

DESAIN KONSEPTUAL SISTEM PEMURNIAN HELIUM PADA RGTT200K UNTUK MENJAMIN KESELAMATAN PENGOPERASIANNYA

Oleh:

Sriyono, Febrianto
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

ABSTRAK

DESAIN KONSEPTUAL SISTEM PEMURNIAN HELIUM PADA RGTT200K UNTUK MENJAMIN KESELAMATAN PENGOPERASIANNYA. Telah dilakukan desain konseptual sistem pemurnian helium pada RGTT200K. RGTT200K adalah reaktor berpendingin gas yang didesain berdaya 200 MW_{th} selain menghasilkan listrik dapat pula untuk kogenerasi. Tujuan desain konseptual sistem pemurnian helium adalah mendapatkan tahapan proses pembersihan sistem pendingin helium dari berbagai pengotor seperti partikulat debu, radionuklida produk fisi, serta gas-gas NO_x, CO₂, CO, H₂O, NO_x, H₂ dan CH₄. Nilai batas konsentrasi pengotor helium pada kondisi operasi normal adalah H₂O ≤ 0,2 cm³.m⁻³, CO ≤ 3 cm³.m⁻³, N₂ ≤ 1 cm³.m⁻³, H₂ ≤ 3 cm³.m⁻³, CH₄ ≤ 1 cm³.m⁻³. Metodologi perancangan yang digunakan berbasis pada berbagai literatur yang melaporkan berbagai pengalaman dalam mendesain sistem pemurnian helium kemudian diadopsi untuk RGTT200K. Ada 4 proses utama dalam sistem pemurnian, yaitu penyaringan dengan filter HEPA, kolom oksidasi CuO, kolom *molecular sieve adsorber*, dan *cryogenic* karbon aktif *adsorber* temperatur rendah. Filter HEPA berfungsi menyaring debu karbon dan radionuklida produk fisi. Kolom oksidasi CuO untuk mengoksidasi gas CO dan H₂ menjadi CO₂ dan H₂O sehingga mampu diserap pada tahapan berikutnya. Kolom *molecular sieve adsorber* berguna untuk menangkap gas NO_x, CO₂, H₂O, CH₄. Dan *cryogenic* karbon aktif *adsorber* digunakan untuk menangkap gas N₂ dan O₂ yang masih lolos dari *molecular sieve*. Dengan empat tahapan proses yang ada maka dapat diketahui bahwa seluruh komponen pengotor dalam pendingin helium sudah *ditreatment* untuk dapat dibersihkan. Gas helium dengan kemurnian tinggi dari hasil purifikasi akan disimpan dalam tangki penyimpanan untuk diumpankan kembali ke sistem primer pada saat dibutuhkan.

Kata kunci : desain, konseptual, sistem, purifikasi, RGTT200K

ABSTRACT

HELIUM PURIFICATION SYSTEM CONCEPTUAL DESIGN FOR RGTT200K TO ENSURE IT'S SAFETY OPERATION. The helium purification system conceptual design of RGTT200K has been done. RGTT200K is a 200 MW_{th}, high temperature gas cooled reactor which is designed not only to generate electricity but also can be for cogeneration. The purpose of helium purification system conceptual design is getting stage to remove the helium coolant from a variety of impurities such as dust particulate, radio nuclide fission products, and also gases as well as NO_x, CO₂, CO, H₂O, NO_x, H₂ and CH₄. The helium impurities concentration limit value under normal operation is H₂O ≤ 0,2 cm³.m⁻³, CO ≤ 3 cm³.m⁻³, N₂ ≤ 1 cm³.m⁻³, H₂ ≤ 3 cm³.m⁻³, CH₄ ≤ 1 cm³.m⁻³. The methodology design which is used based on the literature that has been reported the experience in designing helium purification system and will be adopted for RGTT200K. There are 4 main processes in the helium purification system, namely: filtration with HEPA filters, CuO oxidation column, the molecular sieve column adsorber, cryogenic activated carbon adsorber at low temperature. HEPA filter function to filter carbon dust and fission product radio nuclides. CuO oxidation column to oxidize CO and H₂ gas into CO₂ and H₂O to be able to be adsorbed at a later stage. Molecular sieve column is useful for capturing NO_x, CO₂, H₂O, CH₄ gas. And cryogenic active carbon adsorber is used to capture the N₂ and O₂ gases which are still escaped from molecular sieve. By using four stages of the established process, all of helium impurities have been treated to be cleaned. High purity helium which results from the purification system will be stored in the storage tank and will feed back to primary coolant when needed.

Keywords : conceptual, design, purification, system, RGTT200K

PENDAHULUAN

Reaktor Berpendingin Gas Temperatur Tinggi 200 MW_{th} Kogenerasi (RGTT200K) adalah reaktor generasi lanjut yang didesain menggunakan gas helium sebagai pendingin. Reaktor ini direncanakan berdaya 200 MW_{th}, berguna selain mendapatkan listrik dapat pula digunakan untuk kogenerasi sebagai sumber panas dalam proses produksi hidrogen, desalinasi, EOR (*Enhanced Oil Recovery*) serta gasifikasi/ liquifaksi batu bara. RGTT200K akan menggunakan bahan bakar berbentuk *pebble* dengan siklus tidak langsung^[1] Gas helium memiliki banyak kelebihan antara lain: bersifat *inert*, yaitu tidak mudah bereaksi dengan senyawa-senyawa lain, memiliki kapasitas panas tinggi, tidak mudah terdekomposisi secara termal, mempunyai tampang lintang serapan neutron rendah, tidak mudah teraktivasi oleh neutron, dan mudah dimurnikan. Gas helium masuk ke teras RGTT diasumsikan mengandung air dan atau *steam* yang dimungkinkan berasal dari kebocoran pipa (*air ingress*) pada saat operasi tak normal dan juga dimungkinkan adanya tumpahan minyak atau air sewaktu proses konstruksi^[2,3]. Senyawa H₂O yang masuk ke teras akan bereaksi dengan grafit sehingga membentuk gas pengotor antara lain adalah H₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂, N₂ dan O₂. Konsentrasi pengotor pada pendingin helium harus dijaga agar tidak melebihi konsentrasi tertentu. Nilai-nilai batas pada kondisi normal operasi adalah H₂O ≤ 0,2 cm³.m⁻³, CO ≤ 3 cm³.m⁻³, N₂ ≤ 1 cm³.m⁻³, H₂ ≤ 3 cm³.m⁻³, CH₄ ≤ 1 cm³.m⁻³.^[2,3]

Pada kajian sebelumnya telah diketahui

pengaruh pengotor terhadap material dan struktur RGTT. Pengotor pendingin helium dikategorikan menjadi dua macam, yaitu pengotor berbentuk partikulat (debu karbon dan produk fisi), dan pengotor berbentuk gas. Debu karbon yang terbawa dalam aliran pada umumnya bercampur dengan produk fisi, akan menempel pada permukaan material sehingga mempengaruhi nilai koefisien perpindahan panas dan meningkatkan dosis paparan radiasi ke pekerja. Pengotor berbentuk gas akan berdampak pada ketahanan material karena memicu terjadinya proses korosi oksidasi dan karburisasi-dekarburisasi. Proses korosi oksidasi disebabkan karena konsentrasi oksigen dalam pengotor, sedangkan karburisasi-dekarburisasi disebabkan karena perbedaan konsentrasi karbon dalam material dan struktur pendingin. Kedua proses ini menyebabkan degradasi material. Degradasi material ini harus diantisipasi untuk menjamin keselamatan pengoperasian RGTT sehingga semua pengotor harus dalam batas minimal. Salah satu cara untuk memurnikan gas helium dalam aliran pendingin adalah dengan sistem purifikasi. Sistem purifikasi ini akan terdiri dari beberapa tahapan sehingga diperlukan rancangan proses yang memadai. Perancangan proses pemurnian helium akan dilakukan secara konseptual. Tujuan desain konseptual sistem pemurnian helium adalah mendapatkan tahapan-tahapan proses sehingga mampu membersihkan sistem pendingin helium dari berbagai pengotor yang ada.

Untuk mendapatkan desain yang handal maka digunakan metodologi kajian dari

beberapa literatur yang telah dipublikasi, melaporkan berbagai pengalaman pengoperasian RGTT di dunia khususnya tentang desain sistem pemurnian helium. Karakteristik dari setiap tahapan proses purifikasi akan dianalisis dan dijelaskan secara lebih detil dalam makalah ini.

METODOLOGI

Desain konseptual sistem pemurnian helium terdiri dari 4 proses utama, yaitu penyaringan dengan filter HEPA, kolom oksidasi CuO, kolom *molecular sieve adsorber*, dan *cryogenic* karbon aktif *adsorber* temperatur rendah. Keempat proses ini mengacu pada berbagai pengalaman pengoperasian HTR-10 Cina (berbahan bakar *pebble*), HTTR Jepang (berbahan bakar prismatik), ataupun eksperimen laboratorium yang dilakukan oleh peneliti Laboratorium AREVA Perancis dalam memurnikan helium. Tahapan proses pemurnian helium tersebut akan digunakan sebagai referensi dalam mendesain sistem purifikasi RGTT200K. Selanjutnya tahapan-tahapan proses ini akan digambar dalam *flowsheet* diagram, kemudian dianalisis kinetika dan fenomena pengambilan pengotornya sehingga didapatkan helium murni.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengotor gas helium pada sistem pendingin RGTT dapat dikategorikan dalam 2 kategori yaitu pengotor berbentuk partikel (berbentuk debu karbon dan radionuklida produk fisi), dan pengotor berbentuk gas. Pengotor debu karbon banyak terjadi pada RGTT tipe *pebble* sedangkan pada bentuk prismatik relatif sedikit.

Hal ini dikarenakan pada bentuk prismatik gesekan antar bahan bakar cenderung minimal atau tidak ada. Pengotor berbentuk partikel radionuklida adalah berasal dari produk fisi dari teras yang terbawa aliran pendingin helium. Produk fisi ini antara lain adalah : Xe, Kr, I, Ag, Cs, Co dll. Jumlah dan konsentrasi produk fisi ini sangat bervariasi tergantung pada keandalan matriks bahan bakar dan umur reaktor. Pada prinsipnya bahwa untuk menjamin keselamatan pengoperasian RGTT, maka besar radioaktifitas yang terpancar ke pekerja atau ke lingkungan selalu dipantau dalam rentang batas aman buat pekerja dan masyarakat luas. ^[4,5,6]

Pengotor berbentuk gas yang terbawa dalam aliran helium dapat terjadi dari berbagai sumber antara lain :

- Proses *degassing* dari reflektor grafit, menghasilkan pengotor: CO, CO₂, H₂O, H₂ dan N₂
- Proses *loading* dan *unloading* bahan bakar, menghasilkan pengotor: CO, CO₂, H₂O, H₂ dan CH₄
- Proses *welding* dan penyambungan sistem pemipaan pada saat perawatan, menghasilkan pengotor O₂, N₂
- Proses *degassing* dari dalam struktur logam, akan menghasilkan pengotor O₂, H₂O, H₂ dan N₂
- Proses *degassing* insulator thermal akan menghasilkan O₂, CO₂, H₂O, dan N₂

Gas-gas pengotor ini harus dihilangkan dalam aliran pendingin karena memicu terjadinya proses korosi oksidasi dan karburisasi-dekarburisasi.

Untuk menjamin keselamatan dan keandalan material dan struktur RGTT terhadap adanya ancaman gas-gas pengotor maka konsentrasi pengotor di dalam aliran pendingin helium harus dikendalikan pada tingkat yang serendah mungkin atau dalam batas aman.

Berdasarkan berbagai pengalaman pengoperasian HTGR di dunia seperti AVR, HTR-10 China, HTTR Jepang, *Peach Bottom* dan *Fort St. Vrain* USA, konsentrasi gas-gas pengotor helium sangat bervariasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai-nilai konsentrasi gas-gas pengotor untuk setiap jenis reaktor sangat bervariasi, tergantung dengan tipe bahan bakar dan siklus sistem konversi energi yang digunakan.

Tabel 1. Konsentrasi pengotor gas helium dari berbagai pengalaman pengoperasian RGTT^[7,8]

Nama Reaktor	Komposisi dan konsentrasi pengotor gas helium (cm ³ .m ⁻³)					
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	N ₂
DRAGON, United Kingdom (UK), 1964-1975	2	1,2	0,3	<0,04	0,1	2
Peach Bottom, USA, 1967-1974	10	0,5	1,0	<0,5	-0,5	10
AVR, FRG, Germany, (1967-88)	30	10	-	10	3	30
Fort St. Vrain, USA (1976-1979)	2-7	1-10	0,1-0,8	0,5-3	<1	2-7
HTTR, Japan (1998-sekarang)	<3,0	<3,0	<0,5	<0,6	<0,2	<3,0

Persyaratan lain yang harus diperhatikan dalam mendesain sistem pemurnian adalah nilai batas aman untuk mencegah terjadinya serangan korosi terhadap material. Serangan korosi yang umum terjadi adalah adanya proses karburisasi-dekarburisasi dan proses oksidasi.

Proses oksidasi dipengaruhi adanya aktivitas oksigen dalam pendingin sedangkan proses karburisasi-dekarburisasi sangat dipengaruhi oleh adanya aktivitas karbon dalam pendingin.

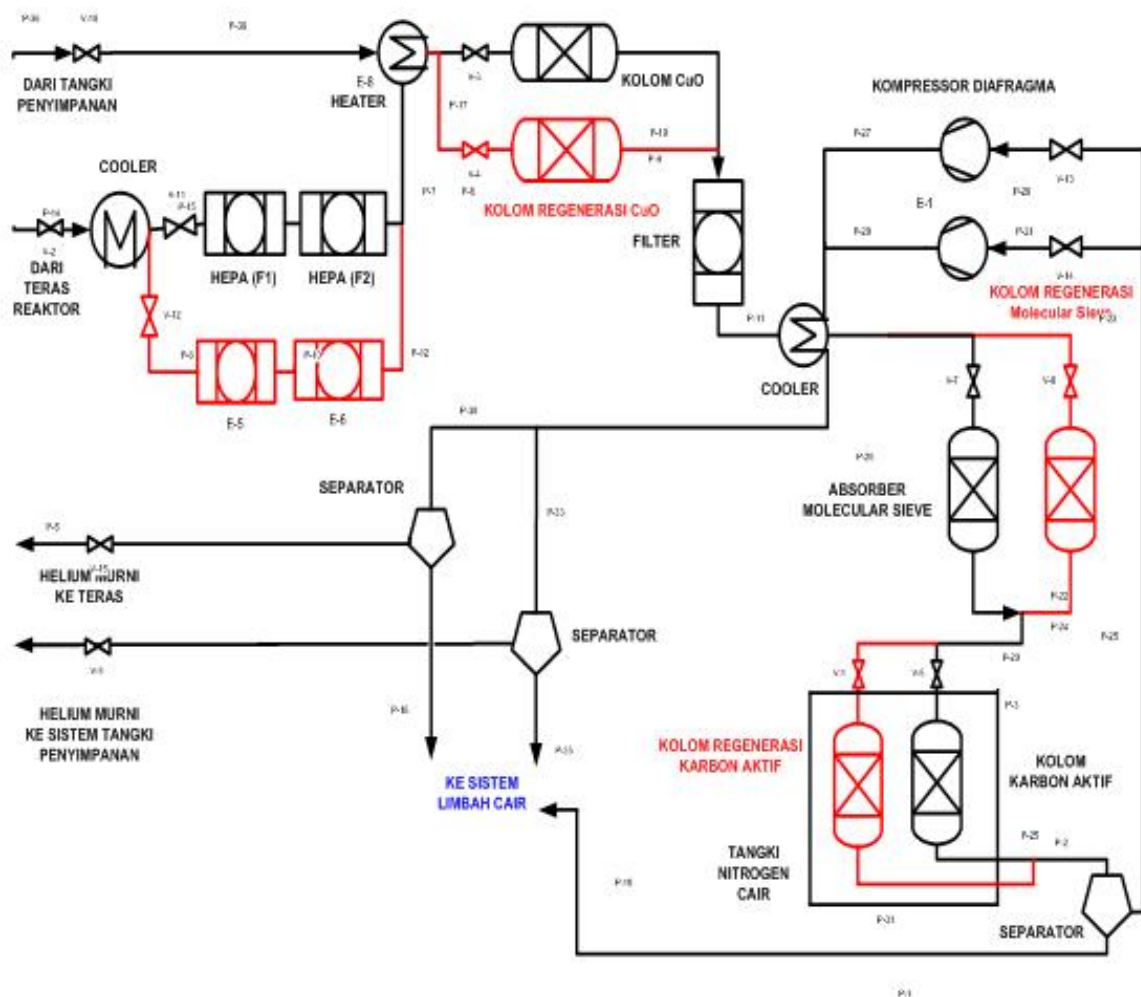
Sebagai contoh misalnya untuk menentukan lapisan oksida sebagai proteksi permukaan material yang mengandung CrO_3 dalam komposisi materialnya; maka kondisi yang harus dijaga adalah nilai aktivitas oksigen (a_{O_2}) dan rasio hidrogen dan tekanan parsial karbon dalam pendingin. Seperti ditunjukkan Tabel 2.

Desain Konseptual Sistem Pemurnian Helium

Berdasarkan pengalaman HTR-10 Cina, HTTR Jepang, dan beberapa literatur yang mendesain sistem pemurnian helium, maka garis besar desain konseptual sistem pemurnian

helium yang diadopsi RGTT200K seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem pemurnian helium ini, akan mengambil aliran pendingin utama yang berasal dari teras reaktor. Kapasitas aliran yang diambil sekitar 10% dari aliran utama. Temperatur aliran adalah sekitar 120°C dan tekanan sekitar 5 bar.

Temperatur	Nilai a_{O_2}	Nilai $\frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2}}$	Nilai P_{CO}
950°C	$> 2 \cdot 10^{-23}$ μbar	10^{-4}	> 150 μbar
1000°C	$> 10^{-21}$ μbar	10^{-4}	> 500 μbar



Gambar 1. Desain Konseptual Sistem Pemurnian Helium

Ada 4 macam proses utama dalam desain pemurnian helium, yaitu :

- Proses penyaringan partikel debu atau radionuklida produk fisi dengan menggunakan filter HEPA
- Proses oksidasi pengotor gas CO dan H₂ menggunakan oksidator CuO
- Proses penangkapan gas pengotor menggunakan molecular sieve
- Proses pengembunan gas pengotor N₂ dan O₂ dengan menggunakan *adsorber* karbon aktif temperatur rendah (*cryogenic adsorber*)

Proses Penyaringan dengan Filter HEPA^[10]

Tahapan pertama pada sistem pemurnian helium adalah melakukan filtering gas helium dengan HEPA (*High Efficiency Particulate Air Filter*). Pada tahap ini partikulat berbentuk debu karbon ataupun radionuklida produk fisi yang berasal dari teras reaktor disaring. Jumlah dan kualitas debu karbon pada desain RGTT sangat tergantung dengan tipe bahan bakar yang dipakai. Untuk bahan bakar RGTT yang menggunakan bahan bakar *pebble*, jumlah debu dalam aliran pendingin lebih banyak daripada desain prismatik. Radionuklida produk fisi akan terbawa di dalam aliran pendingin bercampur dengan debu atau pengotor lain, radionuklida dimungkinkan akan terdeposisi pada permukaan pipa/struktur melalui mekanisme sorpsi atau kondensasi. Berdasarkan pengalaman pengoperasian HTR yang ada di dunia, ada 4 jenis debu karbon yang timbul dalam sistem pendingin. Sumber-sumber debu ini antara lain :

Debu grafit yang berasal dari mekanisme proses mekanikal di teras, yaitu gesekan antar bahan bakar *pebble* atau pelepasan debu karbon ketika terjadi insersi batang kendali. Hal ini terjadi pada desain AVR, Jerman. Dalam AVR, dengan belum adanya desain sistem *dust removal*, pada akhir masa beroperasinya ditemukan 50-60 kg debu karbon, dan diperkirakan debu karbon yang terjadi adalah 5 kg/th^[6,7,8].

Debu karbon dari proses dekomposisi hidrokarbon (kontaminasi minyak), minyak yang tumpah pada saat proses konstruksi atau proses perawatan struktur maupun komponen reaktor seperti pipa, pompa ataupun kompressor.

Debu karbon yang ditimbulkan dari proses dekarburisasi paduan baja, proses ini terjadi karena adanya pelepasan debu karbon ke sistem pendingin akibat perbedaan konsentrasi karbon material pendingin dengan konsentrasi karbon yang terbawa pada aliran pendingin helium.

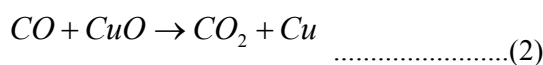
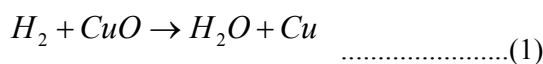
Debu grafit dari teras yang dihasilkan baik dari pengisi (*filler*) untuk kemurnian tinggi grafit dan pengikat (*binder*) grafit. Pengikat ini akan mengakibatkan grafit yang digunakan kurang murni dan mempunyai sifat yang lebih reaktif. Berdasarkan standar ASME 2005, bahwa spesifikasi *filler* dan *binder* untuk grafit *nuclear grade* ukuran partikelnya antara 1,68-4 mikrometer.

Filter HEPA, yang digunakan pada proses penyaringan partikulat pada desain sistem pemurnian helium disusun dengan berjenjang (*stage*). Hal ini agar efisiensi pengambilan debu tinggi dan mencegah frekuensi penggantian filter yang tinggi pula.

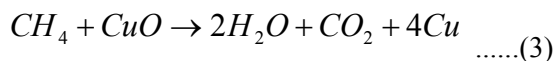
Jenjang pertama mempunyai ukuran porositas 0,5 mikron, sehingga 99% partikulat debu karbon berukuran lebih besar 0,5 mikron akan tertangkap.^[10] Jenjang kedua, adalah dengan ukuran porositas 0,1 mikron, sehingga dengan demikian dapat diperkirakan hampir semua debu karbon yang terbawa dalam aliran akan tertangkap.

Proses Oksidasi CO dan H₂ dengan CuO (Copper Oxide)^[2]

Tahap kedua, dalam sistem pemurnian helium adalah melakukan oksidasi gas pengotor CO dan H₂. Kedua gas ini diolah lebih awal, dikarenakan bahwa kedua gas ini akan sulit untuk ditangkap baik dengan *molecular sieve* ataupun *cryogenic adsorber*. Proses oksidasi kedua pengotor ini dilakukan pada temperatur 350°C dan tekanan 5 Mpa, sehingga dibutuhkan pemanas (*heater*) untuk mencapainya. Hal ini dikarenakan temperatur gas helium keluar dari filter HEPA adalah 120-130°C. Persamaan reaksi gas pengotor CO dan H₂ dengan oksidator CuO seperti adalah sebagai berikut :



Gas metana (CH₄) dalam pengotor akan bereaksi pula menjadi :



Dari ketiga persamaan reaksi ini, maka akan terjadi penambahan gas CO₂ dan H₂O pada aliran pendingin helium yang dimurnikan.

Proses Adsorpsi dengan *Molecular Sieve*

Tahapan ketiga dari proses pemurnian helium adalah penangkapan gas pengotor dengan menggunakan *molecular sieve*.

Molecular sieve yang umum digunakan adalah Zeolithe. Gas pengotor yang dapat ditangkap dengan Zeolithe adalah NO_x, CO₂, H₂O, CH₄. Spesifikasi Zeolithe yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Zeolithe mampu bekerja secara maksimum jika beroperasi dalam temperatur kamar. Oleh sebab itu, gas helium sebelum masuk ke kolom *molecular sieve* harus diturunkan temperaturnya menggunakan *Cooler*.

Pada desain *molecular sieve* ini, biasanya kolom dibuat menjadi 2 macam, kolom pertama untuk kolom adsorpsi (penyerapan) sedangkan kolom ke dua digunakan untuk regenerasi. Proses ini dilakukan secara bergantian. Proses regenerasi sangat dibutuhkan untuk membersihkan kembali Zeolithe dari gas pengotor yang ditangkap sehingga dapat digunakan kembali.

Pada proses adsorpsi ini tidak semua gas pengotor dapat diserap, melainkan masih ada kemungkinan gas N₂ dan O₂ yang terlepas. Kedua gas ini akan ditangkap menggunakan *Activated Carbon Bed*.

Tabel 3. Spesifikasi Zeolithe^[2]

Volume jenis/spesifik pori-pori	0,3 cm ³ /g
Diameter rata-rata pori-pori	5 Å
Ukuran partikel	1,6 mm
Luas permukaan spesifik	700 – 800 m ² /g
Porositas internal	50%
Densitas Zeolithe	700 kg/m ³

Pada tahapan proses ini kolom karbon aktif pada bagian luarnya disirkulasi dengan nitrogen cair untuk menjaga temperatur rendah yang diinginkan. Gas N₂ dan O₂ akan terserap ke dalam karbon aktif, dan apabila sudah mencapai kejenuhan maka karbon aktif ini akan diregenerasi. Pada proses ini akan didesain 2 kolom, satu kolom untuk penyerapan, dan satu kolom untuk regenerasi. Proses ini akan dilakukan secara bergantian. Proses regenerasi

dilakukan dengan cara mengeluarkan helium dari kolom menggunakan pompa vacuum. Setelah itu, karbon aktif dipanaskan dengan menggunakan heater sehingga mencapai temperatur 150°C untuk membersihkan gas-gas N₂ dan O₂ yang ditangkapnya. Salah satu spesifikasi karbon aktif yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi karbon aktif pada proses *cryogenic*

Volume jenis/spesifik pori-pori	0,6 cm ³ /g
Diameter pori-pori rata-rata	24 Å
Ukuran partikel	2 mm atau 5 mm
Luas permukaan spesifik	1100 m ² /g
Porositas internal	55% - 75%
Densitas Karbon Aktif	450 kg/m ³

KESIMPULAN

Desain konseptual sistem pemurnian helium pada RGTT200K telah dibuat. Desain ini berbasis pada pengalaman negara maju dan terdiri dari 4 proses utama yaitu proses penyaringan partikel menggunakan filter HEPA, proses oksidasi pengotor gas CO dan H₂ menggunakan oksidator CuO, proses penangkapan gas pengotor menggunakan *molecular sieve*, proses pengembunan gas pengotor menggunakan karbon aktif *adsorber* temperatur rendah (*cryogenic activated carbon adsorber*). Berdasarkan analisis kinetika proses pengambilan pengotor pada setiap tahapan, keempat proses ini telah mampu mengolah semua komponen pengotor yang mungkin terbawa dalam aliran pendingin helium. Setelah

melalui proses purifikasi, akhirnya didapatkan helium bersih untuk dapat disimpan dalam tangki penyimpanan atau diumpankan kembali ke teras reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

1. DHANDHANG P,M., “Desain Konseptual Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT”, Prosiding Seminar TKPFN-16, ITS Surabaya, 2010
2. LEGROS, F., LIGER K, et.al., “Helium Purification at Laboratory Scale”, Proceedings HTR2006, 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, October 1-4, 2006, Johannesburg, South Africa
3. GASTALDI, O., LIGER K., et.al.,”Helium Purification”, 3rd International Topical

- Meeting on High Temperature Reactor Technology, October 1-4, 2006, Johannesburg, South Africa
4. VERKERK E.C., "Helium Storage and Control System For PBMR", Integrators of System Technology, Waterkloof, South Africa, 2006
 5. KEMMISH W.B., M.V. et al. "Gas Cooled Fast Reactor, Progress in Nuclear Energy", Vol. 10, No.1, (1983)
 6. KATSCHER W., MOORMANN R, et.al., "Fission Product And Graphite Corrosion Under Accident Conditions in The HTR", Nuclear Engineering and Design 219-225, North Holland, 1990
 7. JOHNSON, WR et.al, "Interaction of Metals with Primary Coolant Impurities: Comparison of Steam-Cycle and Advanced HTGRs" in Specialist Meeting on High Temperature Metallic Materials for Application in Gas Cooled Reactors, (1981)
 8. NATESAN K., A., PUROHIT, S.W. TAN, "Material Behavior in HTGR Environments", Argonne National Laboratory, NUREG/CR-6824 ANL-0237, (2003)
 9. KISSANE MP, "A Review of Radionuclide Behavior in the Primary System of a Very High Temperature Reactor", Institut de Radioprotection et de Strete Nucleaire, IRSN/DPAM/SEMIC, Saint Paul Les Durance Cedex, France, 2005
 10. ASME AG-2005, "High Efficiency Particulate Air Filter (HEPA), USA, 200