

UNJUK KERJA KARBON AKTIF TERHADAP PENYERAPAN PENGOTOR N₂ DAN O₂ PADA SISTEM PEMURNIAN HELIUM RGTT200K

Itjeu Karliana, Sriyono, Sumijanto, Rahayu Kusumastuti, Arifal

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN)-BATAN, Gd. 80, Kawasan
PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan, BANTEN, 15310
e-mail: itjeu@batan.go.id

ABSTRAK

UNJUK KERJA KARBON AKTIF TERHADAP PENYERAPAN PENGOTOR N₂ DAN O₂ PADA SISTEM PEMURNIAN HELIUM RGTT200K. RGTT200K adalah Reaktor Gas Temperatur Tinggi 200MWth Kogenerasi. RGTT200K menggunakan gas helium sebagai pendingin dan kemurnian helium harus selalu dijaga dari pengotor berbentuk partikel padat dan gas. Untuk menjamin kemurnian helium, RGTT200K dilengkapi dengan sistem pemurnian helium (SPH). Ada 4 tahapan proses pada sistem pemurnian helium, yaitu penyaringan partikulat padat, oksidasi gas pengotor, penyaringan molekuler, dan adsorpsi kriogenik. Dalam makalah ini dianalisis daya serap Karbon Aktif yang bertujuan untuk mengetahui waktu regenerasinya terhadap gas pengotor N₂ dan O₂ pada temperatur kriogenik (-1800C). Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ChemCAD. Jenis Karbon Aktif yang digunakan adalah *micropores* dengan porositas 0,7Å . Spesifikasi bed Karbon Aktif yang dimodelkan mempunyai densitas 2000 kg/m³, diameter bed 0,1667 m, tinggi bed 15 m, dengan total massa Karbon Aktif 654,16 kg. Berdasarkan simulasi diketahui bahwa waktu regenerasi Karbon Aktif adalah 1591 hari pada kondisi operasi normal RGTT200K. Karbon Aktif selanjutnya perlu diregenerasi dengan menaikkan temperatur dari kriogenik menjadi temperatur kamar untuk dapat dipakai ulang pada siklus berikutnya.

Kata kunci :unjuk kerja, Karbon Aktif, pengotor, Pemurnian Helium, RGTT200K

ABSTRACT

THE ACTIVE CARBON PERFORMANCE TO N₂ AND O₂ IMPURITIES ADSORPTION ON RGTT200K HELIUM PURIFICATION SYSTEM. RGTT200K is a High Temperature Gas cooled Reactor 200MWth Cogeneration. RGTT200K uses helium as a coolant and helium purity must be maintained from the solid and gas impurities. To ensure the purity of helium, RGTT200K is equipped with a helium purification system (HPS). There are 4 stages in the helium purification system, i.e. solid particulate filtration, oxidation gas impurities, molecular sieve adsorption, and cryogenic adsorption. This paper analyzed the activated carbon adsorption capacity to determine the regeneration time of N₂ and O₂ impurities at cryogenic temperatures (-1800C). Analysis were performed using the ChemCAD computer code. Micropores active carbon type with 0,7Å porosity is used in this model. Active carbon bed specifications are density of 2,000 kg/m³, 0.1667 m of bed diameter, bed height is 15 m, with a total mass is 654.16 kg. Based on the simulation, it has shown that regeneration time is 1591 days after its normal operation. Active carbon is regenerated by increasing temperature from cryogenic to ambient to be reused in the next cycle.

Keywords :Performance, Active Carbon, impurities, helium purification, RGTT200K

PENDAHULUAN

RGTT200K adalah reaktor berpendingin gas temperatur tinggi yang dikembangkan dan didesain PTRKN-BATAN dalam rangka memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat[1]. Sebagai pendingin reaktor digunakanlah gas helium dengan kemurnian tinggi karena helium mampu menyerap energi panas dalam teras reaktor (*reactor core*) untuk disalurkan sebagai pembangkit tenaga turbin. Selain itu, RGTT200K dapat pula dikogenerasi sebagai penyedia panas untuk proses produksi hidrogen ataupun desalinasi.

Untuk menjamin bahwa helium bersih dari pengotor, maka pada Sistem Pendingin RGTT200K, didesain Sistem Pemurnian Helium. Dalam sistem ini terdapat 4 tahapan proses pembersihan pengotor yaitu penyaringan dengan filter HEPA, oksidasi dengan oksidator CuO, adsorpsi gas pengotor dengan

kolom *Molecular Sieve adsorber*, dan adsorpsi dengan Karbon Aktif pada kondisi temperatur sangat rendah (kriogenik). 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, sedangkan kriogenik Karbon Aktif *adsorber* digunakan untuk menangkap gas N₂ dan O₂ yang masih lolos dari *Molecular Sieve*. [2]

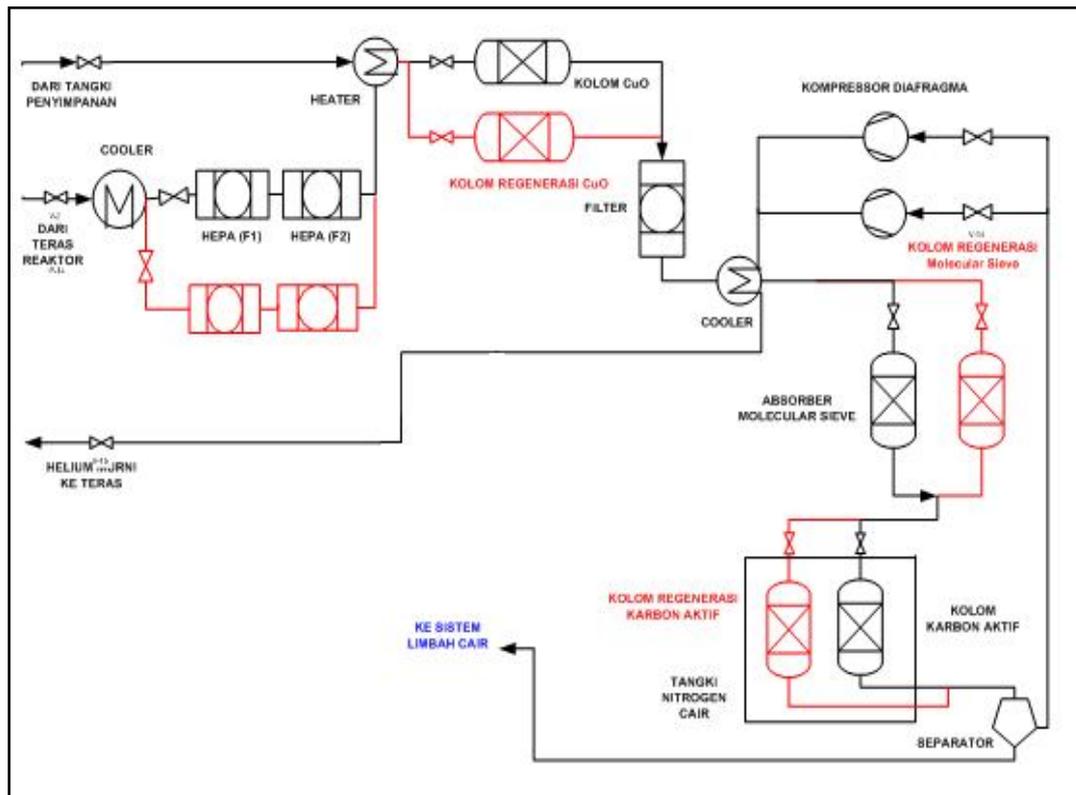
Proses adsorpsi pengotor N₂ dan O₂ dengan menggunakan Karbon Aktif adalah proses terakhir pada Sistem Pemurnian Helium. Batasan maksimal konsentrasi N₂ dan O₂ yang diperbolehkan dalam aliran pendingin adalah masing-masing 0,2 ppmV dan 0,02 ppmV [2,3]. Unjuk kerja/kinerja bed Karbon Aktif ditentukan oleh banyak faktor, antara lain temperatur, tekanan, densitas karbon, porositas, waktu kontak, waktu regenerasi, daya serap, dll. Makalah ini membahas unjuk kerja adsorben Karbon Aktif terutama kemampuan daya serap Karbon Aktif dan bertujuan untuk mengetahui waktu regenerasi nya. Karbon Aktif dimodelkan dengan paket program *ChemCAD* dengan menggunakan unit operasi GA (*Gas Adsorption*). Tipe Karbon Aktif yang digunakan diasumsikan adalah jenis *micropores* dengan porositas 0,7Å. Daya serap Karbon Aktif ditentukan berdasarkan konsentrasi pengotor yang terserap. Sedangkan waktu regenerasi ditentukan berdasarkan nilai konsentrasi pengotor baik N₂ ataupun O₂ pada aliran bersih. Waktu regenerasi adalah waktu dimana nilai konsentrasi pengotor pada aliran bersih sama dengan batas maksimum yang diperbolehkan pengotor dalam pendingin.

LANDASAN TEORI

Sistem Pemurnian Helium Pendingin RGTT200K

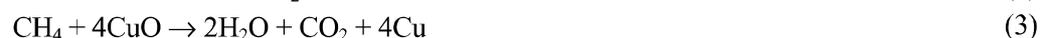
RGTT200K menggunakan siklus langsung (*direct cycle*), aliran pendingin helium mengambil panas dari teras reaktor kemudian panasnya dapat dimanfaatkan sebagai pendukung proses produksi hidrogen, pembangkit listrik dan desalinasi. Aliran ini mempunyai laju sebesar 120 kg/detik, dengan temperatur keluar teras 950°C dan tekanan 5MPa [1,2]. Aliran pendingin helium dimurnikan dengan Sistem Pemurnian Helium (SPH), mengambil sebagian (1%) aliran pendingin utama. Temperatur aliran adalah sekitar 114°C dan tekanan masuk ke SPH 5 MPa. Konsep Sistem Pemurnian Helium ditunjukkan pada Gambar 1 [2]. Disain konseptual Sistem Pemurnian Helium pada RGTT200K meliputi proses-proses sebagai berikut:

- Proses filtrasi partikulat padat. Filtrasi partikulat padat yang terkandung dalam helium pendingin primer dilakukan sebelum masuk ke reaktor CuO, menggunakan filter HEPA khusus (*High efficiency Particulate Air*) pada kondisi temperatur 140°C, dan tekanan 5 MPa [2]. Sebelum aliran masuk ke filter HEPA, maka untuk memisahkan debu berukuran besar dan kecil digunakan *Cyclone Separator*



Gambar 1. Disain Konseptual Sistem Pemurnian Helium RGTT200K[2]

- Reaktor/kolom oksidator CuO: Karena pengotor gas H₂ dan CO sulit untuk diserap baik oleh penyaring molekuler ataupun Karbon Aktif maka tahapan selanjutnya adalah mengkonversi gas H₂ dan CO menjadi H₂O dan CO₂ melalui kolom oksidator CuO (reaktor CuO) pada temperatur 350°C. Dalam proses ini CH₄ juga akan mengalami oksidasi menghasilkan H₂O dan CO₂ berdasarkan reaksi sbb :



Dengan demikian maka seluruh spesi yang sulit untuk diserap dapat dihilangkan. Jika oksidator jenuh maka dilakukan regenerasi menggunakan Oksigen pada suhu 300°C[3,4]

- Adsorpsi dengan *Molecular Sieve*. Setelah proses konversi gas H₂ dan CO menjadi H₂O dan CO₂ dilakukan maka selanjutnya gas helium pendingin primer dilewatkan melalui kolom penyaring molekuler (*Molecular Sieve*) yang beroperasi pada temperatur kamar (30°C) dan tekanan tertentu. Pada kolom ini akan terjadi adsorpsi gas CO₂, dan H₂O.
- Adsorpsi dengan Karbon Aktif pada kondisi kriogenik. Proses selanjutnya adalah dilakukan adsorpsi pada kondisi kriogenik (temperatur sangat rendah -180 °C) menggunakan Karbon Aktif untuk menyerap gas Oksigen (O₂), Nitrogen (N₂), dan seluruh spesi gas sisa yang tidak terserap oleh penyaring molekuler. Kondisi temperatur yang sangat rendah bertujuan untuk meningkatkan kapasitas serapan. Namun dalam proses ini tidak diperbolehkan ada air karena air akan membeku dan menutup kolom sehingga sebelum masuk ke kolom kriogenik Karbon Aktif harus ditambahkan komponen kondensator/separator uap air. Regenerasi Karbon Aktif dilakukan dengan memanaskan Karbon Aktif jenuh pada temperatur 150°C dan tekanan 10 – 20 kPa sehingga pengotor yang terikat terdesorpsi kembali[5].

Dengan pertimbangan bahwa proses operasi purifikasi tersebut berada pada berbagai kondisi temperatur yang berbeda-beda, maka Sistem Pemurnian Helium didisain dengan tambahan berbagai komponen seperti : *heater*, penukar panas, *cooler*, kompresor dan ekonomiser yang diatur konfigurasinya sedemikian sehingga dapat mengoptimalkan biaya operasi sistem.

Proses Adsorpsi dengan Karbon Aktif

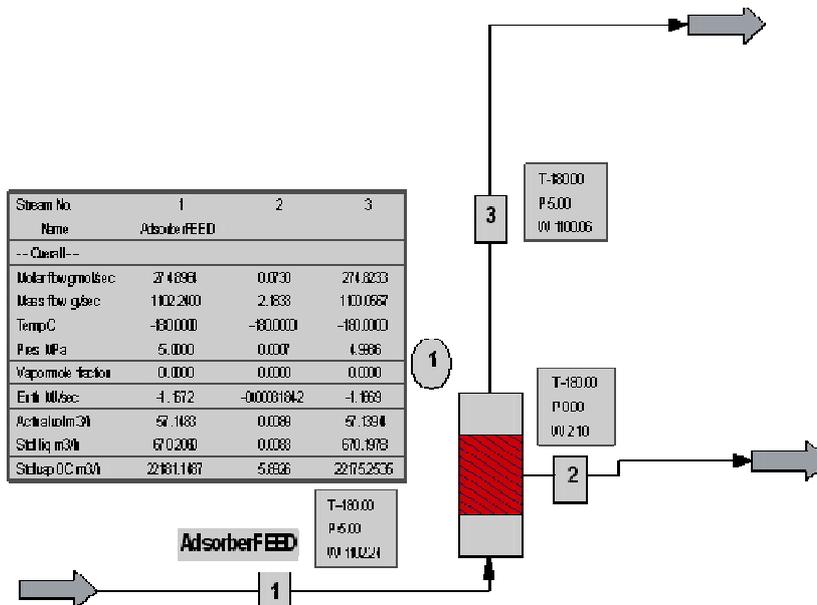
Adsorpsi adalah proses pengikatan bahan pada permukaan sorben padat dengan cara pelekatan, di mana adsorpsi memisahkan bahan dari campuran gas atau cair, bahan yang harus dipisahkan ditarik oleh permukaan tersebut. Kinetika adsorpsi menyatakan adanya proses penyerapan suatu zat padat karena adanya gaya tarik atom atau molekul pada permukaan zat padat. Molekul-molekul pada permukaan zat padat atau zat cair, mempunyai gaya tarik ke arah dalam, karena tidak ada gaya-gaya lain yang mengimbangi. Adanya gaya-gaya ini menyebabkan zat padat dan zat cair, mempunyai gaya adsorpsi. Peristiwa adsorpsi disebabkan oleh gaya tarik molekul-molekul di permukaan adsorben. Hubungan antara jumlah massa zat teradsorpsi oleh Karbon Aktif per satuan massa Karbon Aktif dengan konsentrasi adsorbat secara empirik ditunjukkan oleh persamaan *Freundlich*[6].

$$x = k C^n \quad (4)$$

dengan : x : jumlah massa zat yang teradsorpsi (mol), m : jumlah massa Karbon Aktif (g), C : konsentrasi adsorbat pada keadaan kesetimbangan (mol/l), k, n : konstanta.

METODOLOGI

Pemodelan Karbon Aktif telah dilakukan menggunakan perangkat lunak ChemCAD^[7]. Hasil pemodelan Karbon Aktif ditunjukkan pada Gambar 2. Unit operasi yang digunakan adalah unit GA (*Gas Adsorption*). Terdapat 3 aliran dalam unit ini yaitu aliran input (*stream-1*), aliran gas terserap (*stream-2*), dan aliran gas bersih (*stream-3*). Pada aliran input, diberikan aliran helium yang mengandung pengotor N_2 dan O_2 . Dalam Sistem Pemurnian Helium aliran ini berasal dari *output* proses *Molecular Sieve*.



Gambar 2. Diagram Alir Adsorpsi Kriogenik gas pengotor N_2 dan O_2

Parameter-parameter yang digunakan dalam unit adsorpsi pada *stream-1* ditunjukkan pada Tabel 1. Parameter, satuan, nomor urut library molekul, dan nilai pada setiap baris dan kolom disalin

dari ChemCAD. Berdasarkan desain RGTT200K, laju alir massa helium masuk ke SPH diasumsikan ± 1100 g/detik, laju alir massa gas pengotor N_2 dan O_2 adalah masing-masing 1,12 g/detik, nilai ini setara dengan 1018 ppm. Pengotor ini 50.000 atau 5000 kali dari nilai batas maksimum yang diijinkan dalam pendingin yaitu 0,2 ppmV untuk N_2 dan 0,02 ppmV untuk O_2 .

Spesifikasi Karbon Aktif yang digunakan adalah jenis *micropores* dengan nilai porositas 0,7A, densitas partikel 2000 kg/m^3 , dan diameter pori $1,27 \times 10^{-11} \text{ m}$. Kolom Karbon Aktif yang digunakan diasumsikan berbentuk tabung dengan diameter bed 0,16667 m, tinggi bed 15 m sehingga massa total Karbon Aktif yang digunakan adalah 654,16 kg (berdasarkan rumus $m = \rho \cdot V$, dengan ρ adalah densitas karbon, dan V adalah volume tabung). Bed Karbon Aktif dibuat tinggi (memanjang) agar waktu kontak adsorbat dengan adsorben menjadi lebih lama sehingga banyak adsorbat yang terserap oleh adsorben.

Tabel 1. Data masukan pada stream-1 (adsorberfeed)[7]

Stream Ids (ChemCAD)	Satuan/no.library molekul	1
Labels		AdsorberFEED
Temperature	C	-180
Pressure	M Pa	5
Enthalpy	MJ/detik	-1,17
Vapor Mole Fraction		0
Total Mole Flowrate	gmol/detik	274,8964
Total Mass Flowrate	g/detik	1102,24
Total Std. Liq. Vol. Flowrate	m3/jam	670,2060
Total Std. Vap. Vol. Flowrate	m3/jam	22181,148
Flowrates	g/detik	
Helium-4	212	1100,0001
Nitrogen	46	1,12001
Carbon	64	0
Water	62	0
Oxygen	47	1,12
Carbon monoxide	48	0
Carbon dioxide	49	0
Hydrogen	1	0

Temperatur kriogenik yang diasumsikan pada model adalah -180°C , nilai ini diambil berdasarkan pengalaman pengoperasian sistem pemurnian helium berbagai HTGR di dunia seperti AVR, Jerman ataupun desain PBMR, Afrika Selatan. Pilihan metode perhitungan yang ada dalam unit operasi GA (*Gas Adsorption*) ada 3 macam, yaitu Freundlich, Henry dan Langmuir. Dalam pemodelan ini digunakan metode Freundlich dengan nilai konstanta A (atau k)=1,30 dan B (atau n)=2,60[8]. Pada bed Karbon Aktif terjadi adsorpsi gas pengotor N_2 dan O_2 .

Kemampuan (daya serap) Karbon Aktif ditentukan berdasarkan jumlah konsentrasi pengotor yang terserap dalam porositas Karbon Aktif, dan dapat diketahui dari *stream-2*. Sedangkan sisa pengotor yang tak terserap dapat diketahui dari aliran helium bersih dan dapat diketahui dari *stream-3*. Waktu regenerasi ditentukan berdasarkan nilai konsentrasi pengotor baik N_2 ataupun O_2 pada aliran bersih atau sisa pengotor yang tak terserap oleh Karbon Aktif. Waktu regenerasi adalah waktu dimana nilai konsentrasi pengotor pada aliran bersih sama dengan batas maksimum yang diperbolehkan pengotor dalam pendingin.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses adsorpsi dengan Karbon Aktif pada kondisi kriogenik adalah tahapan paling akhir pada Sistem Pemurnian Helium. Setelah melalui proses penyerapan dengan Karbon Aktif diharapkan

helium sudah murni kembali. Helium yang telah dimurnikan akan disimpan ke dalam tangki-tangki penyimpanan. Kondisi kriogenik adalah kondisi pada temperatur yang sangat rendah. Pada simulasi ini kondisi kriogenik yang diberikan ke Karbon Aktif adalah temperatur -180°C . Pada temperatur tersebut daya serap Karbon Aktif menjadi lebih besar karena gerak molekul pengotor menjadi sangat lambat sehingga memudahkan untuk diserap. Temperatur kriogenik -180°C , ini diambil berdasarkan pengalaman operasional Sistem Pemurnian Helium pada berbagai HTGR (*High Temperature Gas Cooled Reactor*) di dunia seperti HTR10-China, HTTR Jepang dan AVR- Jerman[6].

Dalam Karbon Aktif, gas pengotor yang tersisa dalam aliran pendingin helium diasumsikan adalah N_2 dan O_2 , karena gas-gas pengotor yang lain sudah diserap/ditangkap pada tahap sebelumnya. Kedua gas ini sulit diambil pada tahapan sebelumnya, karena ukurannya yang kecil. Pada analisis ini, laju alir massa N_2 dan O_2 adalah 1,12 gr/detik dari laju alir *absorberfeed* (Tabel 1) yang bercampur dengan laju alir massa helium sebesar 1100 gr/detik. Konsentrasi kedua gas pengotor ini setara dengan 1018 ppm.

Selain temperatur, kemampuan daya serap Karbon Aktif terhadap pengotor N_2 dan O_2 ditentukan oleh banyak faktor, antara lain adalah waktu kontak dan jumlah Karbon Aktif. Waktu kontak yang cukup memungkinkan adsorbat (pengotor) terserap ke dalam permukaan adsorben, sedangkan waktu kontak yang kurang mengakibatkan tidak tercapainya kesetimbangan adsorpsi sehingga pengotor yang diambil tidak optimal. Oleh sebab itu bed Karbon Aktif disimulasikan dengan ketinggian 15 m, diharapkan adsorbat memiliki waktu kontak yang cukup untuk diserap oleh adsorben.

Pada penelitian ini, untuk mengetahui waktu regenerasi Karbon Aktif dilakukan dengan cara mengamati konsentrasi pengotor N_2 dan O_2 pada aliran output dari bed Karbon Aktif yang bersih, yaitu *stream-3*. Hasil pengamatan konsentrasi O_2 pada aliran helium bersih ditunjukkan oleh Tabel 2 dan Gambar 3.

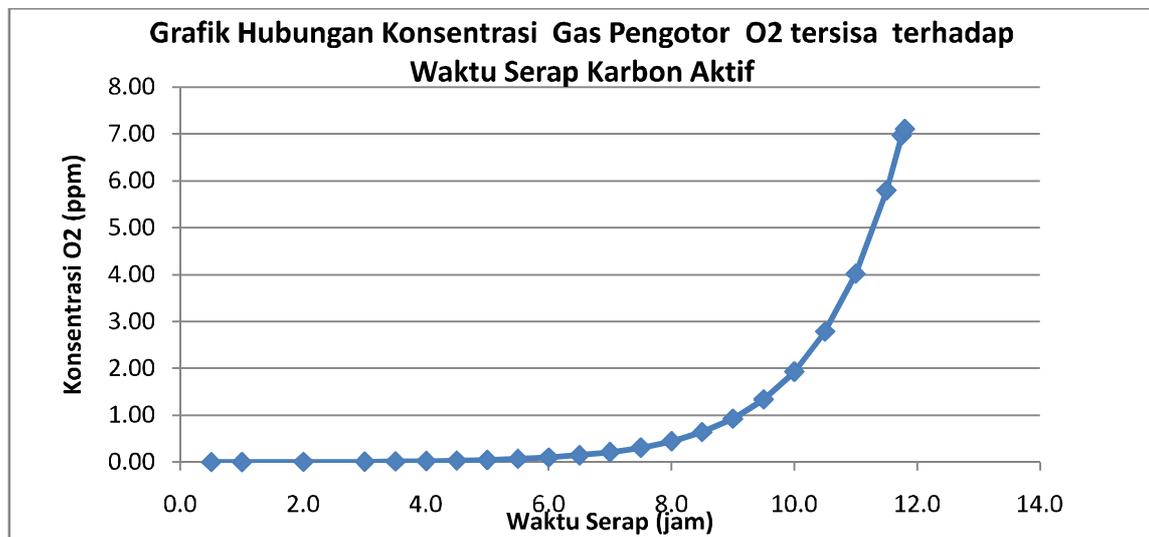
Berdasarkan batas maksimal gas pengotor O_2 yang diperbolehkan dalam pendingin helium adalah 0,02 ppmV, maka apabila menggunakan disain bed Karbon Aktif sebanyak 654,16 kg seperti disain bed diatas maka setelah beroperasi selama 3,5 jam Karbon Aktif harus sudah diregenerasi. Dari Tabel 2, diketahui bahwa pada waktu = 3,5 jam, konsentrasi pengotor O_2 tersisa adalah 0,0164 ppm, sedangkan pada waktu = 4 jam, konsentrasi pengotor sudah melebihi 0,02 ppmV.

Tabel 2. Pengaruh Waktu Serap Karbon Aktif terhadap Pengotor O_2 tersisa

Waktu (jam)	Konsentrasi O_2 tersisa (ppmV)	Waktu (lanjutan) (jam)	Konsentrasi O_2 tersisa (ppmV)
0,5	0,0018	7,0	0,2139
0,75	0,0022	7,5	0,3088
1,0	0,0026	8,0	0,4455
2,0	0,0055	8,5	0,6428
3,0	0,0114	9,0	0,9275
3,5	0,0164	9,5	1,3384
4,0	0,0237	10,0	1,9311
4,5	0,0342	10,5	2,7862
5,0	0,0494	11,0	4,0212
5,5	0,0712	11,5	5,7969
6,0	0,1028	11,8	6,9710
6,5	0,1483	11,8	7,1097

Kondisi pengotor O_2 yang digunakan dalam simulasi ini adalah 1018 ppm atau setara dengan 50.900 kali kondisi operasi normal RGTT200K, sehingga jika diimplementasikan pada Sistem

Pemurnian Helium, dan RGTT200K beroperasi pada kondisi normal dapat disimpulkan bahwa bed Karbon Aktif akan berumur $(3,5 \times 50.900)$ jam = 178.150 jam atau setara dengan 7422 hari.



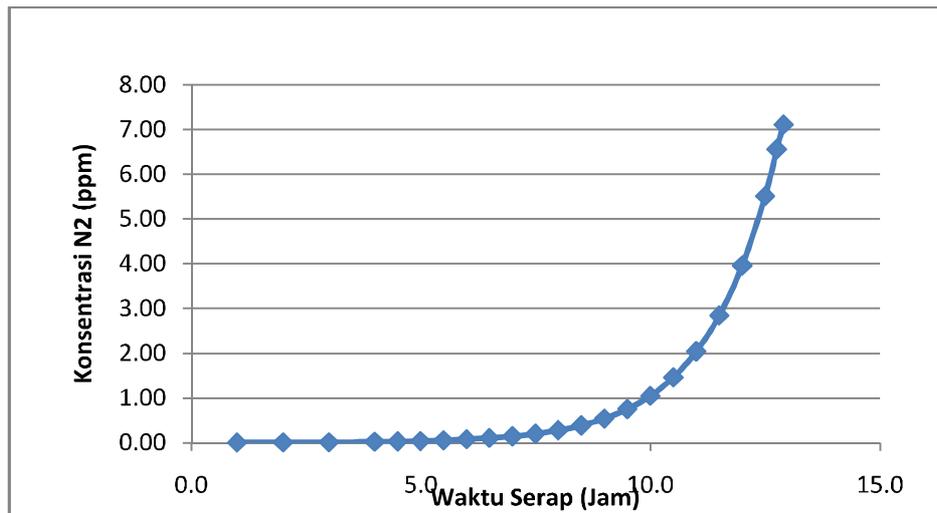
Gambar 3. Hubungan Waktu Serap Karbon Aktif terhadap Gas Pengotor O₂ tersisa

Perhitungan yang sama juga dapat dilakukan untuk pengotor N₂. Hasil pengamatan konsentrasi N₂ pada aliran helium bersih ditunjukkan oleh Tabel 3 dan Gambar 4. Berdasarkan batas minimal gas pengotor N₂ yang diperbolehkan dalam pendingin helium adalah 0,2 ppmV, maka apabila menggunakan disain bed Karbon Aktif sebanyak 654,16 kg seperti disain bed diatas maka setelah beroperasi selama 7,5 jam, Karbon Aktif harus sudah diregenerasi. Dari Tabel 3, diketahui bahwa pada waktu = 7,5 jam, konsentrasi pengotor N₂ tersisa adalah 0,1977 ppmV, sedangkan pada waktu = 8 jam, konsentrasi pengotor sudah melebihi 0,2 ppmV.

Kondisi pengotor O₂ yang digunakan dalam simulasi ini adalah 1018 ppmV atau setara dengan 5090 kali kondisi operasi normal RGTT200K, sehingga jika diimplementasikan pada Sistem Pemurnian Helium, dan RGTT200K beroperasi pada kondisi normal dapat disimpulkan bahwa bed Karbon Aktif akan berumur $(7,5 \times 5090)$ jam = 38.175 jam atau setara dengan 1591 hari.

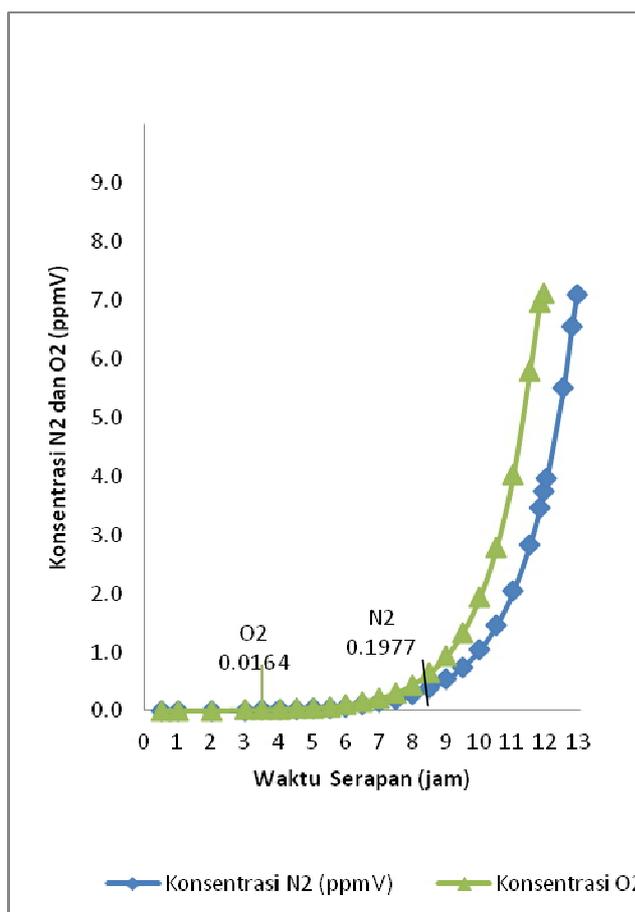
Tabel 3. Pengaruh Waktu Serap Karbon Aktif terhadap Pengotor N₂ tersisa

Waktu (jam)	Konsentrasi N ₂ tersisa (ppmV)	Waktu (jam)	Konsentrasi N ₂ tersisa (ppmV)
0,5	0,0019	8,0	0,2758
1,0	0,0026	8,5	0,3849
2,0	0,0051	9,0	0,5371
3,0	0,0071	9,5	0,7490
4,0	0,0192	10,0	1,0450
4,5	0,0268	10,5	1,4581
5,0	0,0374	11,0	2,0373
5,5	0,0521	11,5	2,8409
6,0	0,0728	12,0	3,9591
6,5	0,1015	12,5	5,5094
7,0	0,1417	12,8	6,5556
7,5	0,1977	12,9	7,1084



Gambar 4. Hubungan Waktu Serap Karbon Aktif terhadap Gas Pengotor N₂ tersisa

Pada pendingin helium RGTT200K, pengotor N₂ dan O₂ tercampur sehingga dalam menentukan waktu serap dipilih waktu yang terpendek 3,5 jam, yaitu setara dengan waktu regenerasi karbon aktif.



Gambar 5. Hubungan Waktu Serap Karbon Aktif terhadap Campuran Gas Pengotor N₂ dan O₂ tersisa

Berdasarkan simulasi waktu regenerasi karbon aktif yang terpendek adalah 1591 hari. Pada waktu yang terpendek ini pengotor N_2 dan O_2 yang tersisa dalam aliran helium bersih output Karbon Aktif baik itu pengotor N_2 maupun O_2 masih dalam batas yang diijinkan.

KESIMPULAN

Pemodelan kriogenik Karbon Aktif pada sistem pemurnian helium telah dilakukan dengan menggunakan paket program ChemCAD. Pengotor O_2 dan N_2 yang diumpankan ke kolom Karbon Aktif masing-masing sebesar 1,12 g/detik atau setara dengan 1018 ppm. Temperatur operasi bed Karbon Aktif adalah $-180\text{ }^\circ\text{C}$, dengan spesifikasi bed Karbon Aktif adalah densitas Karbon 2000 kg/m^3 , diameter bed 0,1667 m, tinggi bed 15 m, dengan total massa Karbon Aktif 654,16 kg. Pada Sistem Pemurnian Helium RGTT200K Karbon Aktif pada proses penyerapan N_2 dan O_2 harus diregenerasi setelah beroperasi selama 1591 hari.

DAFTAR PUSTAKA

1. DHANDHANG PURWADI, M., “Desain Konseptual Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT”, Prosiding Seminar TKPFN-16, PTRKN, BATAN- FMIPA, ITS, Surabaya, 28 Juli 2010.
2. SRIYONO, dkk “Desain Konseptual Sistem Pemurnian Helium Pada RGTT200K Untuk Menjamin Keselamatan Pengoperasiannya”, Seminar Keselamatan Nuklir, Bapeten, 28 Juni 2011.
3. GASTALDI, O, et all “Helium Purification” Proceedings HTR 2006, 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Johannesburg, South Africa, 2006.
4. SUMIJANTO dkk., “Analisis Proses Oksidasi H_2 dan CO untuk Disain Konseptual Sistem Pemurnian Pendingin Primer RGTT200K”, Majalah Sigma Epsilon, Volume 15 No.2, PTRKN-BATAN, Mei 2011
5. ITJEU KARLIANA, dkk., “Konsep Awal Model Pemisahan Gas Pengotor Pendingin Primer RGTT”, Prosiding Seminar TKPFN-17, PTRKN, BATAN- FMIPA, UNY, Yogyakarta, 1 Oktober 2011
6. MOO BEEN CHANG, “Adsorption”, Graduate Institute of Environmental Engineering, National Central University, Beijing, China, 8 Oct. 2008
7. PT. INGENIOUS, “ChemCAD Process Simulation”, Software Training, BATAN, Serpong, 2012
8. ISAAC RAY , et.al., “Adsorption with Activated Carbon”, Croll-Reynolds Clean Air Technology, Westfield, NJ, USA, 2011

DISKUSI/ TANYA JAWAB :

PERTANYAAN: (Sudarmono – PTRKN BATAN)

- Mengapa nilai yang diambil dalam kesimpulan adalah yang lebih rendah yaitu 1591 hari untuk waktu regenerasinya?

JAWABAN: (Itjeu Karlina – PTRKN BATAN)

- Dengan waktu yang lebih rendah maka kedua pengotor baik N_2 dan O_2 tidak akan pernah melampaui batas maksimum yang diijinkan yaitu 0,2 ppmV dan 0,02 ppmV.