

ANALISIS PERFORMA UNTUK SISTEM TURBIN DAN KOMPRESOR

Oleh

Sri Sudadiyo

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN

ABSTRAK

ANALISIS PERFORMA UNTUK SISTEM TURBIN DAN KOMPRESOR. Dari sudut pandang sistem energi dan lingkungan, konsep untuk reaktor nuklir generasi IV mempunyai kemampuan baik untuk alat pembangkit listrik dan pembangkit panas untuk produksi hidrogen. Reaktor nuklir berpendingin gas ini mengaplikasikan siklus turbin untuk memindahkan panas. Untuk menganalisis sistem pendingin tersebut, diusulkan sebuah model sistem turbin dan kompresor dengan daya 3 kW. Fluida kerja yang digunakan adalah hidrogen yang direaksikan dengan udara didalam kombustor, kemudian diekspansikan melalui sebuah turbin guna memperoleh kerja poros yang akan dimanfaatkan untuk menggerakkan kompresor dan generator. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperbaiki efisiensi termal siklus turbin dan kompresor. Metode yang digunakan yaitu dengan menerapkan persamaan-persamaan kesetimbangan energi, massa, dan momentum. Turbin gas dan kompresor diletakkan pada satu poros dengan putaran 19545 rpm dan laju aliran $69 \text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh efisiensi termal siklus sekitar 20,1 % (ekivalen dengan perbandingan efisiensi Carnot 70,1 %), sehingga layak dikembangkan untuk sistem pendingin gas pada instalasi reaktor gas temperatur tinggi (*High Temperature Gas Reactor / HTGR*).

Kata kunci: HTGR, turbin, kompresor

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS FOR COMPRESSOR AND TURBINE SYSTEM. From the viewpoint of energy system and environment, the concept for nuclear reactors of the generation IV have good potential for electricity and heat generation devices in producing hydrogen. These gas cooled nuclear reactors employ turbine cycle in transferring the heat. To analyses that coolant system, it is proposed a model of compressor and turbine system with power 3 kW. The used working fluid was hydrogen that be burnt with air within combustor, then be expanded through a turbine for getting shaft work that will be used in driving compressor and generator. The purpose of this study is to improve thermal efficiency of turbine and compressor cycle. The used method is by applying the balance equations of energy, mass, and momentum. Gas turbine and compressor were placed at the single shaft with speed of 19545 rpm and flowrate of $69 \text{ m}^3/\text{h}$, it was obtained thermal efficiency of the cycle of about 20,1 % (equal to the Carnot efficiency ratio 70,1 %), so that it is properly developed for system of gas coolant at installation of High Temperature Gas Reactor (HTGR).

Keywords: HTGR, turbine, compressor

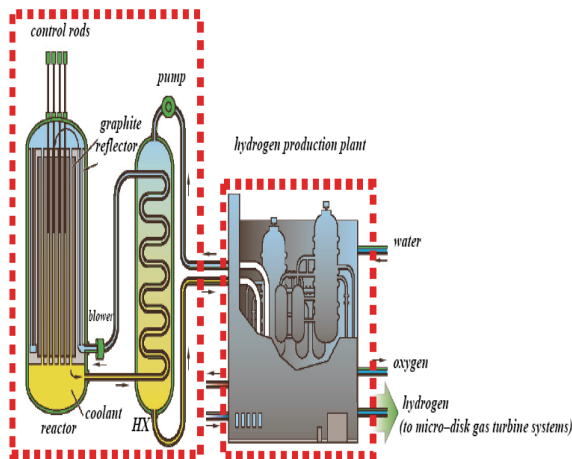
PENDAHULUAN

Pada abad ini, problem penting yang harus diatasi adalah masalah pemanasan global (*global warming*) akibat emisi karbon dioksida (CO₂). Salah satu cara yaitu dengan menggunakan pendayagunaan sistem energi nuklir yang merupakan salah satu sumber energi baru dan terbarukan. Dibeberapa negara saat ini sedang dikembangkan suatu konsep reaktor nuklir generasi IV (reaktor generasi lanjut) yang mendayagunakan energi nuklir untuk pembangkit daya termasuk listrik dan panas. Salah satu aplikasi pembangkit panas yaitu untuk produksi hidrogen yang dapat dimanfaatkan untuk sistem penggerak mula seperti siklus turbin dan kompresor. Konsep reaktor generasi IV ini terdiri dari *Sodium Cooled Fast Reactor System* (SFR), *Very High Temperature Reactor System* (VHTR), *Gas Cooled Fast Reactor*

System (GFR), *Molten Salt Reactor System* (MSR), *Supercritical Water Cooled Reactor System* (SCWR), *Lead Cooled Fast Reactor System* (LFR)^[1]. Dari studi pustaka dapat dikemukakan bahwa reaktor nuklir generasi ke IV ini mempunyai beberapa spesifikasi penting antara lain bahan bakar lebih efisien, limbah nuklir rendah, tahan terhadap penyebaran bahan nuklir berbahaya, merupakan sumber energi tahan lama, mempunyai nilai ekonomis, handal, dan aman karena kemungkinan kerusakan teras reaktor sangat kecil serta tidak memerlukan daerah tertentu sehingga dapat diletakkan berdampingan dengan pemukiman penduduk^[2].

Reaktor gas temperatur tinggi (*High Temperature Gas Reactor / HTGR*) merupakan wujud dari pengembangan VHTR yang ditampilkan pada Gambar 1, menggunakan moderator grafit dan dirancang sebagai reaktor untuk alat pembangkit panas. Dalam makalah ini desain detail dari VHTR

masih belum diputuskan. Beberapa negara yang sedang mengembangkan jenis reaktor VHTR ini yaitu Perancis, Jepang, Afrika Selatan, Korea Selatan, dan Inggris. Temperatur keluar dari teras reaktor VHTR ini dapat mencapai 1273 K (1000°C) sehingga dapat dipakai untuk produksi hidrogen. Bahan bakar hidrogen yang dihasilkan oleh VHTR dapat dipakai untuk mengembangkan model dari siklus pendingin yang mengaplikasikan siklus Brayton atau siklus turbin gas dan kompresor untuk instalasi HTGR. Penelitian dan pengembangan siklus pendingin pada instalasi HTGR sangat kompleks dan memerlukan fasilitas tempat pengujian yang luas, harus aman, handal, dan tidak boleh dilakukan dengan cara *trial and error*. Untuk mengatasi masalah tersebut maka dikembangkan suatu model dari siklus tertutup turbin dan kompresor mikro yang akan dipakai untuk meneliti lebih lanjut tentang tingkah laku dan karakteristik aliran pendingin melalui komponen utama pada instalasi HTGR. Dalam penelitian ini digunakan gas hidrogen yang dibakar dengan oksigen dalam ruang kombustor sebagai pengganti teras HTGR. Dalam studi ini, model yang dirancang mempunyai jumlah komponen yang sama dengan jumlah komponen siklus pendingin HTGR yaitu terdiri dari turbin, kompresor, rekuperator, dan dikopel dengan generator listrik dengan daya 3 kW dengan efisiensi termal tinggi^[3].



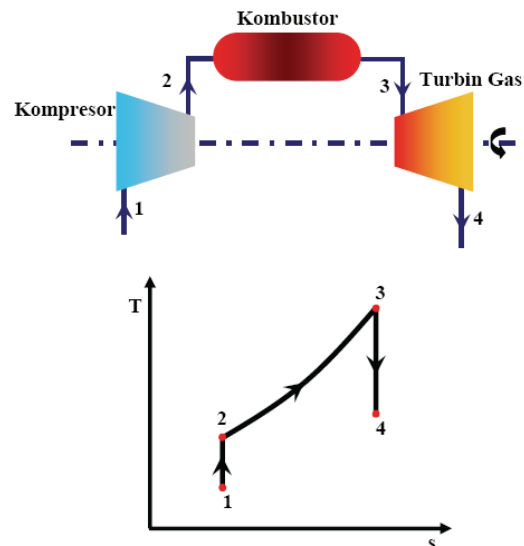
Gambar 1. Konsep reaktor nuklir VHTR untuk produksi hidrogen^[1]

Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa siklus turbin dan kompresor dengan daya kecil. Metode yang dipakai untuk penyelesaian permasalahan yaitu penerapan persamaan-persamaan termodinamika termasuk kesetimbangan energi, kesetimbangan massa, dan momentum agar diperoleh prosedur yang tepat guna mendapatkan kinerja yang optimum.

Diharapkan model siklus turbin dan kompresor dengan daya skala kecil ini dapat digunakan lebih lanjut untuk pengembangan siklus pendingin HTGR dengan daya berskala besar.

TEORI

Model dari sistem turbin dan kompresor, seperti ditunjukkan pada Gambar 2, dikembangkan untuk menguji pengaruh dari berbagai macam parameter terhadap unjuk kerja siklus dengan temperatur tinggi dimana proses dalam kombustor mampu memberikan nyala stabil. Gambar 2 menampilkan model siklus terbuka (untuk pendingin HTGR) berikut berbagai komponen utamanya yang terdiri dari turbin, kompresor, dan kombustor, dan ditunjukkan juga tentang keadaan termodinamika dari setiap titik dapat diplotkan dalam diagram $T - s$ (dimana T adalah temperatur dan s adalah entropi spesifik). Kombustor sebagai pengganti teras HTGR dan sebagai ruang bakar antara hidrogen dan oksigen dengan harga perbandingan panas jenis sebesar 1,3. Hidrogen merupakan gas yang sangat bagus untuk model yang dikembangkan ini karena tidak menghasilkan CO₂ dan juga mempunyai sifat panas yang bagus.



Gambar 2. Siklus sederhana turbin dan kompresor^[3]

Dari Gambar 2 dapat dihitung daya kompresor yang dibutuhkan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\dot{W}_{\text{Kompresor}} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Sedangkan daya yang dihasilkan oleh turbin gas dapat dihitung dengan mengaplikasikan persamaan dibawah :

$$\dot{W}_{\text{Turbin}} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) \quad (2)$$

Efektivitas *recuperator* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan di bawah :

$$\eta_{\text{hc}} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} \quad (3)$$

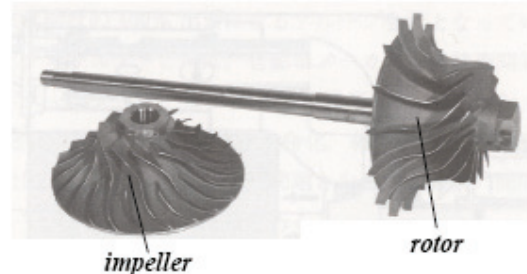
METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penyelesaian masalah dilakukan dengan menentukan parameter yang diuji yaitu laju aliran gas, tekanan dan temperatur masuk, tekanan dan temperatur keluar, putaran rotor, dan efektivitas rekuperator. Kondisi kerja setiap komponen dapat diketahui, dan putaran poros dari sistem turbin dan kompresor merupakan variabel yang berbanding terbalik dengan laju aliran gas^[3]. Temperatur masuk kompresor ditentukan sesuai dengan temperatur lingkungan pada tekanan 0,1 MPa. Dengan menggunakan angka perbandingan tekanan dan kondisi gas keluar dari kombustor, maka harga temperatur keluar kompresor, temperatur masuk dan keluar turbin dapat dihitung. Tekanan kombustor dapat mencapai 0,25 MPa dengan temperatur 1150 K. Gas panas yang keluar dari kombustor diekspansikan melalui turbin untuk memperoleh kerja poros yang sangat bermanfaat untuk memutar kompresor dan generator listrik. Perhitungan daya kompresor dan daya turbin gas dihitung dengan persamaan (1) dan (2) di atas. Efisiensi termal siklus diperoleh dari perbandingan antara selisih daya turbin dikurangi daya kompresor dibandingkan dengan jumlah panas yang diberikan^[4]. Penambahan alat rekuperator dapat memperbaiki efisiensi termal dari model ini sehingga menjadi siklus tertutup turbin dan kompresor (untuk pendingin HTGR). Perhitungan efektivitas rekuperator dapat dilakukan dengan aplikasi persamaan (3).

HASIL DAN DISKUSI

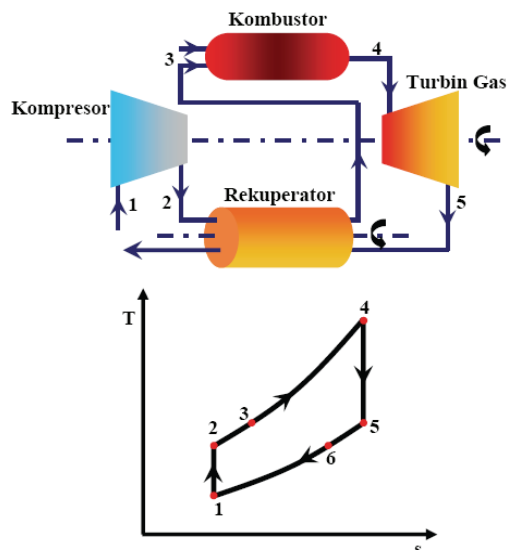
Diagram dari perubahan-perubahan temperatur dan entropi seperti terlihat dalam Gambar 2 adalah sangat berguna dalam menggambarkan siklus turbin dan kompresor untuk mengetahui bahwa dalam proses isentropik, seperti proses dalam turbin dan kompresor, daya yang diproduksi adalah hasil dari laju aliran gas dan perubahan enthalpi melalui proses tersebut. Jadi,

perbedaan temperatur yang didapatkan pada diagram $T - s$ adalah sesuai 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 naik. Hal ini mengilustrasikan bahwa kerja lebih dapat diperoleh dengan cara mengekspansikan gas pada temperatur tinggi daripada pada temperatur rendah untuk proses tekanan tetap. Dalam siklus yang dianggap ideal, proses kompresi gas adalah isentropik yaitu adiabatik atau tidak ada kerugian panas akibat gesekan, sehingga entropi dalam proses tersebut adalah konstan walaupun temperatur meningkat^[3]. Gambar 3 memperlihatkan ilustrasi dari komponen utama yang digunakan untuk siklus turbin dan kompresor yaitu *impeller* untuk kompresor dan *rotor* untuk turbin yang dibuat oleh *Ishikawajima Heavy Industry*, Jepang. Diameter *rotor* turbin sebesar 10 cm^[5].

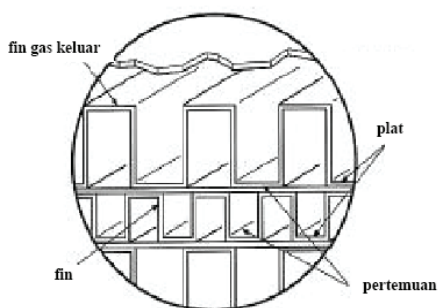


Gambar 3. Komponen utama yang dipakai pada siklus turbin dan kompresor^[5]

Kondisi operasi pada temperatur tinggi dapat memperbaiki efisiensi termal siklus turbin dan kompresor. Peningkatan temperatur ini dapat dilakukan dengan penambahan rekuperator pada siklus seperti terlihat dalam Gambar 4. Tipe rekuperator yang digunakan pada sistem turbin dan kompresor ini dapat berotasi atau *cycling recuperator* dengan geometri seperti diperlihatkan pada Gambar 5, sehingga temperatur gas naik dan distribusinya lebih merata. Temperatur masuk rekuperator sebesar 374 K dan temperatur keluar rekuperator sebesar 431 K. Efektivitas rekuperator dapat dihitung sebesar 95 %. Untuk siklus turbin dan kompresor yang sederhana seperti pada Gambar 2 diperoleh efisiensi termal siklus sekitar 18,6 % atau setara dengan harga perbandingan efisiensi Carnot (*Carnot Efficiency Ratio / CER*) sebesar 65 % yang terjadi pada kondisi rasio tekanan kompresor 2,5. Pada siklus yang diperbaiki seperti dalam Gambar 4 diperoleh efisiensi termal sebesar 20,1 % atau CER sama dengan 70,1 %.

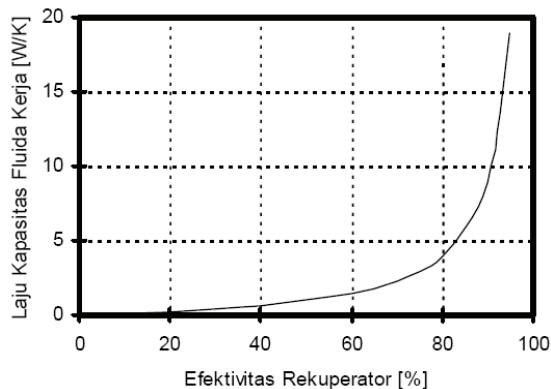


Gambar 4. Siklus turbin dan kompresor dengan rekuperator



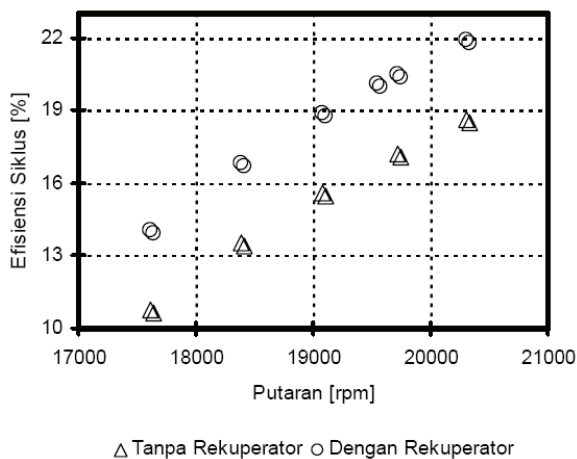
Gambar 5. Konfigurasi rekuperator yang digunakan

Kondisi operasi dari siklus turbin dan kompresor ini dilakukan pada putaran 17000 dan 21000 rpm yang masih dalam daerah dibawah putaran kritis (32917 rpm), agar bantalan untuk penyangga poros yang berputar dapat bekerja dengan aman (tidak pecah). Gambar 6 menunjukkan pengaruh performa rekuperator terhadap laju kapasitas aliran gas. Laju kapasitas aliran gas merupakan laju aliran massa gas dikali koefisien panas jenis pada tekanan konstan. Untuk mencapai performa yang tinggi dibuat rekuperator dengan aliran gas berlawanan. Faktor utama yang berpengaruh pada efektivitas rekuperator yaitu koefisien laju perpindahan panas dan luas permukaan.



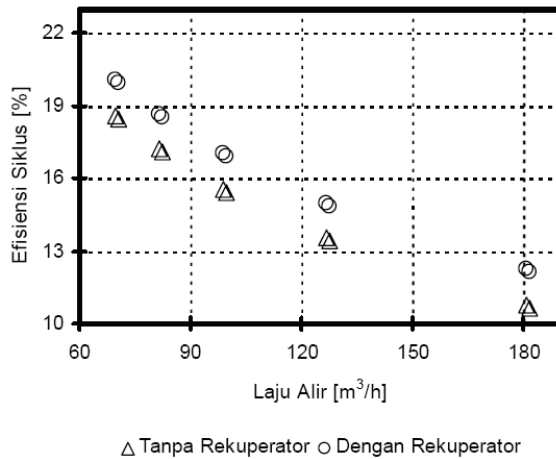
Gambar 6. Kurva antara efektivitas rekuperator dan laju kapasitas fluida

Gambar 7 menunjukkan pengaruh efisiensi termal siklus terhadap karakteristik aliran gas yang diukur pada kecepatan poros dalam kisaran harga dari 17000 hingga sedikit diatas 25000 rpm. Batasan kecepatan dilakukan akibat permasalahan pada bantalan dan rotor turbin yang digunakan. Titik pada setiap kurva tersebut didapat dengan memvariasikan katup untuk mengatur laju aliran gas. Dari hasil yang diperoleh, maka untuk mencapai efisiensi termal dari siklus sederhana (tanpa rekuperator) seperti dalam Gambar 3 sebesar 18,6 %, kondisi operasi untuk pengujian sistem turbin dan kompresor dapat dilakukan pada putaran 20305 rpm dengan laju aliran sebesar $69 \text{ m}^3/\text{h}^{[3]}$. Apabila ditambah rekuperator seperti pada Gambar 4, maka untuk mencapai efisiensi termal siklus sebesar 20,1 % dan laju aliran sebesar $69 \text{ m}^3/\text{h}$ diperlukan putaran rotor turbin yang lebih rendah sebesar 19545 rpm. Dari Gambar 7 juga dapat diketahui bahwa semakin tinggi putaran maka efisiensi yang dihasilkan semakin baik.



Gambar 7. Pengaruh putaran terhadap laju alir gas

Pada rasio tekanan kompresi yang sama, semakin tinggi laju aliran gas yang diberikan, maka efisiensi termal siklus yang dihasilkan akan meningkat. Untuk kondisi laju aliran gas tetap, maka efisiensi termal siklus turbin dan kompresor dengan penambahan rekuperator lebih baik dibandingkan dengan tanpa rekuperator. Model sistem turbin dan kompresor yang sedang diteliti ini diharapkan dapat untuk diaplikasikan pada pengembangan sistem pendingin gas pada HTGR.



Gambar 8. Kurva pengaruh karakteristik laju aliran gas terhadap efisiensi termal siklus

KESIMPULAN

Dari bahasan diatas, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- Siklus turbin dan kompresor dengan daya keluaran 3 kW merupakan model miniatur untuk pengembangan siklus pendingin instalasi HTGR.
- Kondisi pengujian dapat dilakukan pada putaran dalam batas tertentu, dan penambahan alat rekuperator dapat memperbaiki efisiensi termal siklus.
- Untuk studi ini, diperoleh efisiensi termal siklus 20,1 % (atau nilai CER = 70,1 %), maka laju aliran gas yang disediakan sebesar 69 m³/h pada putaran 19545 rpm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Redaksi Majalah Ilmiah Sigma Epsilon yang telah membantu dalam perbaikan makalah ini.

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", (http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf), 2002.
2. ANONYMOUS, "PLTN Generasi IV", 2000.
3. SUDADIYO, S., "Studi Untuk Menentukan Kondisi Pengujian Sistem Turbin dan Kompresor", Prosiding PPI-PDIPTN, PTAPB-BATAN, 2009.
4. BATHE, WW., "Fundamentals of Gas Turbines", Edisi ke 2, John Wiley and Sons, New York, 1996.
5. KUNYOSHII, I., "Micro Gas Turbine System", Ohmsha, Jepang, 2002.