

ANALISIS TERMODINAMIKA SISTEM TURBIN HELIUM UNTUK REAKTOR DAYA NUKLIR

Sri Sudadiyo

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN,
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310

ABSTRAK

ANALISIS TERMODINAMIKA SISTEM TURBIN HELIUM UNTUK REAKTOR DAYA NUKLIR. Dari sudut pandang sistem energi dan lingkungan, konsep Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (*High Temperature Gas-cooled Reactor / HTGR*) sebagai salah satu jenis reaktor daya nuklir generasi lanjut yang mempunyai kemampuan kogenerasi untuk produksi hidrogen, untuk pembangkit listrik, dan untuk desalinasi air laut. Dalam makalah ini hanya dibahas pada bagian unit konversi daya (*Power Conversion Unit / PCU*) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tipe HTGR yang menggunakan bahan bakar nuklir dengan moderator grafit dan dapat menghasilkan spektrum neutron cepat. Panas yang diperoleh dari bahan bakar nuklir tersebut dipindahkan oleh gas sebagai media pendingin dengan menggunakan siklus tertutup turbin helium. Analisis perhitungan termodinamika siklus PCU tipe HTGR ini dilakukan pada saat reaktor nuklir beroperasi pada kondisi temperatur masuk 300 °C, temperatur keluar 950 °C, tekanan sekitar 70 bar, dan daya thermal yang dihasilkan teras HTGR sebesar 200 MW_{th}. Parameter termodinamika yang digunakan untuk mengoptimalkan desain sistem pendingin HTGR adalah rasio tekanan kompresor, perbandingan temperatur turbin, dan laju alir helium. Hasil yang diperoleh dari penelitian siklus termodinamika dari unit PCU sistem turbin helium adalah daya listrik yang dihasilkan sebesar 70,4 MW_e dengan efisiensi generator sebesar 88 % sehingga siklus tertutup turbin helium ini layak diaplikasikan dalam menjamin keselamatan operasi instalasi PLTN tipe HTGR dan cocok untuk ditempatkan di daerah Babel.

Kata kunci : Termodinamika, turbin helium, HTGR

ABSTRACT

THERMODYNAMICS ANALYSIS OF HELIUM TURBINE SYSTEM FOR NUCLEAR POWER REACTOR. From the viewpoint of energy system and environment, concept for High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) as one of type of advanced generation nuclear power reactors which have cogeneration potential for hydrogen production, for electricity production, and for desalination of sea water. In this paper it is only discussed on section of Power Conversion Unit (PCU) for HTGR type of Nuclear Power Electricity Plant (PLTN) that employs nuclear fuel with graphite moderator and it can yield fast neutron spectrum. The obtained heat of nuclear fuel was transferred by gas as coolant media by applying the closed cycle of helium turbine. Analysis of thermodynamics calculation for PCU cycle of this type HTGR was done when nuclear reactor operated on inlet temperature of 300 °C, outlet temperature of 950 °C, pressure of about 70 bar, and the thermal power was resulted by HTGR core as much as 200 MW_{th}. Thermodynamics parameter, that be used for optimal design of HTGR coolant system, is compressor pressure ratio, turbine temperature ratio, and helium mass flow. The obtained result from study on thermodynamics cycle of PCU part of helium turbine system was produced electricity power of about 70,4 MW_e with generator efficiency of 88 % so that this closed cycle of helium turbine properly employed for giving safety in operation of PLTN installation with HTGR type and it is appropriate to be built in Babel area.

Keywords : Thermodynamics, helium turbine, HTGR

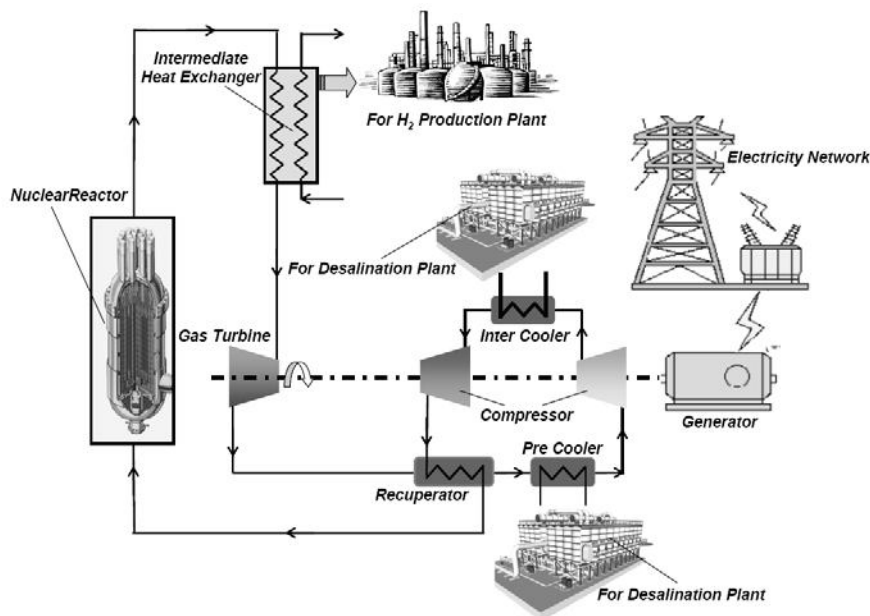
PENDAHULUAN

Dari sudut pandang sistem energi dan lingkungan, sangat penting bagi kita untuk

meningkatkan pendayagunaan sistem energi dengan memanfaatkan sumber energi baru dan terbarukan termasuk energi nuklir yang dapat digunakan

sebagai alat pembangkit panas untuk produksi bahan bakar hidrogen, alat pembangkit listrik, dan alat desalinasi air laut untuk menghasilkan air bersih (*fresh water*) atau lebih dikenal dengan nama kogenerasi. Sistem kogenerasi ini, mengaplikasikan reaktor berpendingin gas temperatur tinggi (*High Temperature Gas-cooled Reactor / HTGR*), dapat didesain sesuai dengan daya thermal yang dibutuhkan, misalkan $200 \text{ MW}_{\text{th}}$, dan sangat cocok untuk ditempatkan di daerah Bangka Belitung (provinsi Babel) dengan rincian $51 \text{ MW}_{\text{th}}$ untuk produksi hidrogen sejumlah $180000 \text{ Nm}^3/\text{hari}$; $70,4 \text{ MW}_e$ untuk produksi listrik dengan efisiensi generator 88 %; dan sisanya $78,6 \text{ MW}_{\text{th}}$ untuk produksi air sebesar 30756 ton/hari . Konsep Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan sistem reaktor kogenerasi, seperti diperlihatkan pada Gambar 1, mempunyai sistem pendingin dengan mengaplikasikan helium sebagai media penyerap panas yang mengalir melalui siklus tertutup turbin gas. Jadi, panas yang dihasilkan oleh bahan bakar nuklir diserap oleh helium yang bersirkulasi melalui kanal-kanal struktur teras dengan inti grafit yang kemudian dipindahkan ke pendingin sekunder melalui alat penukar kalor intermediet (*Intermediate Heat Exchanger / IHX*).

Dalam makalah ini, penelitian difokuskan untuk mensimulasikan tingkah laku helium secara termodinamika pada unit konversi daya (*Power Conversion Unit / PCU*) sebagai alat pembangkit listrik dari sistem HTGR kogenerasi dengan daya listrik yang dihasilkan sebesar $70,4 \text{ MWe}$ dengan menerapkan siklus Brayton tertutup atau siklus tertutup turbin helium dengan komponen utama terdiri dari kompresor, turbin, dan beberapa alat penukar kalor seperti *recuperator*, *precooler*, dan *intercooler*. Ada dua faktor utama yang mempengaruhi performa siklus turbin helium yaitu efisiensi komponen dan temperatur kerja turbin. Kedua faktor ini sangat menentukan dalam mendesain siklus turbin helium. Semakin tinggi nilainya, semakin baik performa dari siklus pendingin untuk reaktor nuklir berpendingin helium. Kompresor dan turbin diletakkan pada poros tunggal horizontal dan ditumpu oleh bantalan pada kedua ujungnya. Turbin mengekstrak energi kinetik dari ekspansi helium yang mengalir melalui alat penukar kalor. Gas helium panas yang telah melewati alat penukar kalor dialirkan melalui turbin untuk memutar rotor. Putaran rotor bisa dimanfaatkan untuk memutar poros sehingga dapat menghasilkan daya mekanik yang berguna untuk menggerakkan kompresor dan generator listrik. Studi lebih lanjut tentang siklus Brayton tertutup dengan helium temperatur tinggi sebagai sistem pemindah panas dari instalasi PLTN tipe HTGR akan dilakukan untuk memperbaiki efisiensi thermal yang dihasilkan sehingga keselamatan dalam pengoperasian instalasi PCU tipe HTGR ini terjamin.



Gambar 1. Skematik dari konsep reaktor nuklir kogenerasi untuk aplikasi di daerah Babel

TEORI

Dalam melakukan analisis termodinamik aliran helium yang mengalir melalui siklus tertutup turbin atau siklus Brayton tertutup, maka pemahaman tentang proses dan sifat (*property*) gas helium tersebut mutlak diperlukan. Secara ideal, proses pada siklus Brayton terdiri dari kompresi isentropik, penambahan panas pada tekanan tetap, ekspansi isentropik, dan pelepasan panas pada tekanan konstan. Dalam beberapa literatur termodinamika, untuk menyelesaikan permasalahan teknik yang melibatkan aliran massa kedalam atau keluar dari sistem sering dimodelkan dengan menggunakan volume kontrol. Secara matematis model aliran helium sebagai fungsi dari tekanan (P), entalpi jenis (h), aliran massa (m), energi (q), kerapatan massa (ρ), temperatur (T), entropi jenis (s), rasio panas jenis

($k = \frac{c_p}{c_v}$) atau dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\{P, h, m, q, \rho, T, s, k\} \quad (1)$$

Semua informasi untuk kesetimbangan massa (m) dan energi (q) dapat dievaluasi dalam model aliran. Kesetimbangan massa dan energi dapat dituliskan sebagai :

$$\frac{dM}{dt} = \sum_i^n m_i \quad (2)$$

$$\frac{dU}{dt} = \sum_i^n q_i \quad (3)$$

dengan M adalah total massa, U adalah energi dalam total, dan n adalah jumlah laluan. Penurunan (diferensiasi) dari M dan U untuk volume tetap akan menghasilkan :

$$V \frac{d\rho}{dt} = \frac{dM}{dt} \quad (4)$$

$$M \frac{du}{dt} = \frac{dU}{dt} - u \frac{dM}{dt} \quad (5)$$

Sehingga kesetimbangan massa dan energi dapat ditulis kembali sebagai :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} M \\ U \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ u & \rho \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \rho \\ u \end{pmatrix} \quad (6)$$

Jika helium dianggap sebagai gas perfek, maka :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} P \\ T \end{pmatrix} = \frac{c_v}{RT} \begin{pmatrix} c_v & \frac{P}{RT^2} \\ 0 & \frac{1}{RT} \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \rho \\ u \end{pmatrix} \quad (7)$$

Dari persamaan-persamaan diatas dapat diturunkan :

- Persamaan untuk kompresor, yaitu :

$$-W_c = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (8)$$

- Persamaan untuk turbin, yaitu :

$$W_t = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (9)$$

METODOLOGI

Sistem PCU dari PLTN tipe HTGR yang dikembangkan dalam penelitian ini, seperti diperlihatkan dalam Gambar 1, dapat mencapai daya listrik 70,4 MW_e dan beroperasi pada tekanan sekitar 70 bar dengan temperatur masuk turbin 950 °C. Daya thermal yang dihasilkan oleh teras reaktor nuklir sebesar 200 MW_{th} dengan temperatur masuk 300 °C. Konsep kogenerasi yang dikembangkan terbagi menjadi 51 MW_{th} untuk produksi hidrogen dan 78,6 MW_{th} untuk desalinasi, sehingga sangat cocok untuk diletakkan di propinsi Babel. Dalam makalah ini, disain lengkap dari PCU untuk pendingin instalasi HTGR masih belum ditentukan. Beberapa negara yang sedang mengembangkan teknologi reaktor nuklir jenis HTGR ini adalah Amerika, Inggris, Jepang, Korea Selatan, Perancis, dan Afrika Selatan.

Metode yang digunakan dalam penyelesaian masalah dilakukan dengan menentukan sifat gas helium, seperti tekanan, temperatur, massa jenis dan perbandingan panas spesifik ($k = 1,67$), sebagai fluida kerja yang dipakai karena gas helium merupakan fluida kerja yang sangat bagus, tidak menimbulkan korosi, dan mempunyai sifat panas yang bagus. Parameter ini digunakan untuk menentukan kondisi kerja dari setiap komponen PCU sehingga karakteristik aliran helium dapat diketahui. Dengan mengaplikasikan persamaan (1) sampai dengan persamaan (9), maka harga dari kerja yang dikeluarkan turbin (W_T) dan kerja yang dibutuhkan oleh kompresor (W_C) yang dihitung. Selisih dari W_T dan W_C merupakan kerja yang digunakan untuk memutar generator listrik. Performa dari siklus tertutup turbin helium atau siklus Brayton tertutup dapat dihitung dari perbandingan antara selisih daya dan panas yang diberikan oleh bahan bakar nuklir.

Peningkatan dalam perbandingan tekanan kompresor dapat menaikkan efisiensi thermal

siklus tertutup gas helium dan dapat juga meningkatkan suhu keluar kompresor. Jika temperatur masuk turbin tetap karena dibatasi oleh kondisi material, kenaikan perbandingan tekanan kompresor dapat menurunkan kerja spesifik siklus sehingga membutuhkan aliran gas helium yang lebih banyak untuk dapat menghasilkan kerja keluaran per satuan waktu dengan nilai yang sama. Apabila kompresor bekerja pada beda tekanan yang lebih besar akan dapat menurunkan efisiensi adiabatik proses sehingga dapat membuat siklus aktual menjadi kurang efisien.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kemampuan dan keuntungan dari PLTN jenis HTGR kogenerasi karena temperatur gas helium keluar reaktor dapat mencapai 950 °C sehingga dapat dimanfaatkan untuk proses-proses teknologi temperatur tinggi atau untuk produksi listrik dengan menggunakan siklus tertutup turbin helium. Konfigurasi siklus tertutup turbin helium dipertimbangkan memakai poros tunggal dengan posisi horizontal. Performa termodinamika dari siklus tertutup turbin gas helium sangat penting untuk diteliti lebih lanjut karena akan berpengaruh terhadap efisiensi thermal total dalam menjamin keselamatan kerja HTGR. Analisis termodinamika dalam penelitian ini menggunakan data dari karakteristik PLTN jenis HTGR yang sangat potensial untuk diaplikasikan di propinsi Babel seperti diperlihatkan dalam Tabel 1.

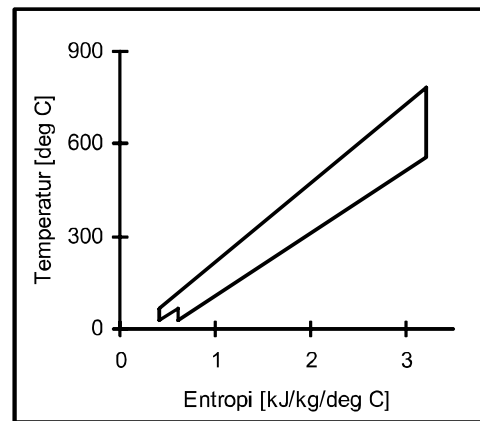
Diagram dari perubahan-perubahan temperatur dan entropi (diagram $T - s$) seperti terlihat dalam Gambar 2 adalah sangat berguna dalam menggambarkan siklus tertutup turbin gas helium karena dalam proses isentropik, seperti dalam turbin dan kompresor, daya yang diproduksi adalah hasil dari laju aliran massa dan perubahan enthalpi melalui proses tersebut.

Tabel 1. Informasi umum untuk HTGR kogenerasi

Parameter	Besaran
Daya thermal, MW_{th}	200
Daya listrik yang diperoleh, MW_e	70,4
Temperatur masuk reaktor, °C	300
Temperatur keluar reaktor, °C	950
Laju aliran gas helium, kg/s	59,3
Tekanan gas helium, bar	70

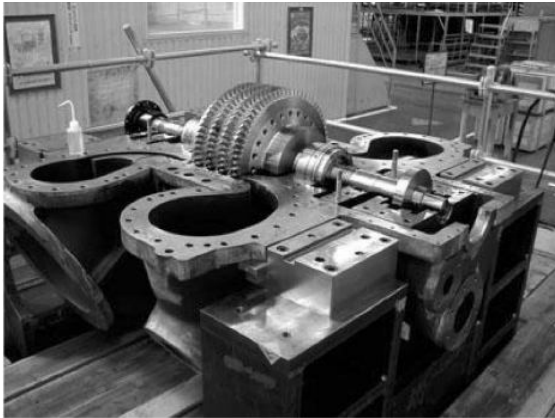
Jadi, perbedaan temperatur yang didapatkan pada diagram $T - s$ adalah sebanding dengan daya yang dihasilkan. Kurva dari garis tekanan konstan pada diagram tersebut adalah sebanding dengan temperatur absolut. Maka dari itu, garis-garis tekanan konstan menjadi lebih curam atau lebih tinggi, dan berbeda karena temperatur meningkat.

Hal ini mengilustrasikan bahwa kerja lebih dapat diperoleh dengan mengekspansikan gas helium diantara tekanan tetap pada temperatur tinggi daripada pada temperatur rendah. Dalam siklus ideal, proses kompresi gas helium adalah isentropik yaitu adiabatik atau tidak ada kerugian panas dimana entropi tidak berubah akibat gesekan. Oleh karena itu, entropi adalah konstan walaupun temperatur naik.



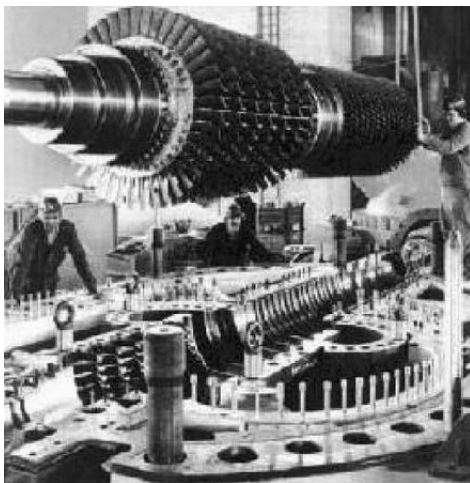
Gambar 2. Siklus termodinamika PCU dengan media helium untuk HTGR 200 MW_{th} kogenerasi

Siklus tertutup turbin gas helium dengan temperatur tinggi dalam instalasi HTGR dapat juga memberikan keuntungan dalam perbaikan efisiensi thermal dari sistem PCU dengan mengasumsikan bahwa proses melalui alat penukar kalor tidak terjadi penurunan tekanan. Komponen utama dari PCU terdiri dari kompresor, turbin, dan beberapa alat penukar kalor seperti *recuperator*, *precooler*, dan *intercooler*. Gambar 3 menunjukkan *impeller* kompresor helium yang telah dikembangkan di Jepang [2]. Gambar 4 menampilkan *rotor* turbin helium yang dibuat oleh perusahaan *Energie Versorgung Oberhausen* (EVO) dari Jerman [2]. Turbin helium mempunyai keuntungan termasuk bilangan Mach lebih rendah dan bilangan Reynolds lebih tinggi daripada turbin gas konvensional dengan memakai fluida kerja udara. Aliran dalam kompresor menurun sehingga kerugian akibat celah sempit aliran sekunder melalui kompresor bisa jadi lebih substansial dibandingkan dalam turbin. Turbin yang diaplikasikan dalam siklus pendingin sistem HTGR ini adalah jenis turbin aksial dimana gas helium mempunyai kecepatan supersonik dan menggunakan kompresor aksial yang bekerja dengan kecepatan gas helium berada dibawah daerah subsonik.



Gambar 3. Impeller untuk kompresor gas helium [2]

Kondisi kerja dari 2 unit kompresor dan 1 unit turbin helium yang dipakai dalam instalasi siklus pendingin HTGR ini diperlihatkan pada Tabel 2. Entalpi helium meningkat dalam kompresor dan menurun dalam turbin dengan defleksi dari aliran melalui rotor mengikuti bentuk sudu dengan momentum berbeda antara kondisi masuk dan kondisi keluar.



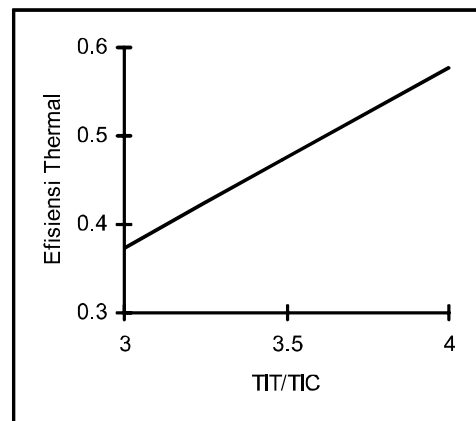
Gambar 4. Rotor untuk turbin helium [2]

Siklus termodinamika beroperasi pada kondisi beban penuh, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1, sesuai dengan sifat proses dari kondisi yang diberikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Efisiensi thermal dari PCU dengan mengaplikasikan siklus tertutup turbin helium adalah sekitar 47,2 % yang terjadi pada perbandingan temperatur sebesar 3,5 dan penurunan tekanan dalam alat penukar kalor intermediet (*Intermediate Heat Exchanger / IHX*) sebesar kira-kira 17 %. Gambar 5 menunjukkan pengaruh dari rasio temperatur terhadap efisiensi thermal siklus yang dapat dicapai. Setiap titik

dalam kurva unjuk kerja PCU untuk sistem pendingin HTGR yang ditunjukkan pada Gambar 5 tersebut ditentukan pada perbandingan antara temperatur masuk turbin (*Turbine Inlet Temperature / TIT*) dan temperatur minimum yang dapat dicapai pada proses pelepasan panas yang terjadi melalui *pre-cooler* untuk kondisi kerja tertentu atau temperatur masuk kompresor (*Compressor Inlet Temperature / CIT*).

Tabel 2. Parameter desain dari instalasi PCU

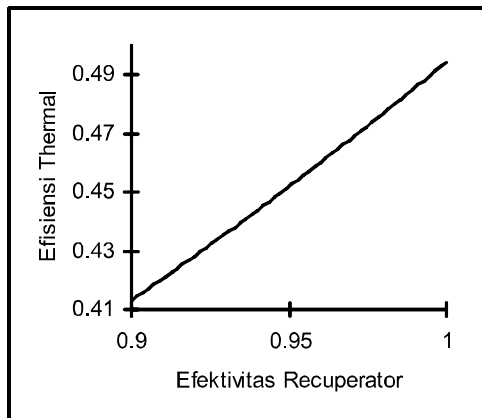
Kompresor 1	
Temperatur masuk, °C	30
Tekanan masuk, bar	38
Temperatur keluar, °C	69
Tekanan keluar, bar	51,5
Rasio tekanan	1,36
Kompresor 2	
Temperatur masuk, °C	30
Tekanan masuk, bar	51,5
Temperatur keluar, °C	69
Tekanan keluar, bar	70
Rasio tekanan	1,36
Turbin	
Temperatur masuk, °C	784
Tekanan masuk, bar	70
Temperatur keluar, °C	555
Tekanan keluar, bar	38
Rasio tekanan	1,84



Gambar 5. Pengaruh TIT/CIT terhadap efisiensi thermal siklus tertutup PCU-HTGR 200 MW_{th}

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, menarik untuk dicatat bahwa perbandingan tekanan optimum tersebut tidak begitu mempunyai pengaruh terhadap penurunan tekanan melalui alat *recuperator*. Dapat diketahui juga, bahwa siklus dengan temperatur maksimum mempunyai pengaruh besar terhadap efektivitas *recuperator* dan efisiensi thermal keseluruhan, dan hal ini ditampilkan dalam Gambar 6. Akan tetapi

perlu digaris bawahi bahwa kenaikan temperatur masuk turbin gas harus diikuti pula dengan perbaikan rancangan rotor turbin termasuk material, bentuk, dan dimensinya. Dari Gambar 6 tersebut dapat dilihat bahwa untuk mencapai efisiensi thermal PCU sebesar 47,2 % diperlukan efektivitas *recuperator* sebesar 97 %.



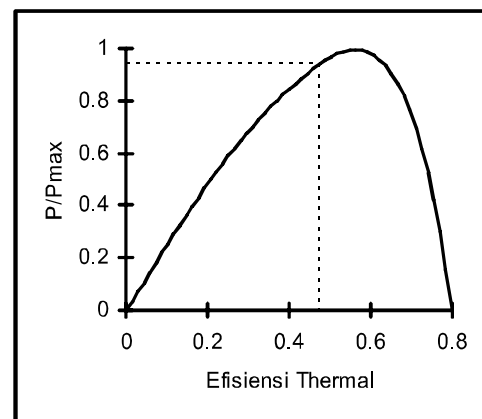
Gambar 6. Pengaruh efektivitas *recuperator* terhadap PCU untuk HTGR 200 MW_{th}

Gambar 7 mengilustrasikan bahwa efisiensi thermal dari siklus tertutup turbin gas helium dalam HTGR akan meningkat hingga mencapai nilai 0,95 dari rasio tekanan (P/P_{max}) untuk efisiensi thermal PCU sekitar 0,472 (47,2 %). Variasi P/P_{max} dalam Gambar 7, diperoleh pada kondisi TIT/CIT sama dengan 3,49. Dari Gambar 7 juga terlihat bahwa peningkatan efisiensi thermal siklus PCU dari instalasi PLTN tipe HTGR, akan menurunkan rasio P/P_{max} . Dengan mengaplikasikan persamaan (8) dan (9), kerja poros per satuan waktu yang dihasilkan turbin helium dipakai sekitar 24 % untuk memutar kompresor dan selebihnya digunakan untuk menjalankan generator listrik.

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan dapat dijelaskan bahwa perbaikan efisiensi thermal siklus tertutup turbin gas helium untuk PCU dari HTGR kogenerasi ini bisa dicapai dengan beberapa cara antara lain :

- (1). Dengan mengaplikasikan alat pengguna ulang panas (*recuperator*) yaitu suatu alat penukar kalor dengan aliran berlawanan arah, dimana panas ditransfer dari gas buang turbin ke gas buang kompresor.
- (2). Dengan menggunakan kompresor bertingkat banyak dengan *intercooler* dan *pre-cooler* sehingga dapat mengurangi kerja kompresor yang dibutuhkan dan dapat menaikkan kerja spesifik per satuan dari siklus tertutup tersebut. Penggunaan kompresor bertingkat banyak dengan *intercooler* dan *pre-cooler*

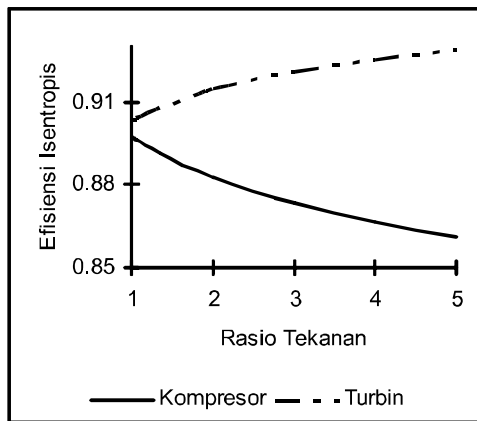
dapat menurunkan suhu buang kompresor apabila dibandingkan dengan menggunakan kompresor satu tingkat saja. Akibatnya lebih banyak panas yang dibutuhkan untuk memanaskan gas helium supaya dapat mencapai persyaratan suhu masuk turbin. Dari uraian ini dapat diketahui bahwa bagaimanapun juga penggunaan kompresor bertingkat banyak secara nyata dapat memperbaiki efisiensi thermal siklus pendingin sekunder pada instalasi HTGR karena efisiensi adiabatik kompresor diperbaiki yang bekerja pada beda tekanan yang lebih kecil.



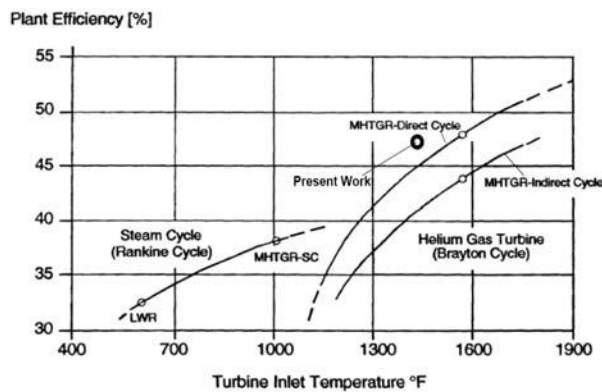
Gambar 7. Variasi P/P_{max} dengan efisiensi thermal

Gambar 8 memperlihatkan rasio tekanan kompresor dan turbin terhadap efisiensi isentropis kedua komponen utama tersebut dalam instalasi PCU. Rasio tekanan kompresor menurun akan menaikkan efisiensi isentropisnya. Begitu juga, rasio tekanan turbin naik akan memperbaiki efisiensi isentropisnya. Jadi dapat dikatakan bahwa dengan perbandingan tekanan kompresor rendah dan perbandingan tekanan turbin tinggi, maka efisiensi thermal dari siklus PCU dalam instalasi PLTN tipe HTGR akan diperbaiki.

Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa efisiensi thermal siklus PCU untuk instalasi HTGR kogenerasi dengan menggunakan siklus tertutup sangat baik dibandingkan dengan kurva yang ada pada kondisi kerja dengan TIT sama. Perbaikan dapat dilakukan dengan cara memperbaiki material, bentuk dan dimensi sudu pada *rotor* turbin. Selanjutnya gas helium dengan temperatur tinggi dialirkan melalui *converging-diverging nozzle* yang keluar dengan kecepatan supersonik mengenai sudu-sudu untuk memproduksi gaya dan untuk memberikan tenaga. Perbandingan ini sangat penting dalam pengertian untuk analisa awal dan dalam penentuan kondisi operasi dari desain PCU untuk PLTN jenis HTGR kogenerasi.



Gambar 8. Pengaruh rasio tekanan terhadap kompresor dan turbin helium



Gambar 9. Diagram perbandingan efisiensi pembangkit daya^[4]

Daya turbin helium yang digunakan untuk menggerakkan generator listrik sebesar 80 MW_{th}. Efisiensi generator listrik yang dipakai sebesar 88 %. Jadi daya listrik yang mampu dihasilkan untuk konsumsi masyarakat di kawasan Babel adalah sebesar 70,4 MWe.

KESIMPULAN

Dari hasil uraian dapat diambil kesimpulan bahwa konfigurasi sistem PCU untuk instalasi PLTN tipe HTGR kogenerasi seperti tersebut diatas mempunyai performa bagus dan layak untuk diaplikasikan di propinsi Babel dengan produksi listrik sebesar 70,4 MWe. Turbin helium dalam memproduksi kerja poros sehingga layak untuk menjamin beroperasinya sistem pendingin dalam memindahkan panas dari teras reaktor agar keselamatan instalasi PLTN jenis HTGR dapat terjamin. Helium sebagai media pendingin sangat cocok digunakan pada siklus pendingin HTGR kogenerasi dengan efektivitas *recuperator* kira-kira 97 %. Sebagai hasil, dikonfirmasi bahwa efisiensi siklus PCU yang dihitung adalah sekitar 47,2 %.

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 yang akan dipresentasikan dalam Seminar Teknologi PLTN dan Keselamatan Fasilitas Nuklir ke 16, 2010 di PTRKN-BATAN.

DAFTAR PUSTAKA

1. ABRAMS, B., A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum Available: http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf, (2002).
2. NO, HC., KIM, JH., KIM, HM., A Review of Helium Gas Turbine Technology for High Temperature Gas Cooled Reactors, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 39, No. 1, February 2007.
3. BOYCE, MP., Gas Turbine Engineering Handbook, Edisi ketiga, Butterworth-Heinemann, (2002).
4. BREY, HL., Development History of the Gas Turbine Modular High Temperature Reactor, IAEA-TECDOC-1238, Agustus 2001.

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

1. Kerja yang dihasilkan oleh turbin gas helium dimanfaatkan untuk apa?
2. Apakah efisiensi termal dari siklus tertutup dalam penelitian ini dapat ditingkatkan lagi?
(Tjipta Suhaemi, PTRKN-BATAN)
3. Apa parameter yang digunakan untuk mendesain turbin gas helium?
4. Apa pengaruh efisiensi turbin?
(Rokhmadi, PTRKN-BATAN)

Jawaban :

1. Kerja turbin (WT) dimanfaatkan untuk memutar kompresor (WC1 dan WC2) juga untuk memutar generator listrik
2. Efisiensi termal dapat ditingkatkan lagi dengan cara meningkatkan efisiensi isentropis turbin helium dan memperbaiki efisiensi isentropis kompresor serta memperbaiki efektivitas *recuperator*

3. Parameter yang digunakan adalah temperatur masuk turbin, rasio tekanan, laju alir helium dan putaran
4. Pengaruh efisiensi turbin adalah dengan semakin baik/tinggi efisiensi isentropis turbin, maka efisiensi termal siklus tertutup turbin helium akan naik sehingga panas yang dihasilkan oleh bahan bakar nuklir dapat dipindahkan oleh helium sebagai media pendingin reactor.