

ANALISIS TERMAL SIKLUS TURBIN HELIUM UNTUK RGTT200K PADA KONDISI SPESIFIK DAYA MAKSIMUM

Sri Sudadiyo

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310
e-mail: sudadiyo@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS TERMAL SIKLUS TURBIN HELIUM UNTUK RGTT200K PADA KONDISI SPESIFIK DAYA MAKSIMUM. Dari sudut pandang sistem energi, konsep Reaktor Gas Temperatur Tinggi untuk kogenerasi dengan daya termal 200 MWth (RGTT200K) adalah salah satu reaktor daya nuklir generasi lanjut yang mempunyai kemampuan untuk produksi hidrogen, pembangkit listrik, dan desalinasi. Dalam makalah ini, penelitian dilakukan untuk unit konversi daya (Power Conversion Unit / PCU) dalam Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tipe RGTT200K. PCU berfungsi sebagai alat pemindah energi termal dari teras RGTT200K dimana energi termal tersebut dikonversikan menjadi listrik. Sistem PCU ini adalah siklus tertutup turbin helium atau siklus tertutup Brayton dengan mengaplikasikan poros tunggal. Analisis energi termal untuk sistem PCU ini dilakukan ketika reaktor nuklir beroperasi pada kondisi temperatur masuk 858 K, temperatur keluar 1220 K, dan tekanan 5 MPa. Parameter yang signifikan dari analisis termal ini adalah konstanta panas spesifik fungsi temperatur yang mempengaruhi spesifik daya maksimum dalam desain konseptual sistem PCU untuk RGTT200K. Skenario kasus diberikan dengan perubahan temperatur yang terjadi dalam proses penambahan dan pelepasan energi termal seperti ditunjukkan pada Pers. (9). Hasil yang diperoleh dari penelitian ini yaitu performa dari sistem PCU dengan efisiensi termal 43% pada kondisi spesifik daya maksimum dengan rasio temperatur 2,74, dan diperuntukkan untuk menghasilkan listrik 60 MWe, sehingga siklus tertutup turbin helium ini diharapkan layak untuk diaplikasikan pada instalasi PLTN tipe RGTT200K.

Kata kunci: Turbin, PCU, RGTT200K

ABSTRACT

THERMAL ANALYSIS OF HELIUM TURBINE CYCLE FOR RGTT200K UNDER MAXIMUM POWER SPECIFIC CONDITION. From the viewpoint of energy system, concept for high temperature gas-cooled reactor for cogeneration with thermal power of 200 MWth (RGTT200K) is one of advanced generation nuclear power reactors which have potential for hydrogen production, electricity production, and for desalination. In this paper, study is done for Power Conversion Unit (PCU) within Nuclear Power Plant (NPP) of RGTT200K type in which the thermal energy is converted to electricity. This PCU system is the closed cycle of helium turbine or the closed cycle of Brayton by using single shaft. Thermal energy analysis for this PCU system is conducted when the nuclear reactor operates under conditions of inlet temperature of 858 K, outlet temperature of 1220 K, and pressure of 5 MPa. The significant parameters of this maximum power specific are specific heat constant of temperature function which affect the maximum specific power within conceptual design of PCU system for RGTT200K. Scenario of case was given by changing temperature that occurred in addition and rejection thermal energies as shown on Equation (9). The obtained results from this study are the performance of PCU system with thermal efficiency of 43% under condition of maximum power specific with temperature ratio of 2.74, and it was prepared to yield the electricity of 60 MWe, so that the closed cycle of this helium turbine is properly hoped to be used in the NPP installation of RGTT200K type.

Keywords: Turbine, PCU, RGTT200K

1. PENDAHULUAN

Untuk memenuhi permintaan listrik yang berkelanjutan, penggunaan energi nuklir adalah sangat tepat ditinjau dari sudut pandang sistem energi dan lingkungan. Belajar dari tragedi PLTN di Fukushima, hal utama yang harus diperhatikan berkenaan dengan pemakaian energi nuklir yaitu

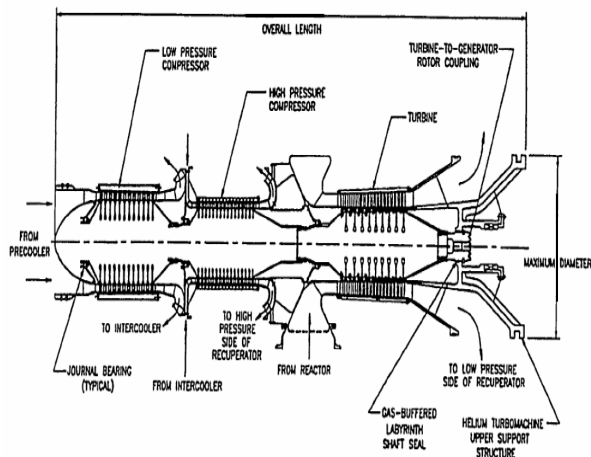
harus selalu aman dan selamat. Pengembangan teknologi reaktor dalam beberapa tahun terakhir, memberikan informasi bahwa reaktor gas temperatur tinggi mempunyai keselamatan yang melekat (*inherent safety*), efisiensi tinggi, dapat diterima lingkungan, dan sebagai sumber energi untuk alat pembangkit listrik dan pemanfaat energi panas dalam proses kogenerasi untuk produksi hidrogen dan desalinasi^[1,2,3]. Saat ini, BPR-PTRKN sedang melakukan litbang tentang desain konseptual reaktor daya 200 MWth berpendingin helium temperatur tinggi dengan kogenerasi yang dinamakan RGTT200K, yang sangat menjanjikan untuk memenuhi berbagai keperluan energi, terutama di Indonesia, karena mempunyai potensi keselamatan yang baik dengan keluaran temperatur tinggi.

Dalam makalah ini, penelitian difokuskan pada unit konversi daya (*Power Conversion Unit / PCU*) sebagai alat pembangkit listrik dari sistem RGTT200K dengan daya listrik yang mampu dihasilkan adalah sebesar 60 MWe. Siklus dari PCU ini mengaplikasikan siklus tertutup Brayton atau siklus tertutup turbin helium dengan konfigurasi poros tunggal dimana turbin dan kompresor diletakkan pada poros tersebut^[4]. Komponen utama dari PCU untuk RGTT200K terdiri dari 2 buah kompresor, 1 buah turbin, dan beberapa alat penukar kalor termasuk *recuperator*, *precooler*, dan *intercooler*. Pada RGTT200K, bahan bakar nuklir dalam teras reaktor menghasilkan panas yang kemudian diserap oleh helium yang bersirkulasi sebagai pendingin melalui kanal-kanal struktur teras dengan inti grafit yang kemudian ditransfer kedalam siklus turbin helium melalui alat *Intermediate Heat Exchanger (IHX)*.

Siklus turbin helium (sistem PCU) meliputi proses-proses kompresi isentropis, isobaris, dan ekspansi isentropis. Skenario permasalahan yang terjadi yaitu dengan adanya keterbatasan pembebanan energi termal melalui alat *recuperator*, *precooler*, dan *intercooler*, maka dalam pengoperasiannya akan mengalami penurunan temperatur masuk turbin dan kemungkinan juga adanya peningkatan temperatur keluar turbin. Hal ini karena sistem PCU mengalami proses perpindahan termal dan terjadinya gesekan yang berakibat kerugian termal sehingga perubahan konstanta panas spesifik dari gas helium adalah sangat signifikan. Tujuan penelitian ini yaitu untuk menentukan karakteristik performa dengan spesifik daya maksimum pada sistem PCU untuk instalasi PLTN tipe RGTT200K dengan menggunakan temperatur pada panas spesifik yang berubah. Metodologi yang dipakai adalah dengan menerapkan kesetimbangan momentum, massa, dan energi termal. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini digunakan untuk mengetahui kelayakan operasi sistem turbin helium sebagai pendingin teras RGTT200K dan sekaligus sebagai alat penghasil listrik agar keselamatan dan keamanan instalasi PLTN dapat terjamin.

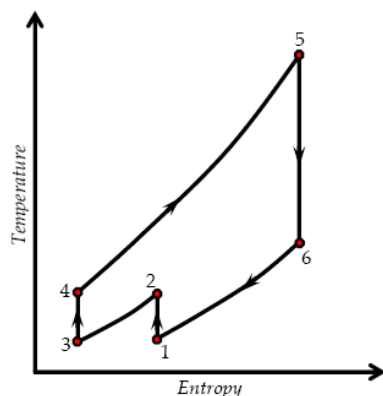
2. TEORI

Gambar 1 memperlihatkan sebuah desain konseptual PCU untuk PLTN tipe RGTT200K. Dari Gambar 1 terlihat bahwa komponen utama dari PCU terdiri dari turbin, kompresor tekanan rendah (*Low Pressure Compressor / LPC*), dan kompresor tekanan tinggi (*High Pressure Compressor / HPC*).



Gambar 1. Desain konseptual siklus turbin helium untuk RGTT200K^[5]

Gambar 2 mempresentasikan diagram antara temperatur dan entropi untuk proses termodinamika yang dilakukan oleh helium pada PCU. Semua proses adalah reversibel dimana proses 1-2 dan 3-4 adalah kompresi isentropis pada kompresor LPC dan HPC, proses 4-5 adalah penambahan panas melalui *recuperator* dan teras, proses 5-6 adalah ekspansi isentropis pada turbin, dan proses 6-1 adalah proses pelepasan energi termal melalui *recuperator* dan *precooler*, dan proses 2-3 adalah pelepasan energi termal pada *intercooler*. Analisis termal dalam penelitian ini menggunakan data desain konseptual untuk siklus PCU pada PLTN tipe RGTT200K yang sangat potensial untuk diaplikasikan di Indonesia seperti pulau Kalimantan, pulau Madura, dan propinsi Bangka Belitung seperti diperlihatkan pada Tabel 1.



Gambar 2. Diagram *T-s* untuk siklus turbin helium pada instalasi RGTT200K^[6]

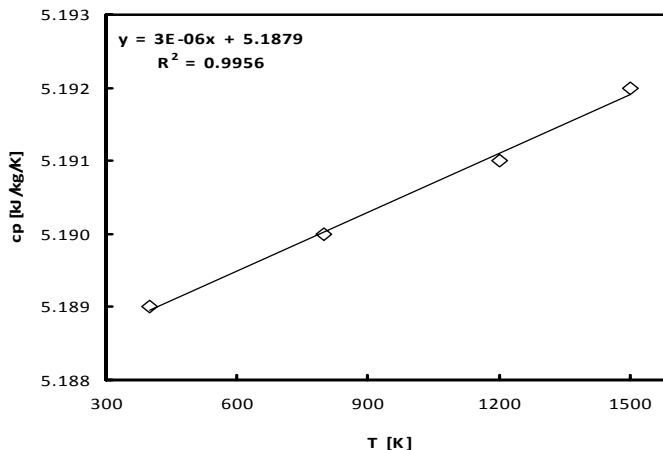
Tabel 1. Data desain untuk RGTT200K^[6]

Parameter	Besaran
Daya termal teras RGTT200K, MW_{th}	200
Daya listrik yang diperoleh, MW_e	60
Temperatur masuk reaktor, K	858
Temperatur keluar reaktor, K	1220
Laju alir gas helium, kg/s	106
Tekanan gas helium, MPa	5

Model variabel panas spesifik yang dipakai mengikuti data yang diberikan pada pustaka^[7] dan diplotkan pada Gambar 3 untuk mendapatkan konstanta dari persamaan panas spesifik tersebut. Model berupa garis lurus dengan persamaan panas spesifik sebagai berikut :

$$c_p = a_1 + a_2 T \quad (1)$$

dimana a_1 dan a_2 adalah konstanta. Dari Gambar 3 dapat diperoleh harga konstanta dari Pers. (1) yaitu $a_1=5,1879$ kJ/kg/K dan $a_2=3 \times 10^{-6}$ kJ/kg.



Gambar 3. Pengaruh temperatur terhadap panas spesifik untuk gas helium

Dari Gambar 2 dapat diketahui persamaan kesetimbangan energi termal untuk siklus PCU dari instalasi RGTT200K yang terdiri dari energi termal masuk (*input thermal energy*) dan energi termal keluar (*output thermal energy*)^[8]. *Input thermal energy* dapat diberikan sebagai berikut:

$$Q_{in} = m \int_{T_4}^{T_5} c_p(T) dT \quad (2)$$

Output thermal energy diberikan sebagai berikut :

$$Q_{out} = m \left\{ \int_{T_3}^{T_2} c_p(T) dT + \int_{T_1}^{T_6} c_p(T) dT \right\} \quad (3)$$

Dengan mensubstitusikan variabel pada Pers. (1) dan kemudian diintegrasikan maka penambahan dan pelepasan energi termal untuk siklus PCU dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Q_{in} = m \left\{ a_1(T_5 - T_4) + \frac{a_2}{2}(T_5^2 - T_4^2) \right\} \quad (4)$$

$$Q_{out} = m \left\{ a_1(T_2 - T_3) + \frac{a_2}{2}(T_2^2 - T_3^2) \right\} + \left\{ a_1(T_6 - T_1) + \frac{a_2}{2}(T_6^2 - T_1^2) \right\} \quad (5)$$

Apabila temperatur pada kondisi masuk (*inlet*) dan keluar (*discharge*) dari HPC dan LPC dibuat sama, maka $T_3 = T_1$ dan $T_4 = T_2$ sehingga daya keluaran (*output power*) diperoleh dari selisih antara Pers. (4) dan Pers. (5) dan diperoleh hasil sebagai berikut :

$$\dot{W} = \dot{m} \left\{ a_1(T_5 - T_2) + \frac{a_2}{2}(T_5^2 - T_2^2) - a_1(T_2 - T_1) - \frac{a_2}{2}(T_2^2 - T_1^2) - a_1(T_6 - T_1) - \frac{a_2}{2}(T_6^2 - T_1^2) \right\} \quad (6)$$

Spesifik daya dari siklus PCU untuk RGTT200K didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan oleh siklus dibagi dengan volume spesifik maksimum yaitu :

$$P = \frac{\dot{W}}{v_6} \quad (7)$$

dimana v_6 adalah volume spesifik maksimum.

Pers. (7) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P = \frac{\dot{m}}{v_6} \left\{ a_1(T_5 - T_2) + \frac{a_2}{2}(T_5^2 - T_2^2) - a_1(T_2 - T_1) - \frac{a_2}{2}(T_2^2 - T_1^2) - a_1(T_6 - T_1) - \frac{a_2}{2}(T_6^2 - T_1^2) \right\} \quad (8)$$

3. METODOLOGI

Perubahan temperatur melalui LPC dan HPC terjadi pada proses isentropis, maka panas spesifik dapat diasumsikan konstan dan perubahan entropi dalam siklus adalah sama dengan nol. Dengan adanya keterbatasan pembebanan energi termal melalui alat *recuperator*, *precooler*, dan *intercooler*, maka perubahan temperatur yang terjadi selama proses penambahan dan pelepasan energi termal adalah sebagai berikut :

$$\frac{T_6}{T_1} = \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{T_5}{T_2} \right)^{1/k} \quad (9)$$

dimana T_1 adalah temperatur masuk kompresor LPC, T_2 adalah temperatur keluar kompresor LPC, T_5 adalah temperatur masuk turbin, dan harga $k=1,67$. Jika dibuat bahwa:

$$\theta = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{dan} \quad \tau = \frac{T_5}{T_1} \quad (10)$$

Dengan mensubstitusikan Pers. (10) kedalam Pers. (8), maka spesifik daya dalam bentuk θ dan τ dari siklus PCU untuk instalasi PLTN tipe RGTT200K dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P = \frac{\dot{m}T_1}{v_6} \left\{ a_1(\tau - \theta) + \frac{a_2}{2}T_1(\tau^2 - \theta^2) - a_1(\theta - 1) - \frac{a_2}{2}T_1(\theta^2 - 1) - a_1 \left[\left(\frac{\tau^{1/k}}{\theta} \right) - 1 \right] - \frac{a_2}{2}T_1 \left[\left(\frac{\tau^{1/k}}{\theta} \right)^2 - 1 \right] \right\} \quad (11)$$

dimana T_1 adalah temperatur helium pada kondisi masuk kompresor LPC.

Untuk harga τ diberikan, spesifik daya dideferensialkan terhadap θ dan untuk mencapai harga maksimum, maka :

$$\frac{dP}{d\theta} = 0 \quad (12)$$

sehingga diperoleh :

$$-2a_1 - 2a_2T_1\theta + a_1\tau^{1/k}\theta^{-2} + a_2T_1\tau^{2/k}\theta^{-3} = 0 \quad (13)$$

Harga θ yang diperoleh dari Pers. (13) diatas dapat dipergunakan untuk mendapatkan spesifik daya maksimum.

Efisiensi siklus turbin helium (sistem PCU) pada RGTT200K dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\eta = 1 - \left\{ \frac{a_1(\theta - 1) + \frac{a_2}{2} T_1(\theta^2 - 1) + a_1 \left[\left(\frac{\tau^{1/k}}{\theta} \right) - 1 \right] + \frac{a_2}{2} T_1 \left[\left(\frac{\tau^{1/k}}{\theta} \right)^2 - 1 \right]}{a_1(\tau - \theta) + \frac{a_2}{2} T_1(\tau^2 - \theta^2)} \right\} \quad (14)$$

Untuk perhitungan numerik dalam kasus PCU ini untuk RGTT200K digunakan nilai-nilai yang telah dihitung dari kerja sebelumnya yaitu temperatur masuk LPC $T_1=391$ K, tekanan gas helium masuk LPC adalah 2,08 MPa, tekanan gas helium masuk HPC adalah 3,37 MPa, temperatur masuk turbin $T_5=1073$ K, dan laju alir helium melalui siklus turbin helium adalah sebesar $\dot{m} = 106$ kg/s^[6].

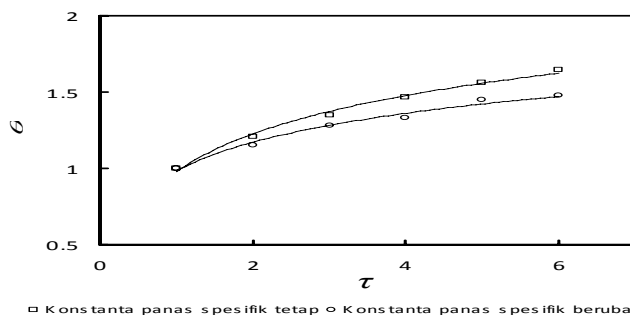
Hubungan antara efektivitas *recuperator* dan efisiensi siklus turbin helium (sistem PCU) untuk instalasi RGTT200K dapat dituliskan sebagai berikut^[6] :

$$\varepsilon = \frac{1,617\eta + 2,180\beta - 2,420}{\eta(2,180\beta - 1)} \quad (15)$$

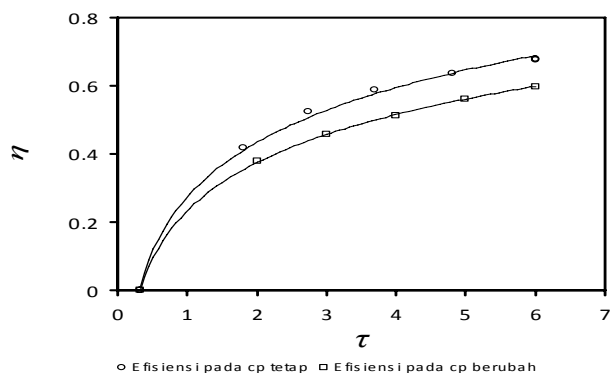
dimana ε adalah efektivitas *recuperator* yang digunakan, η adalah efisiensi termal yang diperoleh dari Pers. (14), dan β adalah rasio kerugian tekanan total melalui alat penukar kalor termasuk *recuperator*, *precooler*, dan *intercooler*. Pada kasus dalam sistem PCU untuk RGTT200K ini, harga β diberikan dalam kisaran dari 1 sampai 1,035^[6].

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penurunan dari Pers. (13) diatas diselesaikan dan hasilnya diplotkan pada Gambar 4 untuk memperoleh harga θ maksimum dengan kisaran τ dari 1 sampai dengan 6. Beda antara konstanta panas spesifik yang tetap dan yang bervariasi terhadap temperatur adalah sekitar 6,5%. Dengan memvariasikan rasio temperatur isentropis, dapat diketahui nilai efisiensi siklus PCU pada RGTT200K dibawah kondisi θ maksimum, seperti yang diplotkan dalam Gambar 5. Pengaruh dari tetapan panas spesifik akan merubah harga dari rasio temperatur isentropis (τ) berakibat efisiensi siklus turbin helium (sistem PCU) untuk RGTT200K berubah. Semakin besar harga τ , maka nilai efisiensi akan meningkat dengan pola persamaan seperti menyerupai bentuk parabola. Untuk siklus PCU ideal terlihat bahwa efisiensi termal pada kondisi spesifik daya maksimum mempunyai nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan siklus aktual.

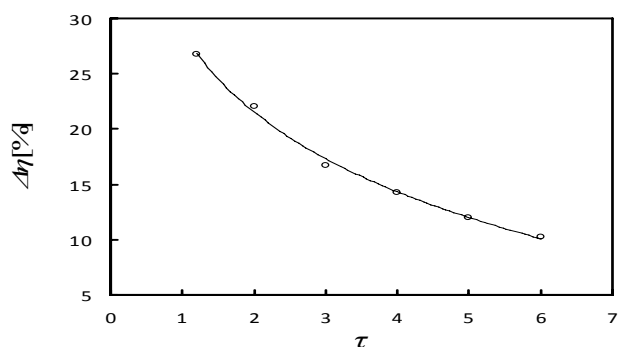


Gambar 4. Variasi rasio temperatur isentropis untuk PCU pada RGTT200K



Gambar 5. Pengaruh rasio temperatur terhadap efisiensi pada konstanta panas berbeda

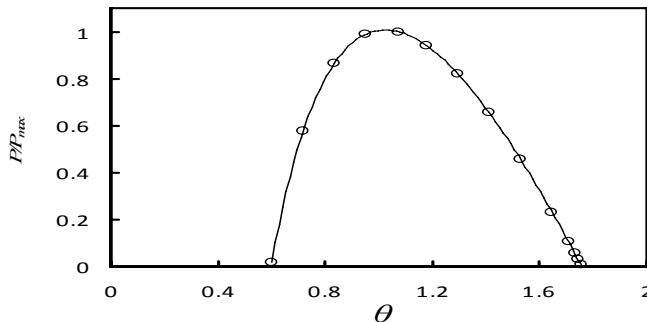
Gambar 6 menampilkan variasi dari prosentase beda efisiensi termal daripada siklus turbin helium (sistem PCU) yang ideal dan yang aktual dan ditunjukkan dengan kecenderungan garis (*trendline*) yang mengikuti persamaan bentuk garis logaritmik. Rasio temperatur isentropis (τ) sangat berpengaruh terhadap efisiensi termal siklus tertutup turbin helium, semakin rendah harga τ , semakin besar harga dari beda efisiensi atau dengan kata lain efisiensi termal pada siklus aktual dengan konstanta panas bervariasi terhadap temperatur akan turun. Beda prosentase maksimum terjadi pada kondisi nilai $\tau=1,2$ yaitu sekitar 26,7%, dan beda minimum pada $\tau=6$ yaitu kira-kira 10%. Dari Gambar 6 juga dapat dilihat, tingkah laku kurva akan memberikan informasi bahwa efisiensi termal pada kondisi spesifik daya maksimum tidak dapat diprediksi baik pada harga rasio temperatur rendah ataupun tinggi. Kondisi dari siklus turbin helium pada instalasi RGTT200K terjadi pada kisaran harga τ dari 2 sampai dengan 4.



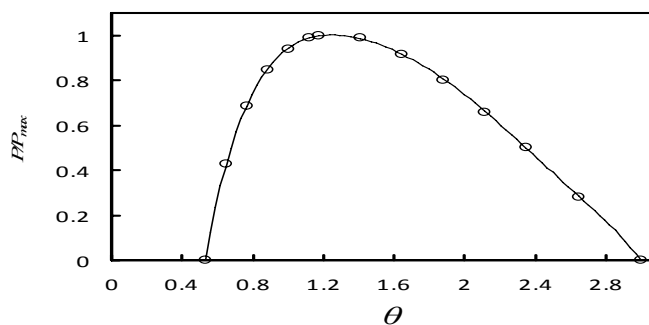
Gambar 6. Pengaruh τ terhadap beda efisiensi termal pada kondisi spesifik daya maksimum

Variasi daya (P/P_{max}) dengan rasio temperatur isentropis pada $\tau=2$ ditunjukkan pada Gambar 7 dengan kurva berbentuk parabolik. Dari kurva tersebut dapat diketahui bahwa harga spesifik daya berbeda pada kondisi rasio antara temperatur masuk turbin dan masuk kompresor τ bernilai sama. Nilai θ yang memenuhi syarat untuk operasi kerja kompresor termasuk LPC dan HPC adalah harus lebih besar daripada 1. Pada kondisi $\tau=2$, nilai P/P_{max} tertinggi terjadi pada harga $\theta=1,07$ yang berarti memenuhi syarat untuk kerja kompresor. Gambar 8 juga memperlihatkan pengaruh dari θ terhadap P/P_{max} dimana titik tertingginya terjadi pada harga $\theta=1,18$. Pada Gambar 8, nampak bahwa kurva

yang diperoleh mempunyai selisih yang lebih besar untuk kondisi τ yang lebih tinggi. Pada kasus siklus turbin helium untuk RGTT200K ini, harga τ dihitung sekitar 2,74 sehingga untuk kondisi P/P_{max} mencapai titik tertinggi pada harga θ sekitar 1,11 dan berarti aman untuk kerja kompresor untuk transfer energi termal dalam sistem PCU.



Gambar 7. Variasi θ terhadap rasio spesifik daya pada kondisi $\tau=2$

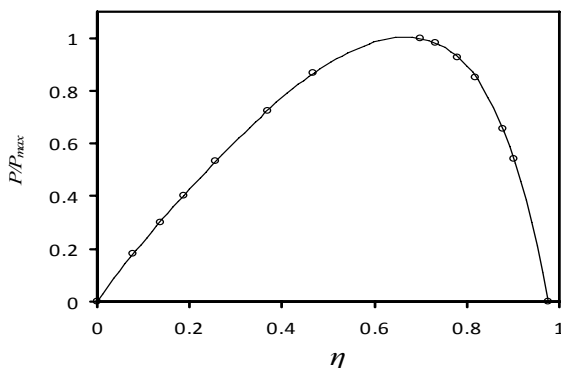


Gambar 8. Variasi θ terhadap rasio spesifik daya pada kondisi $\tau=4$

Gambar 9 menunjukkan pengaruh dari spesifik daya maksimum terhadap efisiensi termal dari siklus turbin helium (siklus PCU) pada kondisi $\tau=2,74$. Dari kurva dapat dilihat bahwa nilai spesifik daya maksimum P/P_{max} pada titik tertinggi adalah tidak sama dengan pada titik efisiensi termal terbesar. Mula-mula harga P/P_{max} akan naik dengan peningkatan efisiensi termal, kemudian setelah mencapai titik tertinggi nilai P/P_{max} akan turun lagi sesuai dengan kenaikan efisiensi termal siklus turbin helium. Untuk kasus pada siklus turbin helium, harga efisiensi termal telah dihitung berdasarkan proses isentropis dengan menggunakan Pers. (14) melalui siklus turbin helium yang diperoleh sebesar 48% pada kondisi efektivitas *recuperator* sekitar 96%, sehingga harga P/P_{max} dapat ditentukan dengan memakai kurva dalam Gambar 9 yaitu sekitar 0,87. Dari harga P/P_{max} ini, maka efisiensi termal pada siklus aktual dari turbin helium (sistem PCU) dapat ditentukan yaitu sekitar 43%. Jika proses melalui turbin dan kompresor (termasuk LPC dan HPC) dianggap mempunyai performa yang sama, maka efisiensinya $\eta_{t/c}$ dapat dihitung dengan menurunkan suatu formulasi dengan memasukkan parameter daya yang dihasilkan turbin, daya yang diperlukan kompresor, dan daya yang diberikan oleh teras RGTT200K, maka diperoleh suatu bentuk persamaan:

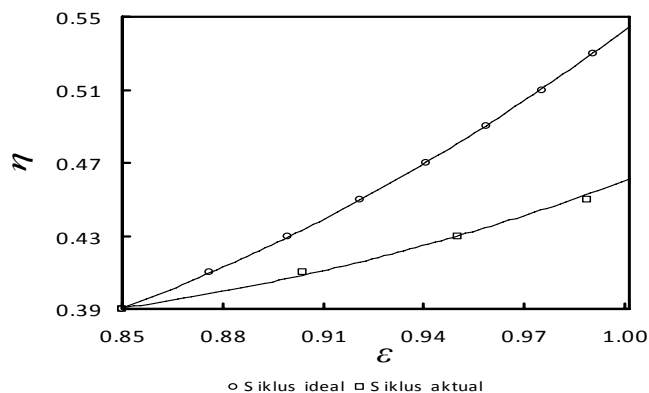
$$\eta_{t/c}^2 - 0,489\eta_{t/c} - 0,455 = 0 \tag{16}$$

Dengan menyelesaikan Pers. (16), maka diperoleh harga dari η_{tc} yaitu sebesar 0,96. Jadi efisiensi kompresor (termasuk LPC dan HPC) dan efisiensi turbin adalah sekitar 96%.



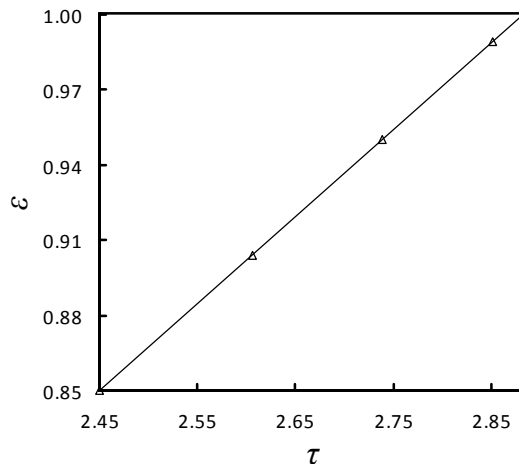
Gambar 9. Pengaruh efisiensi termal terhadap P/P_{max} pada kondisi $\tau=2,74$

Efisiensi termal dari siklus tertutup turbin helium (sistem PCU) dapat ditingkatkan dengan mengaplikasikan alat penukar kalor seperti *recuperator*, *precooler*, dan *intercooler*. Gambar 10, yang diperoleh dari Pers. (15), menunjukkan pengaruh dari efektivitas *recuperator* terhadap efisiensi termal PCU untuk instalasi RGTT200K pada kondisi $\tau=2,74$ sebagai fungsi dari rasio kerugian termal total pangkat rasio tetapan panas spesifik dari gas helium yang melalui alat *precooler*, *intercooler*, dan *recuperator*. Untuk kasus PCU pada RGTT200K dengan efisiensi termal sekitar 43%, dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa untuk siklus ideal (tanpa ada kerugian termal dari alat penukar kalor) efektivitas *recuperator* yang diperlukan hanya sekitar 0,91 (atau 91%) sedangkan untuk siklus aktual dibutuhkan efektivitas *recuperator* yang lebih tinggi yaitu sekitar 0,95 (atau 95%). Jika efektivitas *recuperator* ditingkatkan hingga 100%, maka efisiensi termal sistem turbin helium RGTT200K yang dapat dicapai untuk siklus ideal adalah sekitar 55%, sedangkan untuk siklus aktual hanya sekitar 46%. Artinya kerugian termal melalui sistem pendingin RGTT200K adalah cukup besar yaitu sekitar 16,4%. Kerugian termal ini dapat diatasi dengan memperbaiki performa termasuk material dari setiap komponen PCU termasuk turbin, kompresor, dan alat penukar kalor.



Gambar 10. Pengaruh efektivitas *recuperator* terhadap efisiensi termal PCU-RGTT2000K

Dari Gambar 10 juga dapat dilihat bahwa efektivitas *recuperator* dibawah 85% akan menghasilkan efisiensi termal PCU dibawah 39%, baik untuk siklus ideal maupun untuk siklus aktual. Dari hasil perhitungan ini, dapat diketahui bahwa efektivitas *recuperator* merupakan parameter penting yang harus dipertimbangkan dalam pembuatan desain konseptual sistem PCU untuk RGTT200K karena mempunyai pengaruh yang signifikan pada efisiensi termal yang dihasilkan.



Gambar 11. Efek rasio temperatur pada efektivitas *recuperator* untuk PCU-RGTT200K

Gambar 11 menampilkan diagram efektivitas *recuperator* versus rasio temperatur isentropis dimana *trendline* merupakan garis linier yang diperoleh dengan memperhitungkan tetapan panas spesifik berubah. Pada kondisi $\tau=2,74$, harga θ dapat diperoleh dari Gambar 4 yaitu kira-kira 1,11, masih memenuhi syarat aman untuk operasi siklus turbin helium (sistem PCU) pada PLTN tipe RGTT200K. Dengan mengaplikasikan Gambar 11, maka temperatur gas helium keluar turbin dapat dihitung yaitu sekitar 880 K pada kondisi operasi dengan efektivitas *recuperator* sebesar 95% dan rasio temperatur isentropis $\tau=2,74$. Dari Gambar 11 juga dapat dilihat bahwa untuk mencapai kondisi operasi sistem PCU dengan efektivitas *recuperator* tertinggi (100%) maka harga rasio temperatur diprediksi masih dibawah 3. Hal ini berarti temperatur gas helium keluar teras RGTT200K masih dalam batas aman (layak), sehingga material sudu turbin dapat menggunakan Alloy713LC^[9] yang mampu beroperasi hingga temperatur diatas 1123 K. Dari bahasan diatas, jika efisiensi generator listrik yang dipakai sebesar 92% maka dari daya yang diproduksi oleh turbin helium akan menghasilkan daya listrik sekitar 60 MWe yang bermanfaat untuk mengkonsumsi masyarakat di Indonesia.

5. KESIMPULAN

Dari analisis energi termal seperti uraian diatas, dapat disimpulkan bahwa siklus tertutup turbin helium (sistem PCU) untuk RGTT200K adalah layak. Dalam sistem PCU yang beroperasi pada kondisi temperatur berubah, maka perubahan konstanta panas spesifik adalah sangat signifikan berpengaruh pada performa dari siklus turbin helium, dimana hasilnya diplotkan dalam beberapa grafik karakteristik diatas. Rasio daya yang dihasilkan terhadap spesifik daya maksimum

mempunyai pengaruh pada efisiensi termal siklus turbin helium untuk transfer termal dalam teras RGTT200K. Efisiensi termal untuk skenario dalam kasus sekarang adalah 43% pada kondisi spesifik daya maksimum dan pada rasio temperatur isentropis 2,74. Performa untuk komponen turbin dan kompresor (LPC dan HPC) adalah masing-masing 96%. Dengan demikian, diharapkan desain konseptual sistem PCU pada instalasi PLTN tipe RGTT200K ini dapat terjamin keselamatannya.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan Penelitian ini merupakan bagian kerja di Bidang Pengembangan Reaktor (BPR), Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN). Terima kasih kami sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam perbaikan makalah ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. OHASHI, K., OKAMOTO, F., HAYAKAWA, H., Modular High Temperature Reactor Contributing the Global Environment Protection, *Progress in Nuclear Energy*, 37 (2000), 307-312.
- [2]. IAEA, "Design and Development of Gas Cooled Reactors with Closed Cycle Gas Turbines" (TECDOC No. 899), IAEA, Vienna (1995).
- [3]. IAEA, "High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Development" (TECDOC No. 988), IAEA, Vienna (1996).
- [4]. SUDADIYO, S., Analisis Sistem Reaktor Kogenerasi Berbasis RGTT, Dokumen Laporan Penyelenggaraan Workshop di Bidang Pengembangan Reaktor, PTRKN-BATAN, Serpong, (1-5 Maret, 2010).
- [5]. McDONALD, C.F., ORLANDO, R.J., COTZAS, G.M., Helium Turbomachine Design for GT-MHR Power Plant, General Atomics Project 7600, (1994, July).
- [6]. SUDADIYO, S., Perhitungan Siklus Brayton Dengan Poros Tunggal Untuk Unit Konversi Daya RGTT200K, Dokumen Kegiatan Kelompok PDSRGL-BPR, PTRKN-BATAN, 2011.
- [7]. ARP, V.D., McCARTY, R.D., Thermophysical Properties of Helium-4 from 0.8 to 1500 K with Pressures to 2000 MPa, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, (1989, November).
- [8]. BATHE, W.W., Fundamentals of Gas Turbines, Edisi ke 2, (1996).
- [9]. JAKOBEIT, W., PFEIFER, J.P., ULLRICH, G., Evaluation of High Temperature Alloys for Helium Gas Turbines, *Nuclear Technology*, 66 (1984), 195-206.

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Tukiran, PTRKN-BATAN)

- Apakah efisiensi termal dari sistem PCU untuk RGTT 200K masih bisa ditingkatkan?

JAWABAN: (Sri Sudadiyo, PTRKN-BATAN)

- Efisiensi thermal untuk sistem turbin helium (Sistem PCU) masih dapat ditingkatkan lagi dengan cara:
 1. memperbaiki efektivitas dari alat penukar kalor seperti intercooler, precooler, dan Intermediate Heat Exchanger.
 2. Memperbaiki sistem adiabatik kompresor (termasuk LPC dan HPC).
 3. Memperbaiki efisiensi adiabatik turbin helium yang dapat dilakukan dengan merancang sudu rotor turbin agar menghasilkan efisiensi sudu/mekanisme yang tinggi (lebih baik).

2. PERTANYAAN: (Sudarno, PTRKN-BATAN)

- Apa yang dimaksud dengan τ ?
- Dalam perhitungan Bapak, berapa harga τ yang dipakai dan berapa efisiensi yang dihasilkan?

JAWABAN: (Sri Sudadiyo, PTRKN-BATAN)

- τ adalah rasio antara temperatur masuk turbin dan temperatur masuk kompresor.
- Harga τ yang digunakan adalah 2,74. Efisiensi termal untuk sistem Power Conversion Unit (PCU) pada RGTT 200K adalah 43%.