara termodinamika sebagai suatu volume kendali. Hasil perhitungan karakteristik turbin-kompresor menunjukkan bahwa perbandingan kompresi optimal untuk turbin dan kompresor masing-masing sebesar 1,7 dan 2,5. Dengan efisiensi isentropis statis 0,9 diperoleh penurunan temperatur sebesar 222,5 K. Sehingga temperatur masuk dan keluar turbin masing-masing sebesar 1123 K dan 900,5 K. Dengan laju aliran helium 120 kg/s dan $\gamma = 1,66$ diperoleh daya turbin 138,532 MW. Daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor sebesar 88,209 MW diperoleh dari daya turbin. Dengan demikian daya listrik yang dihasilkan dari turbin sebesar 45,829 MW.

Kata kunci: RGTT200K, karakteristik, turbin, kompresor, temperatur, tekanan, daya.

ABSTRACT

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF COMPRESSOR TURBINE UNIT FOR THE CONCEPTUAL DESIGN OF POWER CONVERSION RGTT200K. RGTT200K is a high temperature gas-cooled reactor that is conceptually designed for the fulfillment of energy in Indonesia. RGTT200K is one type of generation IV reactors that are specifically designed with the concept of cogeneration for power generation and hydrogen production. This reactor using helium as a coolant reactor with an outlet temperature of 950 °C and outlet pressure 5 MPa. The succeeded of RGTT200K conceptually design is largely determined by the successfully of power conversion unit conceptual design includes performance of the components. The main components for power conversion unit is a turbine and compressor RGTT200K. Power conversion unit RGTT200K implementing Brayton cycle. For conceptual design purposes RGTT200K power conversion units, turbine-compressor is calculated by the configuration of the shaft for axial turbines and compressors. Analysis was carried out with thermodynamics processes modeling of the system by the control volume method approximation. All components of the system, consist of reactor, intermediate heat exchanger, turbine, compressor, recuperator, hydrogen production unit, and desalination unit were thermodynamically modeled. The result of the turbine-compressor characteristics calculation indicate that the optimum of pressure ratio for turbine and compressor respectively at 1.7 and 2.5. With the isentropic static efficiency of 0.9, the temperature decrease about 222.5K. So that the inlet and outlet temperature of turbine are 1123K and 900.5K. With a helium flow rate of 120 kg/s and $\gamma = 1.66$, obtained 138.532 MW turbine power. Power needed to drive the compressor for 88.209 MW is obtained from the turbin power. Thus the electrical power generated from the turbines of 45.829 MW.

Keyword : RGTT200K, characteristic, turbine, compressor, pressure, temperature, power

PENDAHULUAN

Keberlanjutan pembangunan di Indonesia akan terganggu apabila pasokan energi terhambat karena menipisnya cadangan minyak bumi dan bahan bakar fosil lainnya. Untuk menjamin keberlanjutan pembangunan, diperlukan pengembangan sumber-sumber energi baru dan terbarukan yang memadai, terutama paket teknologi energi yang efisien serta ramah lingkungan. Berbagai sumber energi baru dan terbarukan perlu terus dieksplorasi dan dikembangkan termasuk opsi pemanfaatan energi nuklir.

Untuk menunjang opsi pemanfaatan energi nuklir, penelitian dan pengembangan di bidang energi diarahkan pada penelitian dan pengembangan di bidang teknologi reaktor dan sistem konversi dayanya. Optimalisasi sistem konversi daya dilakukan dengan penerapan konsep kogenerasi untuk pembangkit listrik dan produksi gas hidrogen atau aplikasi industri lainnya. Penelitian dan pengembangan sistem energi nuklir juga memperhatikan faktor keselamatan, keamanan, keandalan dan keekonomian, serta kebutuhan masyarakat setempat.

Kegagalan reaktor air didih (*Boiling Water Reactor* = BWR) di Fukushima mengatasi gelombang tsunami, semakin menambah wawasan dalam memilih tipe reaktor yang lebih handal dan memiliki faktor keselamatan reaktor yang tinggi. Selain faktor keselamatan reaktor, penetapan jenis reaktor juga diarahkan pada jenis reaktor yang mampu menerapkan konsep kogenerasi yaitu untuk pembangkit listrik dan untuk memasok energi

termal pada aplikasi proses industri lainnya. Dengan demikian, reaktor nuklir tidak semata sebagai pembangkit listrik, tetapi juga digunakan sebagai pemasok energi termal untuk keperluan industri. Konsep sistem ini kemudian dikenal sebagai sistem energi nuklir (SEN)^[1]. Salah satu jenis reaktor yang dipertimbangkan untuk dikembangkan dalam rangka pemenuhan energi di Indonesia adalah jenis reaktor gas temperatur tinggi (RGTT)^[1,2,3].

Pada tahap awal pengembangan RGTT untuk memasok energi di Indonesia, dilakukan penyiapan desain konseptual RGTT dengan konsep kogenerasi dan berdaya termal 200 MWt yang dikenal dengan nama RGTT200K^[2,3]. Konsep kogenerasi RGTT200K ditujukan untuk pembangkit listrik, produksi gas hidrogen dan proses desalinasi air laut.

RGTT200K didesain berpendingin gas helium dengan temperatur *outlet* reaktor 950 °C dan bertekanan 5 MPa^[2,3]. Kemurnian gas helium sebagai pendingin primer harus senantiasa dikontrol karena sangat berpengaruh pada perpindahan panas, integritas material struktur, keandalan dan keselamatan operasi sistem reaktor^[4]. Keberhasilan desain sistem energi nuklir berbasis RGTT ini sangat ditentukan oleh keberhasilan desain sistem reaktor dan desain sistem konversi dayanya termasuk di dalamnya desain kinerja komponen-komponennya. Komponen utama sistem konversi daya dalam RGTT200K yang menerapkan siklus langsung adalah *intermediate heat exchanger* (IHX), turbin, kompresor, rekuperator, *intercooler* dan sistem purifikasi pendingin primer^[2,3].

RGTT200K mengaplikasikan siklus Brayton tertutup untuk memindahkan panas dari teras reaktor ke sistem konversi daya. Untuk menganalisis sistem pemindahan panas tersebut digunakan model sistem turbin dan kompresor dengan satu poros. Fluida kerja sistem pendingin ini menggunakan gas helium. Pada temperatur tinggi gas helium tersebut diekspansikan melalui sudu-sudu turbin gas. Putaran sudu-sudu turbin tersebut memutar poros guna memperoleh kerja poros.

Kerja poros digunakan untuk menggerakkan kompresor dan generator agar menghasilkan energi listrik. Pada siklus sekunder helium panas yang keluar dari turbin dan masih mempunyai harga entalpi yang tinggi dapat dimanfaatkan kembali. Tekanan gas helium yang berkurang akibat berekspansi di turbin didinginkan oleh *precooler*.

Kemudian dikompresikan kembali oleh kompresor agar tekanannya kembali ke tekanan kerja. Turbin mengubah energi kinetik menjadi ekspansi helium, kemudian mengalirkan helium kembali ke alat penukar panas utama dimana terlebih dahulu dinaikan tekanannya oleh kompresor.

Penelitian ini berfokus pada perhitungan karakteristik turbin kompresor untuk RGTT200K dengan turbin gas helium arah aksial satu poros. RGTT200K berpendingin helium dengan siklus tertutup Brayton ditinjau dari sudut pandang termodinamika yang diidealisasikan isentropik. Peningkatan efisiensi siklus dilakukan dengan menaikkan rasio kompresi pada kompresor maupun turbin.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi daya dan efisiensi turbin-kompresor antara lain : tekanan, temperatur dan laju alir fluida pendingin. Kompresor pada RGTT200K berfungsi untuk menaikkan tekanan gas helium sebelum masuk ke dalam reaktor agar tekanan reaktor terjaga pada 5 MPa.

Dalam makalah ini dibahas tentang hasil analisis kinerja turbin dan kompresor pada desain konseptual sistem konversi daya RGTT200K. Analisis dilakukan dengan pemodelan proses termodinamika sistem, melalui pendekatan metode volume kendali. Semua komponen sistem, meliputi reaktor, *intermediate heat exchanger*, turbin, kompresor, rekuperator, unit produksi hidrogen dan unit desalinasi dimodelkan secara termodinamika sebagai suatu volume kendali.

SISTEM KONVERSI DAYA RGTT200K

Konfigurasi sistem konversi daya kogenerasi RGTT200K menerapkan siklus langsung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1^[2,3]. Sumber energi termal adalah reaktor gas temperatur tinggi (RGTT) berdaya 200 MWt dengan temperatur *outlet* 950 °C dan tekanan *outlet* 5 MPa. Gas helium sebagai pendingin primer mengalir dari reaktor membawa energi termal melalui *intermediate heat exchanger* (IHX), turbin, rekuperator, *precooler*, kompresor dan kembali ke reaktor. Instalasi produksi gas hidrogen menerima energi termal dari sistem konversi daya kogenerasi melalui IHX, sedangkan instalasi desalinasi air laut menerima energi termal dari unit konversi daya melalui *intercooler* yang dipasang sebelum kompresor.

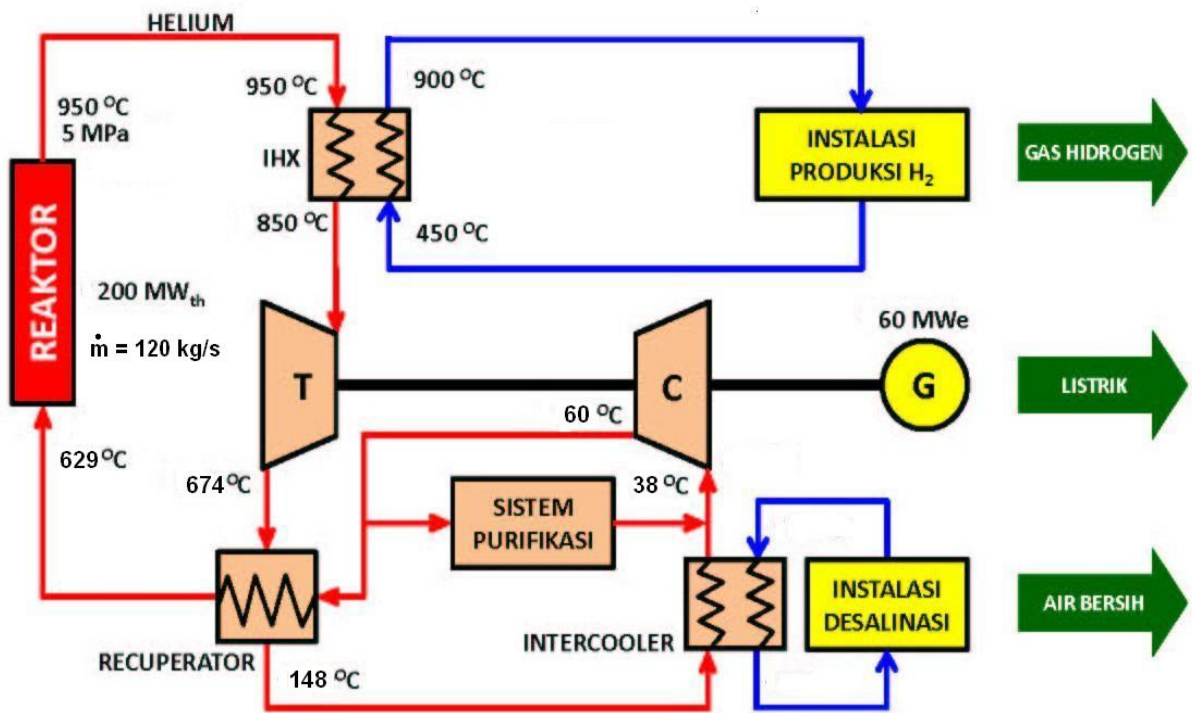
Desain penukar panas IHX pada RGTT200K mengacu pada desain IHX pada reaktor GTHTR300C^[5]. Penggunaan gas helium sebagai pendingin sangat menguntungkan karena konduktivitas termal dan koefisien perpindahan panas untuk helium lebih tinggi daripada udara. Karena berat molekul hidrogen lebih rendah daripada udara maka kemungkinan kebocoran helium akan lebih mudah. Oleh karena itu perlu sistem isolasi yang ketat di bagian-bagian yang bergerak pada turbin maupun kompresor.

Salah satu hal yang perlu dipertimbangkan dalam siklus langsung adalah kemungkinan masuknya gas pengotor ke dalam pendingin reaktor. Masuknya gas pengotor ke dalam pendingin primer melalui mekanisme *ingres* baik *water ingres* maupun *air ingres* dapat berpengaruh pada perpindahan panas, integritas material struktur serta keandalan operasi sistem reaktor. Dengan demikian, dalam konfigurasi kogenerasi siklus langsung juga harus dipasang sistem pemurnian gas helium

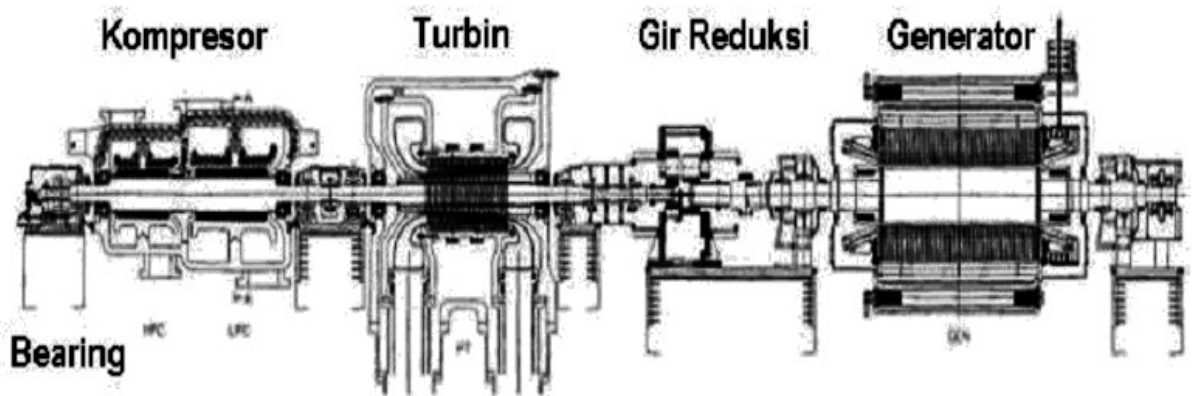
dalam siklus sistem konversi daya. Sistem pemurnian gas helium dipasang pada *outlet* kompresor dan output sistem pemurnian gas helium masuk pada *inlet* kompresor.

Kompresor helium dioperasikan pada rasio tekanan rendah, panas spesifik dan rasio panas spesifik yang tinggi, akibatnya kompresor didisain beberapa tingkat tekanan untuk mencapai rasio tekanan yang dibutuhkan. Tetapi aspek *blade* yang rendah cenderung meningkatkan aliran sekunder dan kebocoran aliran akibat dari banyaknya tingkat sudu.

Desain sistem konversi daya RGTT200K ini dirancang untuk menghasilkan listrik dari generator sebesar 85,147 MWe^[2]. Dalam desain sistem konversi daya RGTT200K ini, unit turbin kompresor dipasang dalam satu poros dengan mengacu pada desain unit turbin kompresor GTHTR300^[6] seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram sistem konversi daya RGTT200K [2,3]



Gambar 2. Desain unit turbin kompresor aksial poros tunggal [6]

METODE PERHITUNGAN

Perhitungan Karakteristik Kompresor

Perhitungan karakteristik kompresor untuk sistem konversi daya RGTT200K dilakukan dengan menentukan besaran-besaran fisis siklus termodinamika yang digunakan dalam menghitung daya kompresor. Daya kompresor tersebut divariasikan pada berbagai perbandingan kompresi yang berubah guna memperoleh efisiensi maksimum. Parameter termodinamika yang digunakan untuk menghitung karakteristik turbin-kompresor antara lain: tekanan, temperatur dan laju aliran helium.

Dengan asumsi aliran adalah *streamline* masuk ke rotor pada satu arah (radius) dan meninggalkan sudu pada radius yang lain dengan kecepatan berbeda, perubahan momentum sudut sewaktu melewati rotor menghasilkan peningkatan entalpi. Proses aliran melalui *rotor* dan *stator* dapat dianggap adiabatik, dan ada peningkatan tekanan stagnasi hanya dalam rotor dan penurunan tekanan stagnasi terjadi dalam stator akibat gesekan fluida.

Analisis termodinamika pada kompresor menggunakan siklus Brayton. Analisis ini dimaksudkan untuk menentukan kondisi masuk dan keluar kompresor. Pengambilan asumsi untuk perhitungan termodinamika kompresor adalah didasarkan pada efisiensi politropik, yaitu efisiensi isentropik dari kompresor dan turbin yang dibuat konstan untuk setiap tingkat berikutnya dalam keseluruhan proses. Dalam proses ini terjadi stagnasi dimana entalpi, tekanan, temperatur dianalisis pada kondisi fluida

yang mengalir mengalami hambatan sehingga pada saat itu kecepatan sama dengan nol isentropis.

Perbandingan tekanan optimum antara turbin dan kompresor dapat ditunjukkan pada persamaan (1)^[7].

$$r_p = \left[\frac{T_{max}}{T_{min}} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1)$$

dengan

r_p = Perbandingan tekanan optimum

T_{max} = Temperatur masuk Turbin (K)

T_{min} = Temperatur masuk Kompresor (K)

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

c_p dan c_v masing-masing adalah kapasitas panas spesifik untuk helium pada tekanan tetap dan kapasitas panas untuk helium pada volume tetap.

Selanjutnya, perbandingan antara temperatur keluar (T_2) dan temperatur masuk (T_1) pada kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan (2)^[7].

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

dengan

T_1 = Temperatur masuk kompresor (K)

T_2 = Temperatur keluar kompresor (K)

P_1 = Tekanan masuk kompresor (Pa)

P_2 = Tekanan keluar kompresor (Pa)

Dengan menggunakan persamaan energi untuk aliran mantap dan berkembang penuh pada rotor kompresor, maka besarnya kerja kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan^[7] sebagai berikut:

$$W_{kompresor} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (3)$$

dengan

W = kerja (W)

\dot{m} = laju alir pendingin (kg/s)

c_p = kapasitas panas spesifik untuk helium pada tekanan tetap (J/g·K)

T = temperatur (K)

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

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4)$$

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

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_s} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \right\} \quad (5)$$

dengan

η_s = efisiensi isentropik kompresor.

Nomenklatur besaran pada persamaan-persamaan untuk kompresor yaitu persamaan

(1) sampai dengan persamaan (5) yang meliputi besaran $W, \dot{m}, c_p, c_v, \eta_s$

sama dengan nomenklatur pada persamaan-persamaan untuk turbin yaitu persamaan (6) sampai dengan persamaan (9).

Perhitungan Karakteristik Turbin Aksial

Dalam desain konseptual sistem konversi daya pada RGTT200K ini dipilih turbin dengan aliran aksial. Dalam turbin aksial, relasi perbandingan antara temperatur masuk dan keluar turbin dengan tekanan masuk dan keluar turbin untuk turbin ideal ditunjukkan pada persamaan (6).

$$\frac{T_4}{T_3} = \left[\frac{P_4}{P_3} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (6)$$

dengan

T_3 = Temperatur masuk turbin (K)

T_4 = Temperatur keluar turbin (K)

P_3 = Tekanan masuk turbin (Pa)

P_4 = Tekanan keluar turbin (Pa)

Dengan menerapkan persamaan energi aliran mantap berkembang penuh di sepanjang rotor atau sudu jalan, maka kerja yang diberikan oleh turbin dapat dihitung menggunakan persamaan^[7] sebagai berikut:

$$W_{turbin} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) \quad (7)$$

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

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (8)$$

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

$$T_4 = T_3 \left\{ 1 + \eta_s \left[1 - \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\} \quad (9)$$

Pada persamaan (6) sampai dengan persamaan (9) di atas, subskrip 3 untuk titik masuk (*inlet*) turbin dan subskrip 4 untuk titik keluar (*outlet*) turbin. P dan T masing-masing untuk tekanan dan temperatur absolut.

Besaran ... $w, \dot{m}, c_p, c_v, \eta_s$... secara berurutan menyatakan kerja turbin spesifik, laju aliran massa, kapasitas panas spesifik tekanan konstan, kapasitas panas spesifik volume konstan, dan efisiensi isentropik turbin.

Untuk merancang sudu turbin dibutuhkan kondisi gas baik dalam keadaan statis maupun stagnasi pada setiap tingkat. Keadaan ini meliputi saat gas masuk sudu diam, keluar sudu diam dan masuk sudu gerak, serta keluar sudu gerak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

RGTT200K secara konseptual didesain untuk pembangkit listrik, produksi gas hidrogen dan proses desalinasi air laut. Dalam desain konseptual RGTT200K, sebagai sumber energi termal adalah reaktor gas temperatur tinggi berdaya termal 200 MWt. Pemilihan unit turbin gas helium dalam desain konseptual sistem konversi daya dikarenakan siklus turbin uap tidak dapat langsung dikopel dalam siklus langsung RGTT200K. Selain itu pemilihan unit turbin gas helium dalam siklus langsung agar dapat meningkatkan temperatur gas helium.

Gas helium dianggap sebagai fluida kerja yang menjanjikan karena memiliki banyak aspek yang menguntungkan untuk aplikasi RGTT200K.

Gas helium adalah gas inert yang non-korosif dan tidak menjadi radioaktif. Efisiensi siklus dengan gas helium sebagai fluida kerja memiliki keunggulan teoritis karena rasio panas spesifik gas helium yang tinggi. Pemilihan fluida kerja tidak hanya berpengaruh secara signifikan terhadap efisiensi siklus tapi juga pada integritas sistem. Oleh karena itu, teknologi siklus turbin gas helium sangat penting dalam pengembangan desain RGTT200K ini.

Data masukan untuk perhitungan parameter turbin-kompresor RGTT200K ditunjukkan pada Tabel 1. Sumber panas pada turbin gas helium diperoleh dari *outlet* pendingin reaktor nuklir RGTT200K yang berdaya 200 MWt dan bertekanan sekitar 5 MPa. Turbin dan kompresor dihubungkan dengan generator sebagai pembangkit listrik pada satu poros dengan kecepatan putaran 3000 rpm. Laju alir massa gas helium sebagai pendingin reaktor adalah 120 kg/s. Turbin menerima aliran pendingin dari *outlet* IHX pada tekanan 5 MPa dan temperatur 1123 K. Sedangkan kompresor menerima aliran pendingin dari *inlet intercooler* pada tekanan 2 MPa dan temperatur 311 K. Perbandingan kompresi antara *inlet* dan *outlet* divariasikan antara 1,5 hingga 2,8 baik untuk turbin maupun kompresor.

Perhitungan daya dan temperatur keluaran pada kompresor menggunakan persamaan (3) dan (5). Hasil perhitungan tekanan, temperatur dan daya pada kompresor untuk perbandingan kompresi antara 1,5 hingga 2,8 ditunjukkan pada Tabel 2. Untuk mendorong pendingin agar mengalir hingga *inlet* reaktor, maka diperlukan tekanan keluaran dari kompresor minimal sebesar 5 MPa. Oleh karena itu diperlukan perbandingan kompresi pada kompresor minimal sebesar 2,5. Pada

perbandingan kompresi 2,5 dan tekanan masuk kompresor 2,0 MPa, maka diperoleh tekanan keluar kompresor sebesar 5,0 MPa. Pada temperatur masuk kompresor 311 K dengan efisiensi isentropis statis kompresor sebesar 0,9 maka didapatkan kenaikan temperatur akhir sebesar 141,7 K sehingga temperatur keluar dari kompresor menjadi 452,7 K. Pada laju aliran pendingin helium 120 kg/s dan $\gamma = 1,6$ diperoleh daya kompresor sebesar 88,209 MW.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Desain Kompresor Aksial RGTT200K

r_p	P_{in} (MPa)	P_{out} (MPa)	T_{in} (K)	T_{out} (K)	Daya Kompresor
1,5	2,0	3,0	311	367,7	35.328
1,6	2,0	3,2	311	377,6	41.464
1,7	2,0	3,4	311	387,1	47.364
1,8	2,0	3,6	311	396,2	53.051
1,9	2,0	3,8	311	405,0	58.544
2,0	2,0	4,0	311	413,6	63.859
2,1	2,0	4,2	311	421,8	69.010
2,2	2,0	4,4	311	429,9	74.011
2,3	2,0	4,6	311	437,7	78.871
2,4	2,0	4,8	311	445,3	83.601
2,5	2,0	5,0	311	452,7	88.209
2,6	2,0	5,2	311	459,9	92.703
2,7	2,0	5,4	311	467,0	97.091
2,8	2,0	5,6	311	473,8	101.378

Tabel 1. Data masukan parameter turbin-kompresor RGTT200K

parameter	Nilai
Laju aliran massa helium (kg/s)	120
Temperatur masuk kompresor (K)	311
Tekanan masuk kompresor (MPa)	2
Temperatur masuk turbin (K)	1123
Tekanan masuk turbin (MPa)	5
Perbandingan kompresi (<i>Pressure ratio</i>)	1,5 – 2,8
Diameter Hubb rotor (mm)	500
Kecepatan putaran (rpm)	3000

Daya dan temperatur keluaran dari turbin dihitung menggunakan persamaan (7) dan (9). Hasil perhitungan tekanan, temperatur dan daya pada turbin untuk perbandingan kompresi antara 1,5 hingga 2,8 ditunjukkan pada Tabel 3. Tekanan *inlet* turbin sama dengan tekanan *outlet* reaktor yaitu sebesar 5,0 MPa, dengan variasi perbandingan kompresi maka tekanan outlet turbin bervariasi antara 1,8

hingga 3,3 MPa. Daya turbin naik apabila perbandingan kompresi pada turbin dinaikkan, sementara apabila perbandingan kompresi dinaikkan maka diperoleh temperatur keluaran dari turbin yang rendah seperti yang terlihat pada Gambar 2. Oleh karena itu harus ditentukan perbandingan kompresi yang optimal pada Turbin.

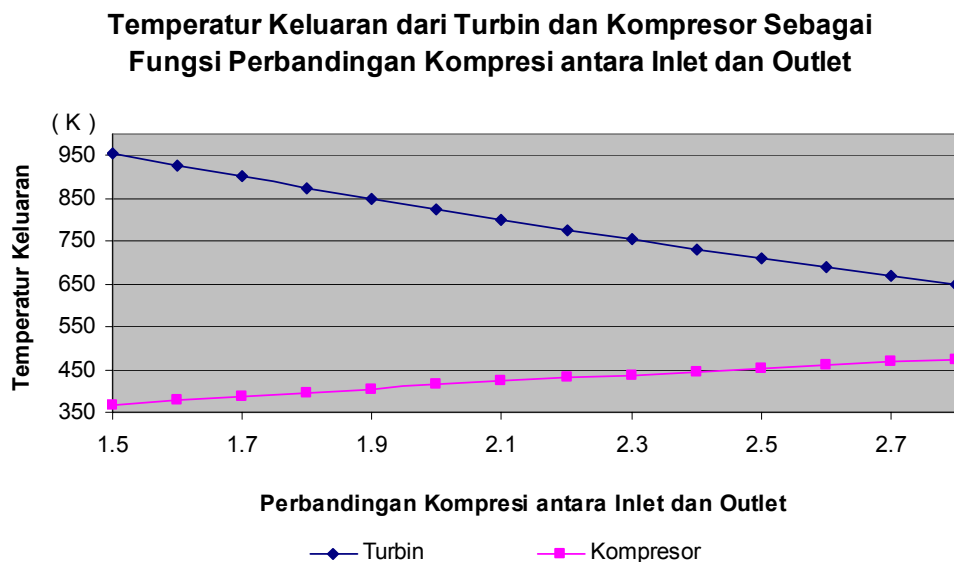
Tabel 3. Hasil Perhitungan Disain Turbin Aksial RGTT200K

r_p	P_{in} (MPa)	P_{out} (MPa)	T_{in} (K)	T_{out} (K)	Daya Turbin
1,5	5,0	3,3	1123	957,0	103.329
1,6	5,0	3,1	1123	928,2	121.275
1,7	5,0	2,9	1123	900,5	138.532
1,8	5,0	2,8	1123	873,8	155.166
1,9	5,0	2,6	1123	848,0	171.232
2,0	5,0	2,5	1123	823,0	186.778
2,1	5,0	2,4	1123	798,8	201.845
2,2	5,0	2,3	1123	775,3	216.470
2,3	5,0	2,2	1123	752,5	230.685
2,4	5,0	2,1	1123	730,2	244.520
2,5	5,0	2,0	1123	708,6	257.998
2,6	5,0	1,9	1123	687,5	271.143
2,7	5,0	1,9	1123	666,9	283.976
2,8	5,0	1,8	1123	646,7	296.516

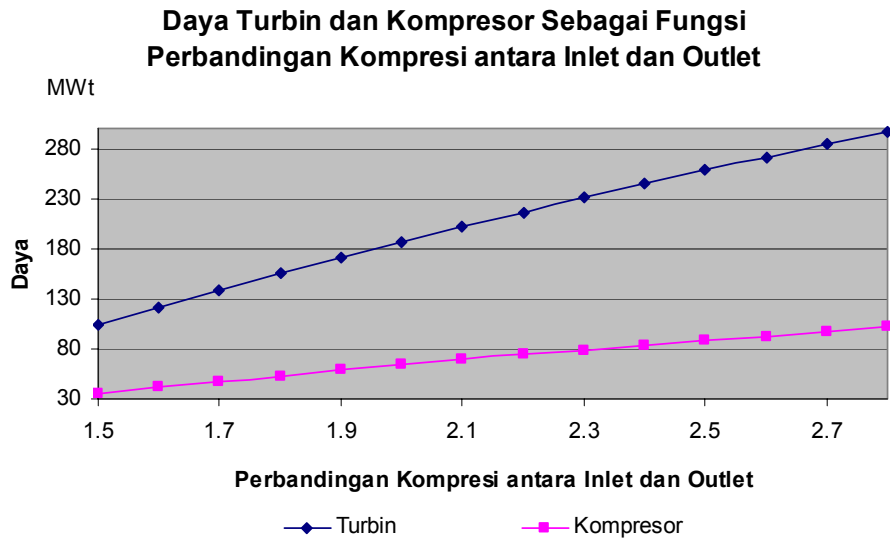
Untuk memperoleh kinerja turbin yang optimal dan untuk menghindari stres temperatur pada turbin maka penurunan temperatur pada turbin dirancang sekecil mungkin. Selain itu, penurunan temperatur yang terlalu besar akan menyebabkan temperatur *inlet* reaktor terlalu rendah. Oleh karena itu dalam rancangan unit konversi daya RGTT200K ini perlu ditetapkan perbandingan kompresi pada turbin yang optimal sebesar 1,7. Pada turbin dengan perbandingan kompresi 1,7 dan tekanan masuk turbin 5 MPa didapat tekanan keluar turbin 2,9 MPa. Pada temperatur masuk turbin 1123 K dengan efisiensi isentropis statis turbin sebesar 0,9 maka diperoleh penurunan temperatur sebesar 222,5 K sehingga temperatur keluar turbin 900,5 K. Dengan laju aliran pendingin gas helium 120 kg/s dan nilai $\gamma = 1.6$ diperoleh

daya turbin sebesar 138,532 MW.

Seperti yang terlihat pada Gambar 3, daya listrik yang dihasilkan akan semakin besar apabila perbandingan kompresi dinaikkan. Untuk kompresor, diperlukan perbandingan kompresi minimal 2,5 sedangkan perbandingan kompresi untuk turbin maksimal 1,7. Daya listrik yang merupakan keluaran dari generator adalah selisih antara daya turbin dengan daya kompresor. Seperti yang terlihat pada Gambar 3 dengan perbandingan kompresi untuk turbin 1,7 dan perbandingan kompresi kompresor 2,5 maka diperoleh daya listrik sebesar 45,829 MW. Sedangkan sisa daya keluaran reaktor dan daya listrik digunakan untuk proses desalinasi dan produksi gas hidrogen.



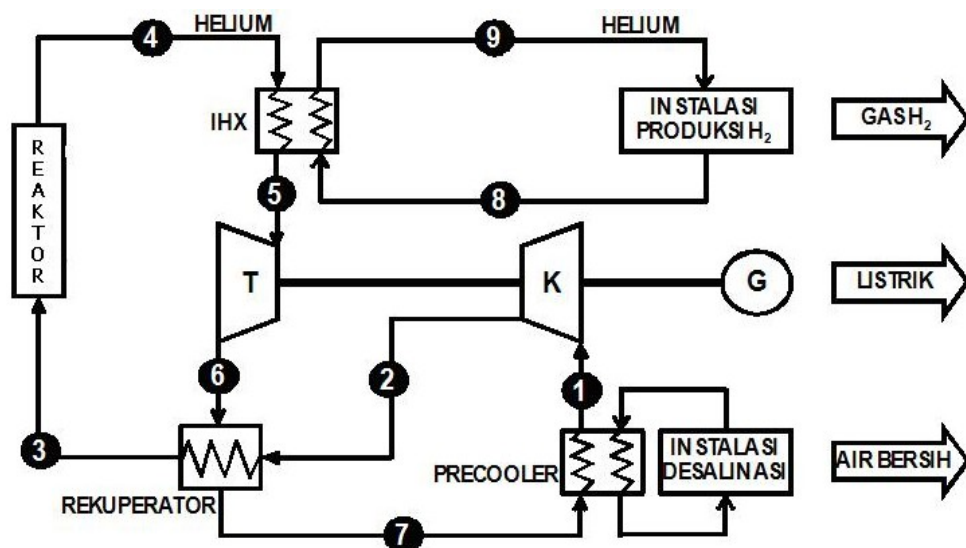
Gambar 2. Grafik Temperatur Turbin dan Kompresor sebagai Fungsi Perbandingan Kompresi antara *Inlet* dan *Outlet*



Gambar 3. Grafik Daya Turbin dan Kompresor Sebagai Fungsi Perbandingan Kompresi antara *Inlet* dan *Outlet*.

Untuk menganalisis distribusi tekanan dan temperatur pada desain konseptual sistem SEN kogenerasi berbasis RGTT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, dibuat pemodelan proses termodinamika sistem secara matematis. Pemodelan meliputi model proses termodinamika dalam reaktor nuklir sebagai pemanas non-isobarik yang didekati secara isobarik, proses termodinamika kompresi gas non-isentropis dalam kompresor, proses

termodinamika ekspansi gas non-isentropis dalam turbins gas, dan proses termodinamika perpindahan panas non-isobarik dalam IHX (*intermediate heat exchanger*) dan rekuperator. Nilai perbandingan kompresi untuk turbin dan kompresor ditetapkan sebesar 1,7 dan 2,5.



Gambar 4. Desain konseptual sistem RGTT200K

Dengan menetapkan besaran efisiensi isentropis turbin dalam perhitungan ini sebesar 0,9, menggunakan persamaan (6) sampai dengan (9) maka besaran temperatur dan tekanan keluaran turbin dapat diperoleh. Untuk perhitungan tekanan dan temperatur kompresor menggunakan persamaan (1) sampai dengan (5) dan besaran efisiensi isentropis berdasarkan acuan sebesar 0,9. Perhitungan besaran termodinamika untuk rekuperator dan

intercooler menggunakan metode yang sama seperti pada perhitungan untuk IHX^[10]. Hasil perhitungan termodinamika pada komponen utama unit konversi daya RGTT200K yang meliputi tekanan dan temperatur tertuang pada Tabel 4.

Tabel 4. Distribusi parameter keadaan pada 9 titik pengamatan sistem RGTT200K

Titik pengamatan	Parameter keadaan	
	Temperatur (K)	Tekanan (MPa)
1	311,0	2,0
2	452,7	5,0
3	902,0	5,02
4	1223,0	5,0
5	1123,0	4,98
6	900,5	2,9
7	421,0	2,02
8	789,0	5,18
9	1173	5,15

KESIMPULAN

Unit konversi daya RGTT200K telah didesain secara konseptual dengan menerapkan siklus langsung. Sebagai pembangkit listrik digunakan turbin dan kompresor aksial poros tunggal. Dari hasil perhitungan karakteristik turbin diperoleh perbandingan kompresi optimum untuk turbin 1,7 dan untuk kompresor 2,5. Pada perbandingan kompresi 1,7 untuk turbin, maka tekanan masuk dan keluar turbin masing-masing adalah 5,0 MPa dan 2.9 MPa.

Dengan efisiensi isentropis statis 0,9 diperoleh penurunan temperatur sebesar 222,5 K. Sehingga temperatur masuk dan keluar turbin masing-masing sebesar 1123 K dan 900,5 K. Dengan laju aliran helium 120 kg/s dan $\gamma = 1,66$ diperoleh daya turbin 138,532 MW. Daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor sebesar 88,209 MW diperoleh dari daya turbin. Dengan demikian daya listrik yang dihasilkan dari turbin sebesar 45,829 MW.

DAFTAR PUSTAKA

1. MOHAMMAD DHANDHANG PURWADI, "Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT", Prosiding Seminar Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir ke-16, Surabaya, 2010
2. 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.
3. 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.
4. IAEA "Current Status and Future Development of Modular High Temperature Gas Cooled Reactor Technology," IAEA-TECDOC-1198, 2001.
5. KAZUHIKO KUNITOMI, et al., "JAEA'S VHTR For Hydrogen And Electricity Cogeneration : GTHTR300C", Nuclear Engineering and Technology, Vol.39 No.1., February (2007).
6. S.TAKADA, T.TAKIZUKA, et al., "The 1/3-scale Aerodynamics Performance Test of Helium Compressor for GTHTR300 Turbo Machine of JAERI (STEP1)," Proceeding of ICONE11, Tokyo, Japan, April 20-23, 2003.
7. WIRANTO ARISMUNANDAR, "Pengantar Turbin Gas dan Motor Propulsi", Penerbit ITB, (2002)
8. T.TAKIZUKA, S.TAKATA, et al., "R&D on the Power Conversion System for Gas Turbine High Temperature Reactors," Nuclear Engineering and Design, North- Holland Publishing Company, pp.329-346, 2004.
9. IGN. DJOKO IRIANTO, "Analisis Kinerja IHX Untuk Desain Konseptual Unit Konversi Daya RGTT200K", dipresentasikan pada Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 19 Juli (2011).