

ANALISIS KOMPRESOR AKSIAL *MULTI-STAGE* UNTUK SISTEM PENDINGIN TERAS RGTT200K

Sri Sudadiyo

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) – BATAN
Kawasan PUSPIPEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, BANTEN.

Telp.: 62-21-7560912, Fax.: 62-21-7560913, Kode Pos : 15310

e-mail : sudadiyo@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS KOMPRESOR AKSIAL *MULTI-STAGE* UNTUK SISTEM PENDINGIN TERAS RGTT200K. Konsep Reaktor Gas Temperatur Tinggi Kogenerasi 200 MW_{th} (RGTT200K) sebagai salah satu jenis reaktor daya nuklir generasi lanjut berpendingin helium yang mempunyai kemampuan kogenerasi untuk produksi hidrogen, pembangkit listrik, dan desalinasi air laut. Proses kogenerasi dapat diaplikasikan untuk reaktor daya nuklir tipe RGTT200K karena teras reaktor mampu menghasilkan temperatur tinggi. Panas dari teras reaktor dipindahkan oleh helium dengan menggunakan sistem turbin helium. Agar sistem turbin helium berlangsung secara kontinyu, maka perlu didesain kompresor aksial *multi-stage* untuk memberikan tekanan 5 MPa. Dalam penelitian ini, desain konseptual kompresor sebagai komponen vital dari sistem turbin helium dianalisis untuk mendapatkan geometri kompresor. Analisis dimodelkan dengan memakai *Cycle-Tempo Release 5* untuk menghitung kondisi operasional sistem turbin helium dengan data masukan yaitu daya termal dan temperatur keluar teras 1223 K sedangkan data keluaran yaitu laju aliran massa, rasio tekanan, temperatur masuk dan keluar kompresor. Data yang diperoleh digunakan untuk menghitung geometri kompresor *multi-stage*. Karakteristika kompresor dihitung secara analitis untuk memperoleh efisiensi optimal. Hasil analisis diperoleh bahwa kompresor aksial *multi-stage* memiliki rasio *hub-tip* 0,85, laju aliran helium 107 kg/s, rasio kompresi 1,85, dan efisiensi 90%, sehingga dapat diaplikasikan untuk sistem pendingin teras RGTT200K.

Kata kunci: Kompresor, aksial, RGTT200K

ABSTRACT

ANALYSIS ON *MULTI-STAGE AXIAL COMPRESSOR FOR CORE COOLING SYSTEM OF RGTT200K.* Concept for 200 MW_{th} Cogeneration High Temperature Gas Reactor (RGTT200K) as the one of advanced generation nuclear power reactors cooled helium that have cogeneration potential for hydrogen production, electricity generation, and desalination of sea water. Cogeneration process can be applied to nuclear power reactor of RGTT200K type since reactor core is able to yield high temperature. The heat of nuclear core was transferred by helium by using helium turbine system. In order to helium turbine system process continuously, it is necessary to design the *multi-stage axial compressor* to put pressure 5 MPa. In this study, conceptual design of compressor as a vital component of helium turbine system was analyzed to obtain geometry of compressor. Analyses were modeling by using *Cycle-Tempo Release 5* to calculate operating conditions of the helium turbine system with input data of thermal power and core exit temperature of 1223 K while data output of mass flow rate, pressure ratio, inlet and outlet of compressor temperatures. The obtained data were used to calculate geometry of *multi-stage compressor*. The compressor characteristics are analytically calculated to obtain optimum efficiency. Analysis result was found that the *multi-stage axial compressor* has a *hub-tip* ratio of 0.85, helium flow rate of 107 kg/s, compression ratio 1.85, efficiency 90%, so it can be applied for core cooling system of RGTT200K.

Keywords: Compressor, axial, RGTT200K

PENDAHULUAN

Penelitian baru tentang Reaktor Gas Temperatur Tinggi^[1] yang sedang dilakukan oleh Bidang Pengembangan Reaktor, Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir diberi nama RGTT200K^[2]. RGTT200K merupakan desain konseptual reaktor maju berpendingin helium dengan daya termal 200 MW_{th} untuk kogenerasi. Kemampuan kogenerasi ini digunakan sebagai pembangkit listrik dan panas untuk produksi hidrogen dan desalinasi air laut. Daya listrik yang dihasilkan RGTT200K sebesar 60 MW_e^[2] sangat sesuai untuk ditempatkan di daerah-daerah di Indonesia seperti pulau Madura, Jawa, dan Bangka Belitung. RGTT200K menghasilkan temperatur keluar teras hingga 1223 K (950 °C) sehingga cocok dimanfaatkan untuk produksi hidrogen sebagai pengganti bahan bakar fosil. Gas yang dipakai untuk mendinginkan teras RGTT200K adalah helium karena mempunyai beberapa kelebihan diantaranya tidak dapat terbakar walaupun temperatur tinggi, tidak menjadi radioaktif, tidak menimbulkan korosi, dan mempunyai sifat transfer termal bagus^[1].

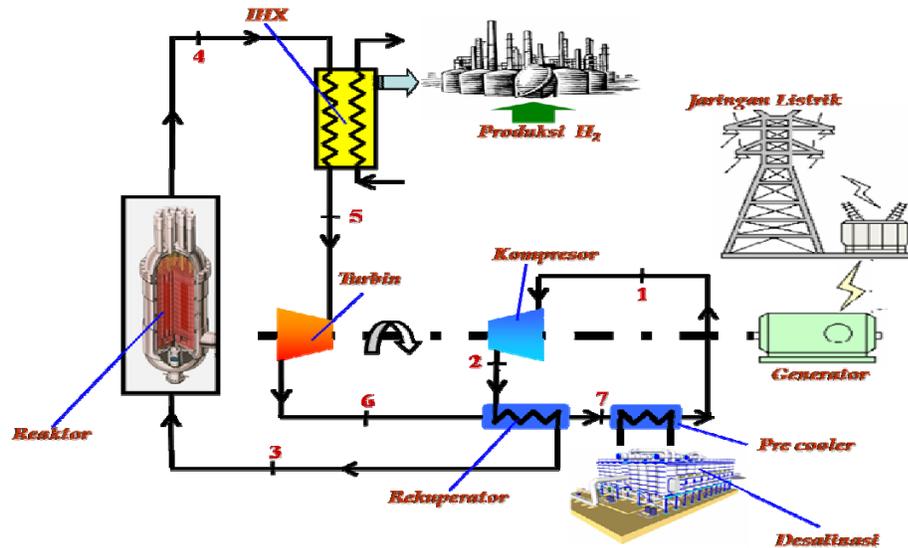
Panas teras RGTT200K diserap oleh helium yang bersirkulasi dalam sistem pendingin yang dinamakan sistem turbin helium. Sistem turbin helium ini mempunyai komponen dinamis seperti turbin dan kompresor yang terletak pada satu poros. Juga mempunyai komponen statis seperti *Intermediate Heat Exchanger* (IHX), rekuperator, dan *precooler*. Kompresor merupakan komponen vital untuk mensirkulasikan helium melalui sudu dan berfungsi untuk menaikkan tekanan aliran helium setelah diekspansikan oleh turbin. Untuk itu perlu didesain kompresor agar proses pendinginan teras RGTT200K beroperasi secara berkesinambungan. Jenis kompresor yang dipilih dalam penelitian ini adalah tipe aliran aksial dengan alasan mampu untuk menghasilkan efisiensi tinggi dan geometri sudu dapat dirancang lebih kecil dibandingkan dengan jenis lain.

Makalah ini bertujuan untuk menganalisis desain konseptual kompresor aksial *multi-stage*. Analisis dilakukan untuk menentukan karakteristik aliran aksial melalui sudu agar diperoleh efisiensi tinggi sehingga kemampuan transfer termal dari teras RGTT200K menjadi lebih baik. Secara umum, ada dua faktor utama yang mempengaruhi performa kompresor dalam sistem turbin helium yaitu rasio tekanan kompresi dan efisiensi yang dihasilkan. Semakin baik performa kompresor, maka semakin tinggi unjuk kerja sistem turbin helium. Hal ini menunjukkan bahwa helium bersirkulasi secara efektif melalui sistem turbin helium untuk mendinginkan teras RGTT200K. Metode yang tepat untuk mendesain geometri kompresor dilakukan dengan memodelkan sistem turbin helium menggunakan perangkat lunak *Cycle-Tempo Release 5*^[3]. Data masukan (*input data*) yaitu daya termal dan temperatur keluar teras RGTT200K. Hasil pemodelan diolah untuk menentukan kompresor *multi-stage* dengan data keluaran (*output data*) geometri sudu termasuk panjang dan rasio diameter *hub-tip*, efisiensi, dan kecepatan spesifik.

STATE OF THE ART

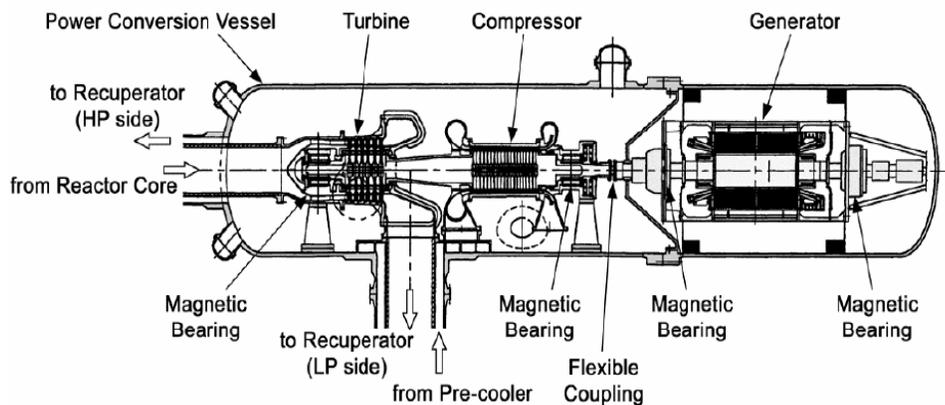
Skematik RGTT200K seperti terlihat pada Gambar 1^[4]. Teras reaktor berada dalam bejana tekan (*pressure vessel*) dan dihubungkan dengan sebuah saluran gas helium panas ke IHX. Bahan bakar teras RGTT200K yaitu tipe triso (tri isotropik) yang dilapisi keramik^[5] dengan moderator

grafit. Energi termal yang dibangkitkan teras RGTT200K dipindahkan oleh helium menuju IHX untuk selanjutnya dialirkan melalui sistem turbin helium.



Gambar 1. Skematik desain konseptual RGTT200K^[4]

Desain konseptual sistem turbin helium untuk RGTT200K, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2^[6], terdiri dari turbin dan kompresor pada satu poros. Sistem turbin helium ini ditempatkan dalam sebuah bejana tekan yang dikopel dengan generator listrik. Dari Gambar 2 dapat dijelaskan bahwa helium temperatur tinggi berekspansi melalui turbin untuk menghasilkan putaran. Keluar turbin, helium panas masuk kedalam rekuperator untuk memanaskan helium pada bagian lain dari keluaran kompresor. Helium panas didinginkan lebih lanjut dalam *precooler* dan ditekan kembali oleh kompresor menuju rekuperator sebelum kembali kedalam teras RGTT200K.



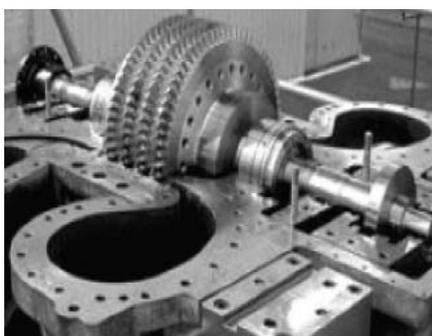
Gambar 2. Desain konseptual sistem turbin helium untuk RGTT200K^[6]

TEORI

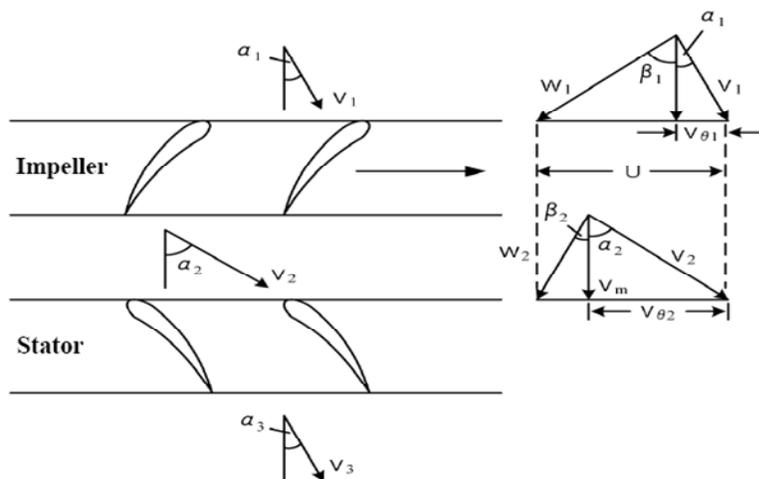
Kompresor aksial *multi-stage* dalam makalah ini mempunyai 10 tingkat dimana kenaikan temperatur pada setiap tingkat berbanding lurus dengan kecepatan sudu. Konstanta panas spesifik helium yang digunakan 1,67. Analisis kompresor *multi-stage* ini ditentukan oleh faktor pembebanan

sudu (*blade loading factor*) sebagai fungsi dari kecepatan sudu^[7]. Gambar 3 memperlihatkan tipikal kompresor aksial *multi-stage* yang dikembangkan Jepang^[8] yang digunakan sebagai acuan dalam makalah ini. Geometri sudu dapat ditentukan dengan menggunakan diagram segitiga kecepatan seperti pada Gambar 4. Aliran helium memasuki sudu dengan kecepatan V_1 pada sudut α_1 dan kecepatan relatif W_1 pada sudut masuk β_1 menghasilkan kecepatan sudu U . Aliran helium tersebut didefleksikan melalui sudu dengan kecepatan keluar W_2 dan sudut keluar β_2 . Dengan nilai U tertentu, maka kecepatan V_2 pada sudut α_2 dapat dihitung. Kecepatan $V_{\theta 1}$ dan $V_{\theta 2}$ diperoleh dari pembagian antara kecepatan aksial V_m dan *cosinus* sudut masuk aliran helium. Beda entalpi setiap tingkat dihitung sebagai berikut^[8] :

$$\Delta h = U(V_{\theta 2} - V_{\theta 1}) \dots\dots\dots(1)$$



Gambar 3. Tipikal *impeller* kompresor aksial *multi-stage*^[8]



Gambar 4. Profil segitiga kecepatan aliran aksial pada kompresor^[8]

Formulasi berikut digunakan untuk menghitung geometri kompresor aksial *multi-stage* yaitu:

- Daya kompresor yang dibutuhkan setiap tingkat dihitung sebagai berikut^[8] :

$$\dot{W}_C = \dot{m} \Delta h \dots\dots\dots(2)$$

dimana \dot{W}_C adalah daya kompresor per tingkat yang dibutuhkan, \dot{m} adalah laju aliran helium, dan Δh adalah beda entalpi per tingkat dalam proses kompresi.

- Diameter ujung (*tip*) sudu pada kompresor setiap tingkat dihitung sebagai berikut^[9] :

$$D_{tip} = \frac{19}{n} \sqrt{\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}}} \dots\dots\dots (3)$$

dimana D_{tip} adalah diameter ujung sudu setiap tingkat dan n adalah putaran poros.

- Panjang sudu dihitung sebagai berikut^[9] :

$$L = \frac{0,61 \dot{m}}{\phi n D} \dots\dots\dots (4)$$

dimana L adalah panjang sudu dan ϕ adalah koefisien aliran yang didefinisikan sebagai rasio dari kecepatan aksial terhadap kecepatan sudu.

- Diameter kaki (*hub*) sudu pada kompresor setiap tingkat dihitung sebagai berikut^[9] :

$$D_{hub} = D_{tip} - 2L \dots\dots\dots (5)$$

- Efisiensi setiap tingkat dikalkulasi sebagai berikut^[9, 10] :

$$\eta_{stage} = \frac{U^2 \phi \psi \chi}{\Delta h} \text{ dengan } \psi = \frac{\Delta h}{U^2} \text{ dan } \chi = \left\{ \frac{(R - \phi \delta)}{(\phi + \delta R)} + \frac{(1 - R - \phi \delta)}{(\phi + \delta(1 - R))} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

dimana η_{stage} adalah efisiensi sudu, ψ adalah faktor pembebanan sudu, δ adalah rasio koefisien geser terhadap koefisien angkat, R adalah tingkat reaksi dengan nilai 0,5 untuk kompresor dalam sistem turbin helium pada RGTT200K, dan U adalah kecepatan sudu.

- Putaran spesifik *impeller* kompresor *multi-stage* dihitung sebagai berikut^[9, 10] :

$$n_s = \frac{\phi^{1/2}}{\psi^{3/4}} \dots\dots\dots (7)$$

Parameter-parameter tersebut di atas digunakan untuk menganalisis karakteristik aliran melalui kompresor aksial *multi-stage* dalam sistem turbin helium untuk RGTT200K.

METODOLOGI

Metode yang digunakan untuk analisis desain konseptual kompresor dalam sistem turbin helium pada RGTT200K sebagai berikut :

Pemodelan

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Cycle-Tempo Release 5* untuk memperoleh parameter termodinamika yang sesuai dengan sistem pendingin teras RGTT200K. Keunggulan perangkat lunak ini yaitu mampu menghitung dengan cepat *properties* aliran energi dalam siklus termodinamika, mempunyai sejumlah besar model komponen untuk konfigurasi sistem yang diinginkan, dan menghasilkan ketelitian tinggi untuk optimalisasi pemodelan termodinamika. Data masukan yang diberikan yaitu daya termal sebesar 200 MW_{th} dan temperatur keluar teras

RGTT200K sekitar 1223 K (950 °C). Data keluaran yaitu tekanan, temperatur, dan laju aliran massa helium.

Desain Geometri Kompresor

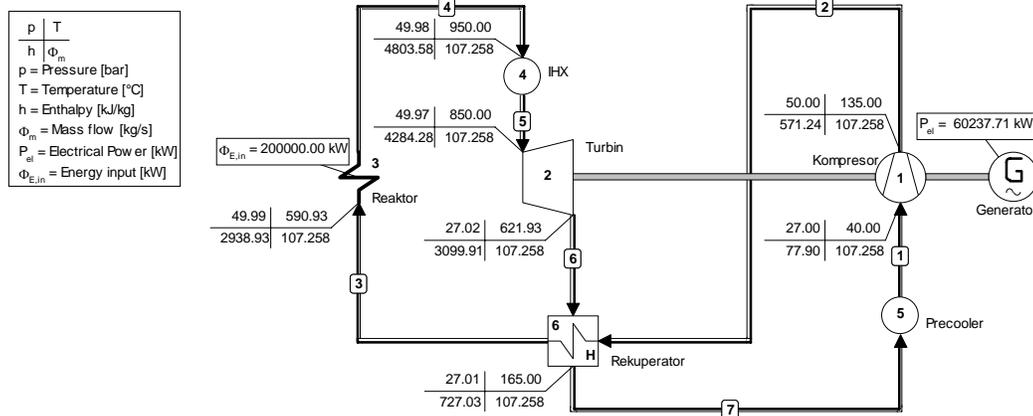
Desain geometri kompresor *multi-stage* dilakukan dengan metode analitis dengan menggunakan Persamaan (1) sampai dengan Persamaan (5). Data masukan yang digunakan yaitu tekanan, temperatur, dan laju aliran massa helium pada kondisi masuk dan keluar kompresor. Nilai kecepatan dan besaran sudut aliran dengan arah aksial pada posisi masuk dan keluar dari sudu kompresor ditentukan yaitu $U=228$ m/s, $\alpha_1=30^\circ$, $\alpha_2=60^\circ$, $\beta_1=60^\circ$, dan $\beta_2=30^\circ$. Data keluaran yaitu (a). Nilai-nilai kecepatan aliran helium yang diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan diagram kecepatan pada Gambar 4, dan (b). Geometri sudu pada *impeller* kompresor dalam sistem turbin helium untuk RGTT200K.

Karakteristika Kompresor

Karakteristika kompresor dianalisis dengan menggunakan Persamaan (4), Persamaan (6), dan Persamaan (7) pada kondisi putaran dengan kisaran dari 3000 rpm hingga 4400 rpm. Data masukan yaitu geometri sudu kompresor, koefisien aliran helium, dan putaran poros. Data keluaran yaitu faktor pembebanan sudu, putaran spesifik, dan efisiensi dimana hasilnya diplotkan ke dalam Tabel dan Diagram.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan termodinamika dengan menggunakan *Cycle-Tempo Release 5* dapat dilihat pada Gambar 5. Tabel 1 merupakan hasil perhitungan dengan perangkat lunak *Cycle-Tempo Release 5*. Dari Tabel 1 dapat dihitung bahwa beda temperatur dalam teras RGTT200K dengan mengaplikasikan bahan bakar triso sekitar 359 K, tekanan helium masuk kompresor 2,7 MPa, beda dari temperatur keluar kompresor dan temperatur keluar rekuperator pada bagian dingin 30 K, dan penurunan temperatur melalui *precooler* 125 K untuk desalinasi air laut. Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa kompresor beroperasi pada rasio tekanan rendah 1,85, sedangkan helium mempunyai rasio termal jenis tinggi 1,67. Untuk itu didesain kompresor bertingkat banyak (*multi-stage*) agar rasio tekanan kompresi tersebut terpenuhi. Dalam penelitian ini, kompresor didesain dengan arah aliran aksial dan memiliki 10 tingkat pada kondisi putaran 3600 rpm dan laju aliran massa helium konstan 107 kg/s. Dari Gambar 5 dapat dihitung kondisi untuk setiap tingkat yaitu beda entalpi 49,334 kJ/kg, rasio tekanan kompresi 0,185, dan beda temperatur 9,5 K.



Gambar 5. Pemodelan sistem turbin helium untuk mendinginkan teras RGTT200K

Tabel 1. Hasil perhitungan dengan *Cycle-Tempo Release 5* untuk RGTT200K

Parameter	Satuan	Nilai
Daya termal teras RGTT200K	MW _{th}	200
Daya listrik yang diproduksi	MW _e	60
Putaran generator	rpm	3600
Temperatur masuk teras RGTT200K	K	863,93
Temperatur keluar teras RGTT200K	K	1223
Laju aliran massa helium	kg/s	107
Tekanan helium	MPa	5
Rasio kompresi	-	1,85
Temperatur masuk kompresor	K	313
Temperatur masuk turbin	K	1123
Temperatur masuk <i>precooler</i>	K	438

Sistem turbin helium yang digunakan untuk poses pendinginan teras RGTT200K dapat beroperasi secara berkesinambungan dengan cara menaikkan tekanan aliran helium melalui kompresor. Oleh karena itu kompresor didesain dengan nilai yang tinggi untuk rasio diameter antara *hub* dan *tip* agar keterbatasan putaran poros dapat teratasi. Dari perhitungan dengan memakai Persamaan (3) dan Persamaan (5), nilai rasio diameter *hub-tip* sebesar 0,85 yang berarti desain kompresor memenuhi syarat (aman). Performa sudu kompresor dipengaruhi oleh rasio tekanan kompresi dan kecepatan sudu. Kecepatan keliling aliran helium melalui sudu dipengaruhi oleh geometri sudu. Bentuk sudu yang kecil akan meningkatkan kecepatan kelilingnya karena helium pada temperatur tinggi mempunyai kecepatan suara tinggi. Besaran sudut masuk dan keluar sudu kompresor didesain simetri agar distribusi tekanan merata sepanjang sudu dan mampu memberikan kenaikan tekanan yang signifikan pada setiap permukaan sudu. Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan kecepatan aliran melalui sudu kompresor sesuai dengan vektor kecepatan pada Gambar 4. Hasil pada Tabel 2 tersebut diperoleh pada kondisi aliran helium melalui sudu stabil, putaran

poros konstan 3600 rpm, sudut α_1 sama dengan sudut β_2 , sudut α_2 sama dengan sudut β_1 , dan tidak dipengaruhi oleh sistem pemipaan kompresor.

Tabel 2. Hasil perhitungan kecepatan aliran helium melalui sudu

Parameter	Nilai
V_m [m/s]	114
V_1 [m/s]	114
W_1 [m/s]	197
$V_{\theta 1}$ [m/s]	132
V_2 [m/s]	197
W_2 [m/s]	114
$V_{\theta 2}$ [m/s]	228

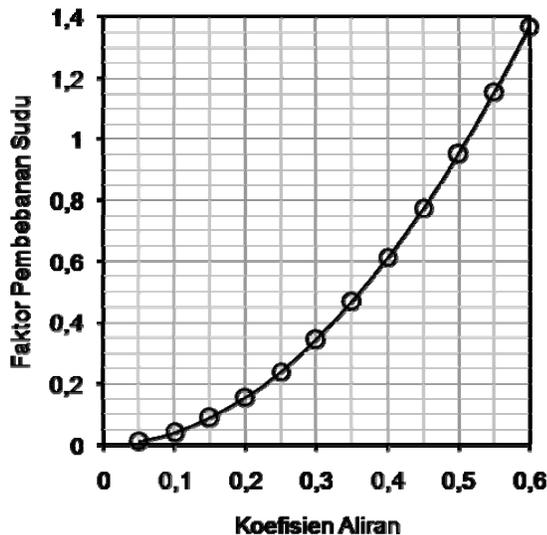
Tabel 3 memberikan hasil perhitungan geometri kompresor dalam sistem turbin helium untuk sistem pendingin teras RGTT200K. Efisiensi setiap tingkat dihitung dengan menggunakan Persamaan (6) dimana nilai efisiensi tinggi menunjukkan bahwa desain sudu kompresor mempunyai performa baik dalam menerima beban (tekanan). Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa panjang sudu 91 mm. Geometri panjang sudu kompresor ini digunakan untuk mengantisipasi kenaikan beban yang terjadi karena adanya perlambatan aliran helium terutama kearah aksial. Pada penelitian ini, efisiensi setiap tingkat dihitung sekitar 90% untuk kondisi putaran poros 3600 rpm, nilai koefisien aliran 0,5, nilai rasio koefisien geser terhadap koefisien angkat 0,053, dan nilai faktor pembebanan sudu 0,95.

Tabel 3. Hasil perhitungan geometri kompresor *multi-stage*

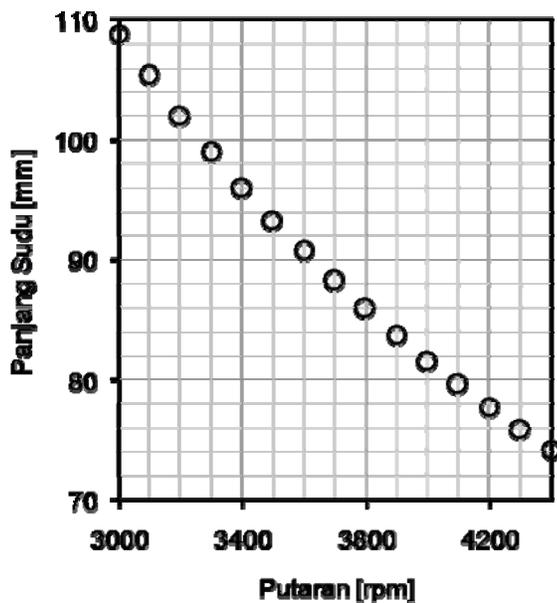
Parameter	Nilai
Putaran poros [rpm]	3600
Laju alir helium [kg/s]	107
Tekanan masuk [MPa]	2,7
Tekanan keluar [MPa]	5
Rasio tekanan kompresi	1,85
Jumlah tingkat [buah]	10
Diameter <i>tip</i> sudu [mm]	1210
Diameter <i>hub</i> sudu [mm]	1028
Panjang sudu [mm]	91
Rasio diameter <i>hub-tip</i>	0,85

Gambar 6 menunjukkan diagram antara koefisien aliran helium dan faktor pembebanan sudu kompresor pada kecepatan aksial 114 m/s. Terlihat bahwa kurva yang dihasilkan menyerupai bentuk

persamaan eksponensial dimana semakin besar harga koefisien aliran, maka beban yang diterima oleh sudu semakin tinggi.



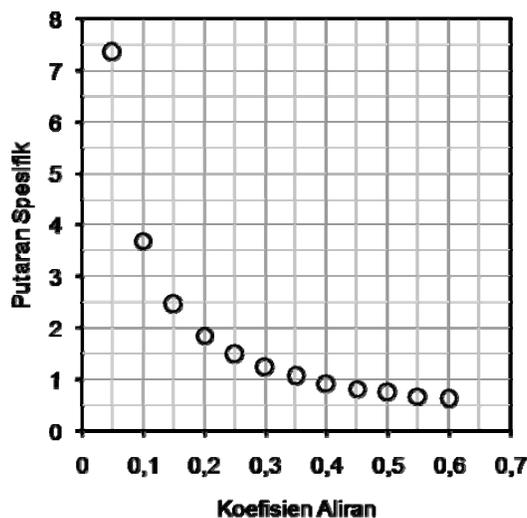
Gambar 6. Pengaruh koefisien aliran terhadap faktor pembebanan sudu



Gambar 7. Pengaruh putaran terhadap panjang sudu kompresor

Gambar 7 memperlihatkan diagram antara putaran *impeller* dan panjang sudu pada kondisi operasi dengan mengaplikasikan koefisien aliran optimum 0,14 dan putaran poros kompresor bervariasi dari 3000 rpm hingga 4400 rpm. Dari Gambar 7 terlihat bahwa profil sudu semakin kecil dengan peningkatan putaran poros kompresor. Profil sudu ini harus diperhitungkan karena sudu kompresor harus mempunyai bentuk yang mampu memberi kecepatan sama pada setiap tingkat.

Pada penelitian ini, profil sudu didesain dengan panjang 91 mm pada kondisi putaran 3600 rpm. Seperti dituliskan pada Persamaan (2) bahwa kebutuhan daya kompresor dipengaruhi oleh beda entalpi antara kondisi keluar dan kondisi masuk kompresor. Nilai-nilai entalpi ini dihitung dengan menggunakan perangkat lunak *Cycle-Tempo Release 5*. Beda entalpi mempengaruhi secara signifikan beda antara temperatur masuk dan temperatur keluar kompresor. Beda temperatur ini mengakibatkan efektivitas perpindahan termal dalam rekuperator menjadi berubah. Perubahan efektivitas rekuperator ini berakibat pada temperatur masuk teras RGTT200K. Untuk kondisi putaran poros kompresor 3600 rpm dan nilai efektivitas rekuperator 93,6%, diperoleh temperatur masuk teras RGTTT200K sekitar 863,93 K (590,93 °C).



Gambar 8. Pengaruh putaran spesifik terhadap koefisien aliran

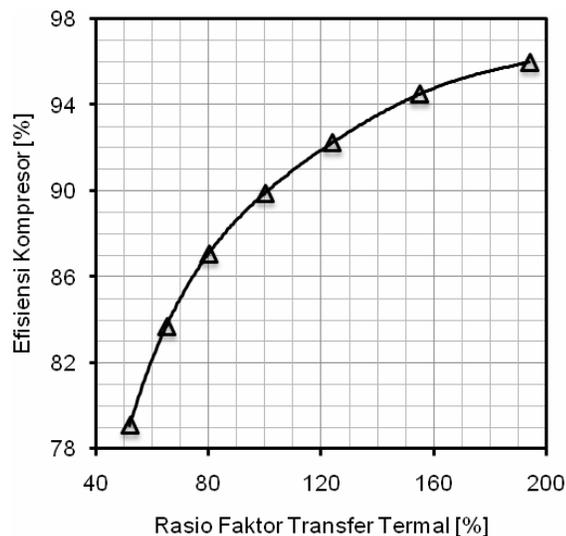
Gambar 8 memperlihatkan pengaruh putaran spesifik poros terhadap koefisien aliran helium melalui sudu kompresor. Diagram ini penting untuk diketahui karena putaran spesifik merupakan parameter tanpa dimensi yang dipakai untuk menentukan efisiensi optimal kompresor aksial *multi-stage* dalam sistem turbin helium RGTT200K. Kurva dalam Gambar 8 diperoleh dari Persamaan (7) pada kondisi putaran poros 3600 rpm dan koefisien aliran bervariasi dari 0,05 hingga 0,6. Kurva ini merupakan batasan operasional kompresor untuk mengantisipasi terjadinya rintangan aliran helium yang terpantul di antara sisi sudu ketika putaran poros berhenti. Dengan menggunakan Persamaan (6), diperoleh nilai efisiensi optimum 90% untuk panjang sudu kompresor 91 mm. Perhitungan efisiensi ini dilakukan pada kondisi koefisien aliran helium sebesar 0,5 dimana nilai putaran spesifik kompresor dapat dilihat pada Gambar 8 yaitu sekitar 0,73.

Kemampuan mentransfer panas melalui rekuperator dipengaruhi oleh faktor transfer termal sebagai fungsi dari luas permukaan dan koefisien perpindahan panas. Penambahan luas permukaan mengakibatkan nilai faktor transfer termal meningkat. Tabel 4 merupakan hasil perhitungan faktor transfer termal dengan menggunakan perangkat lunak *Cycle-Tempo Release 5* pada kondisi putaran poros kompresor 3600 rpm. Daya yang diperlukan oleh kompresor aksial *multi-stage* bervariasi

dengan faktor transfer termal. Perubahan daya ini mengakibatkan performa kompresor berubah. Semakin besar nilai faktor transfer termal, semakin kecil daya yang dibutuhkan oleh kompresor, dan performa kompresor menjadi lebih tinggi. Gambar 9 menunjukkan ketergantungan efisiensi yang dibutuhkan oleh kompresor aksial *multi-stage* terhadap penambahan faktor transfer termal dalam proses rekuperator. Terlihat dari Gambar 9 bahwa kecenderungan garis (*trendline*) mempunyai persamaan logaritmik. Jika ditarik garis dari titik dimana nilai faktor transfer termal 100% hingga memotong kurva, maka diperoleh nilai efisiensi kompresor aksial *multi-stage* 90%. Kenaikkan nilai faktor transfer termal hingga sekitar 200% akan menghasilkan nilai efisiensi kompresor diatas 96%.

Tabel 4. Hasil perhitungan performa kompresor aksial *multi-stage* untuk RGTT200K

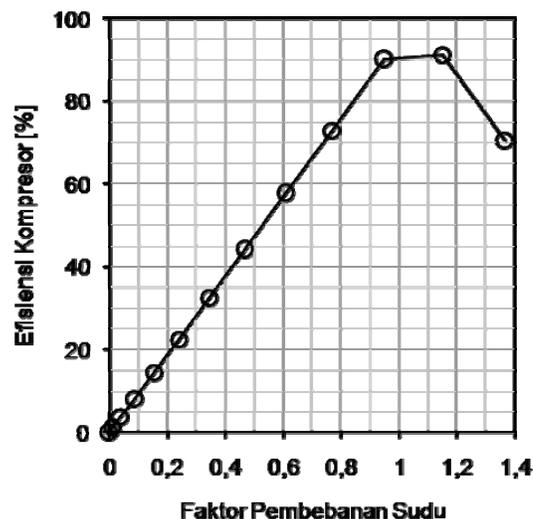
Faktor Transfer Termal	Daya Kompresor [MW]	Efisiensi Kompresor [%]
4259,9	70,4	79
5324,9	66,6	84
6553,7	64	87
8192,1	62	90
10158,2	60,4	92
12697,8	58,9	94
15892,7	58	96



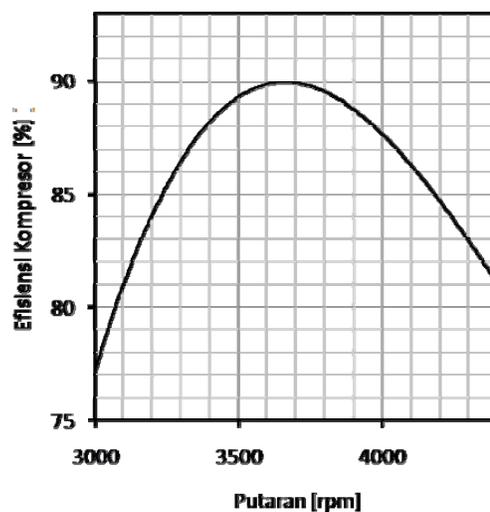
Gambar 9. Pengaruh faktor transfer termal terhadap performa kompresor

Secara analitis, aliran helium melalui kompresor *multi-stage* mempunyai hubungan antara efisiensi dan faktor pembebanan sudu sebagai fungsi dari geometri sudu. Pengaruh faktor pembebanan sudu pada putaran poros 3600 rpm terhadap efisiensi kompresor *multi-stage* terlihat pada Gambar 10. Peningkatan efisiensi kompresor terjadi dengan penambahan faktor pembebanan sudu hingga mencapai nilai 0,95. Pada kisaran nilai faktor pembebanan sudu dari 0,95 hingga 1,15, efisiensi kompresor terlihat seperti garis mendatar dengan nilai konstan. Efisiensi kompresor menurun dengan nilai faktor pembebanan sudu diatas 1,15. Pada titik dimana faktor pembebanan

sudu bernilai 0,95, kompresor mempunyai efisiensi optimal sekitar 90%. Gambar 11 memberikan gambaran bahwa peningkatan efisiensi kompresor aksial *multi-stage* tidak diikuti dengan kenaikan putaran poros. Terlihat bahwa efisiensi kompresor mencapai nilai optimal 90% pada kondisi putaran 3600 rpm. Apabila putaran ditingkatkan, terjadi penurunan efisiensi. Dalam penelitian ini, telah dihitung bahwa sekitar 55% dari daya yang dihasilkan turbin untuk memutar kompresor pada kondisi optimal, sehingga cocok untuk RGTT200K.



Gambar 10. Diagram efisiensi kompresor *versus* faktor pembebanan sudu



Gambar 11. Diagram efisiensi kompresor *multi-stages* sebagai fungsi putaran

KESIMPULAN

Kompresor aksial *multi-stage* untuk RGTT200K didesain 10 tingkat dengan laju aliran massa helium 107 kg/s, rasio kompresi 1,85 dan tekanan keluar 5 MPa serta putaran poros 3600 rpm. Geometri sudu pada setiap tingkat memiliki panjang 91 mm, rasio diameter *hub-tip* 0,85, dan kecepatan 228 m/s. Hasil analisis karakteristik aliran helium secara aksial menunjukkan bahwa

kompresor mempunyai efisiensi optimal 90% sehingga cocok untuk sistem turbin helium pada RGTT200K.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan Penelitian ini merupakan bagian kerja dalam 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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. SHENOY, A., Modular Helium Reactor Design, Technology and Applications, General Atomics, April, 2007.
- [2]. PURWADI, MD., "Desain Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT", Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Surabaya, 28 Juli 2010.
- [3]. _____, Perangkat lunak *Cycle-Tempo Release 5*, Delft University of Technology, 2007.
- [4]. SUDADIYO, S., Analisis Termodinamika Sistem Turbin Helium Untuk Reaktor Daya Nuklir, Prosiding Seminar Nasional PLTN ke 16, 2010.
- [5]. WU, Z., YU, S., HTGR Projects in China, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 39, No.2, pp. 103-110, 2007.
- [6]. YAN, X., KUNITOMI, K., NAKATA, T., SHIOZAWA, S., Design and Development of GTHTR300, Nuclear Engineering and Design, 2002.
- [7]. DIETZEL, F., Turbinen, Pumpen Und Verdichter, Wurzburg, 1980.
- [8]. 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.
- [9]. LOGAN, E.Jr., ROY, R., Handbook of Turbomachinery, 2nd Edition, Marcel Dekker, 2003.
- [10]. DIXON, S.L., Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery, 3rd Edition, 1986.

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Sukmanto Dibyo, PTRKN-BATAN)

- Apakah desain kompresor untuk RGTT yang di kembangkan sudah "proven"?
- Sebelum Bpk melihat R. Daya tetap tinggi di Afrika Selatan ke Korea! Jepang!
- Mengapa acuan RGTT200K adalah riset dari Jepang dan pada bentuk horizontal fokus pada turbin dan kompresor padahal di Afrika Selatan sudah melakukan itu?.

JAWABAN: (Sri Sudadiyo, PTRKN-BATAN)

- Desain kompresor untuk RGTT200K dalam makalah ini masih dalam tahap konseptual. Jadi belum di buat prototipenya dan belum di uji sesuai dengan kondisi operasinya. Akan tetapi,

untuk perhitungan desain dan analisisnya mudah di lakukan sesuai dengan prosedur dalam mendesain kompresor.

- *Saran di terima, kamipun berkeinginan untuk melihat langsung dan mempelajari desain reaktor dan temperatur tinggi dari Afrika Selatan. Hasilnya akan kami bandingkan dengan desain RGTT200K.*
- *Terlepas dari pengembangan reaktor, fokus kami di kompresor.*