

SISTEM PEMURNIAN HELIUM PADA REAKTOR DAYA EXPERIMENTAL (RDE) TIPE HTR-10

Aisyah, Yuli Purwanto
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif
aisyah@batan.go.id

ABSTRAK

SISTEM PEMURNIAN HELIUM PADA REAKTOR DAYA EXPERIMENTAL (RDE) TIPE HTR-10. Saat ini Indonesia sedang merencanakan pemanfaatan energi nuklir bagi pembangunan nasionalnya. Ini ditengarai dari rencana Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang akan membangun RDE type HTR dengan daya 10 MWth. Pada reaktor tipe ini terdapat Sistem Purifikasi yang berfungsi melayani penyediaan helium dengan kemurnian tinggi sebagai pendingin reaktor. Sistem Purifikasi merupakan salah satu sistem pendukung yang penting dengan radioaktivitas tinggi karena keberadaan beberapa jenis radionuklida hasil fisi maupun aktivasi, dan karenanya harus ditangani dengan baik. Telah dilakukan kajian Sistem Purifikasi Gas Helium berdasarkan Spek-Tek HTR yang didapat dari perusahaan yang menawarkan produknya kepada BATAN, Dokumen terbitan *International Atomic Energy Agency* (IAEA), Publikasi dari para Peneliti dan *Expert* asing, serta hasil diskusi dengan beberapa Narasumber dalam berbagai Workshop. Tujuan dari kajian ini adalah mempelajari sistem purifikasi reaktor tipe HTR termasuk didalamnya mempelajari asal radionuklida hasil fisi maupun aktivasi yang menembus lapisan *triso* dan masuk kedalam Sistem Pendingin Reaktor sehingga memerlukan pemurnian terhadap pendingin. Dalam operasional HTR terdapat 2 unit Sistem Purifikasi, yaitu yang beroperasi dalam kondisi normal dan yang beroperasi dalam kondisi terjadi kegagalan maupun pada regenerasi sistem pendingin. Radionuklida yang menembus lapisan *triso* yang kemudian masuk kedalam pendingin (helium) diantaranya Cs-137 dan Sr-90, selain itu juga Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, dan H-3 yang menembus struktur dan konstruksi *triso* secara difusi. Metoda yang digunakan dalam Sistem Purifikasi Gas Helium harus mampu menghilangkan kontaminan radionuklida tersebut sehingga dapat menyediakan gas helium dengan kemurnian tinggi sebagai pendingin HTR.

Kata Kunci: RDE tipe HTR-10, pendingin gas helium, bahan bakar *pebble*, pemurnian helium

ABSTRACT

HELIUM PURIFICATION SYSTEM IN THE EXPERIMENTAL POWER REACTOR OF HTR-10 TYPE. Currently, Indonesians being planned utilization of nuclear energy for national development. This was indicated from the intention of National Nuclear Energy Agency (BATAN) which currently is planning to build a EPR of HTR type with power of 10 MWth . In HTR type reactors there is a Coolant Purification System that function to serve supplying of high purity helium as rector coolant. Helium Purification System is an important and a highly activity system because of the existance of many radionuclides produced from fission and activation, and therefore this system must be managed properly. A study in Helium purification system has been performed based on HTR's technical specification provided by the HTR sellers who promoted their product to BATAN, the documents published by the International Atomic Energy Agency (IAEA), the publication of foreign researchers and experts as well as sources discussed in many workshops. The purpose of this study was to understand the HTR purification system including the origin of radionuclides which are diffuses into the reactor coolant sytem through the *triso* layers so requires purification of the coolant. There are two units of purification system, one operates under normal reactor operation and the other operates in the event of failure or regeneration of reactor cooling system. The radionuclide contaminants penetrating *triso* layer into the coolant are Cs-137 and Sr-90, both are fission product, and the other Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, and H-3 which are produced from material activation; all diffuse through the structure/construction of the *triso* into the coolant. The method applied in Helium Purification System should be able to remove such contaminants so as to provide a high purity Helium that performs as reactor coolant of HTRs.

Keywords : RDE type HTR-10, Helium gas cooled, Pebble fuel, Helium purification

PENDAHULUAN

Indonesia secara bertahap telah melakukan pemanfaatan teknologi nuklir dalam berbagai bidang. Indonesia dalam hal ini Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) telah memiliki 3 buah reaktor riset yaitu Reaktor Serba Guna GA Siwabessy di Serpong, Reaktor Kartini yang berada di Yogyakarta dan Reaktor Triga Mark II yang berlokasi di Bandung. Reaktor reaktor tersebut dimanfaatkan untuk kegiatan penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir. Selain itu Reaktor GA Siwabessy juga digunakan untuk produksi radioisotop diantaranya Mo-99. Limbah radioaktif yang merupakan bagian konsekwensi dari pemanfaatan teknologi nuklir juga telah mampu dikelola dengan baik oleh BATAN dengan memenuhi standart IAEA. Pusat Teknologi Pengelolaan Limbah Radioaktif (PTLR) - BATAN telah mampu mengelola seluruh limbah radioaktif yang ditimbulkan dari berbagai industri, rumah sakit dan penelitian dan pengembangan yang menggunakan bahan radioaktif diseluruh wilayah Indonesia [1].

Berdasarkan pengalaman negara maju dan juga pengalaman BATAN dalam mengoperasikan reaktor beserta laboratorium pendukungnya, maka BATAN berencana membangun sebuah reaktor daya mini guna menyongsong penerimaan masyarakat terhadap keselamatan operasi PLTN. Berdasarkan Keputusan Presiden No.5 Tahun 2000 bahwa PLTN merupakan program yang harus dilaksanakan dimana PLTN diharapkan mampu memasok energi nasional sebesar 2% [1,2]. Demikian juga berdasarkan Undang-undang No. 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) bahwa PLTN harus segera beroperasi dalam waktu dekat. Jadi sudah sepatutnyalah BATAN berencana membangun reaktor daya mini yang bertenaga 10 MW sebelum mengoperasikan PLTN dengan daya yang lebih besar.

Beberapa negara yang sampai dengan saat ini telah dan terus mengembangkan pengoperasian reaktor generasi IV yaitu reaktor *High Temperature Gas Cooled Reactors* (HTGR) antara lain [3].

1. Tiongkok mengoperasikan reaktor HTGR, bahan bakar bentuk *pebble* dengan daya 10 MWth yang mencapai tingkat kritis pada tahun 2000.
2. Jepang dengan bahan bakar bentuk prismatic dengan daya 40 MWth dan mencapai kritis pada Tahun 1999
3. Afrika selatan dengan bahan bakar bentuk *pebble* dan daya 400 MWth yang memulai konstruksi Tahun 2007 dan beroperasi pada Tahun 2012
4. Rusia dengan bahan bakar bentuk prismatic dan daya 290 MWe
5. Belanda dengan reaktor kecil dan bahan bakar *pebble*
6. Jerman dengan daya 300 MWe dan bahan bakar bentuk *pebble*

Reaktor daya mini yang akan segera dibangun adalah Reaktor Daya Eksperimental (RDE) tipe *High Temperature Reactor* 10 MW *thermal* (HTR-10). *High Temperature Reactor* merupakan salah satu kandidat untuk pembangkit listrik masa depan dan aplikasi panas untuk industri. Rencana pembangunan RDE tipe HTR-10 telah disetujui dan masuk dalam RPJMN Bappenas tahun 2015-2019 [4]. Rencananya RDE akan dibangun di Kawasan PUSPIPTEK Serpong [4].

Reaktor RDE tipe HTR-10 adalah reaktor yang mempunyai daya termal 10 MW berbahan bakar kernel yang mengandung uranium diperkaya 17 % U-235, dan berpendingin primer gas helium (He) [5]. Sistem pendingin primer yang menggunakan gas helium memerlukan gas helium dengan tingkat kemurnian yang tinggi untuk menjaga agar reaktor suhu tinggi ini dapat beroperasi dengan baik dan selamat. Oleh karena itu sistem purifikasi gas helium merupakan sistem pendukung yang sangat penting pada operasional RDE tipe HTR-10. Dalam operasionalnya, akan ditimbulkan hasil fisi, aktivasi dan debu debu grafit yang mengotori gas helium dan ini memerlukan pemurnian agar pasokan gas helium sebagai pendingin reaktor RDE dapat sesuai dengan spesifikasinya. Suatu instalasi pemurnian gas helium disamping memurnikan gas helium dari kontaminan kontaminan yang terdapat dalam teras reaktor juga sistem ini menyediakan pasokan gas helium murni untuk pendingin primer RDE.

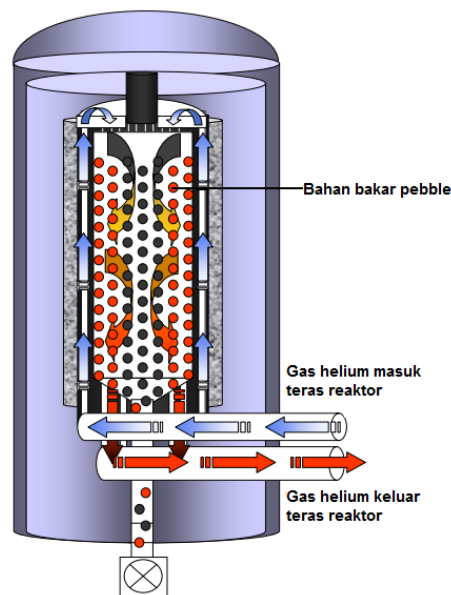
Tujuan mempelajari sistem purifikasi reaktor RDE tipe HTR-10 adalah untuk mempelajari aliran limbah yang ditimbulkan dari sistem purifikasi helium ini seperti timbulnya berbagai kontaminan dalam teras reaktor yang masuk kedalam sistem pendingin reaktor sehingga memerlukan pemurnian terhadap pendingin helium. Melalui sistem purifikasi helium ini dapat diketahui jenis limbah yang ditimbulkannya.

Makalah ini akan membahas masalah sistem purifikasi gas helium sebagai pendingin primer RDE tipe HTR-10 sebagai data pendukung juga dibahas tentang RDE tipe HTR-10 dan bahan bakar *pebble*.

Reaktor Daya Ekperimental Tipe HTR-10

Reaktor daya yang rencananya akan dibangun oleh BATAN mengacu pada reaktor HTGR yang dioperasikan oleh Tiongkok yang mencapai kondisi kritis pada Tahun 2000 [3]. Sesuai dengan spesifikasinya, RDE yang akan dibangun memiliki daya 10 MW termal dengan bahan bakar kernel uranium oksida yang diperkaya rendah (LEU) 17%. Teras reaktor berisi 27.000 buah *pebble* yang terdiri dari 14.310 elemen *pebble* kernel (bahan bakar) dan 12.690 *pebble* grafit (sebagai moderator). Target *burn up* bahan bakar adalah 80.000 MWd/tHM. Untuk spesifikasi yang terkait dengan pembangkitan uap bahwa air masuk dan keluar pembangkit uap masing masing 160 dan 530 °C. Pada sistem pembangkit uap, panas yang digunakan untuk pembangkitan uap berasal dari gas helium yang keluar dari teras reaktor pada suhu 700 °C. Gas helium yang telah mengambil panas dari reaktor kemudian dialirkan ke pembangkit uap untuk menghasilkan uap yang selanjutnya uap dialirkan ke *steam-turbin* dengan skema seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Terkait dengan sistem pembangkit uap, bahwa kapasitas perpindahan panas yang terjadi sebesar 10,5 MJ/dt dengan suhu air masuk ke pembangkit uap 160°C dan tekanan 75 bar dengan laju alir massa 3,61 kg/dt. Uap yang dihasilkan memiliki suhu 530°C dan bertekanan 60 Bar [3,6-9].

Pendingin gas He akan bersinggungan dengan bahan bakar *pebble* dalam teras reaktor, kemudian gas helium ini akan mengambil panas dari fisi bahan bakar uranium *pebble*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1[3].

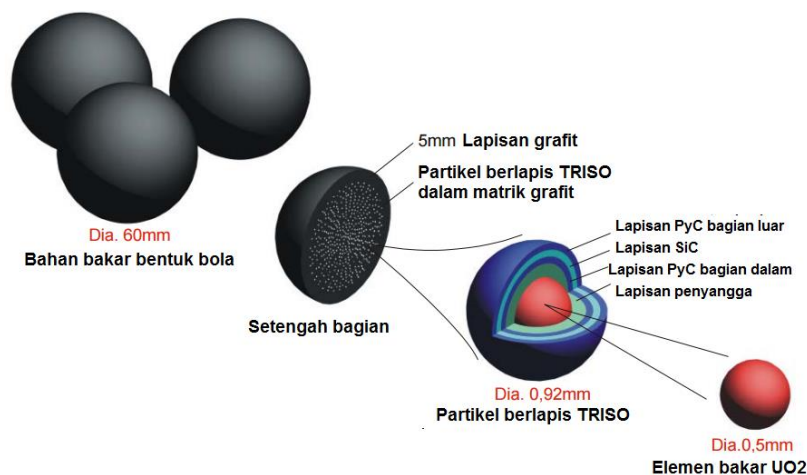


Gambar 1. Aliran pendingin gas helium dalam teras reaktor [3].

Pada Gambar 1 terlihat bahwa gas helium mengalir ke dalam teras reaktor yang berisi bahan bakar *pebble* dan *pebble* grafit [3]. Teras reaktor memiliki volume 5 m³ dan dialiri gas He. yang bertekanan 30 bar. Suhu gas helium masuk dan keluar teras reaktor masing masing 245 dan 700 °C dengan kecepatan alir masa gas He 4,4 kg/detik. Sebagai moderator digunakan grafit yang berbentuk *pebble*. Grafit digunakan sebagai moderator karena mempunyai konduktivitas termal yang tinggi seperti logam sehingga partikel triso dapat dengan mudah mentransfer panas reaksi peluruhan dari bahan bakar kernel menuju gas helium dengan melewati lapisan-lapisannya. Kemudahan transfer panas juga didukung dengan nilai rasio yang besar antara luas permukaan dan volume sehingga beda suhu yang tinggi antar lapisan triso dicegah [5,6,]. Material grafit berfungsi juga sebagai moderator pada bahan bakar kernel dan juga dimanfaatkan sebagai struktur penyangga dari partikel bahan bakar triso. Boron-10 ditambahkan ke dalam moderator grafit sebagai penyerap neutron, penambahan boron diikuti dengan penambahan litium-7

Bahan Bakar RDE Tipe HTR-10

Sesuai dengan spesifikasinya dalam operasional RDE tipe HTR-10 digunakan bahan bakar bahan bakar kernel yang mempunyai struktur partikel berlapis triso (*triso coated particle*) yang terdispersi dalam matriks grafit. Bahan bakar ini berbentuk *pebble* dengan struktur lapisan triso seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 [3,10,11,12,13]



Gambar 2. Bahan bakar kernel, partikel berlapis triso [3,10,11,12,13]

Beberapa negara yang mengoperasikan HTGR dengan bahan bakar bentuk *pebble* diantaranya adalah China, Afrika Selatan sedangkan. Selain bahan bakar bentuk *pebble* terdapat juga beberapa negara yang menggunakan bahan bakar bentuk prismatik dalam operasional HTGR nya seperti Jepang, Rusia dan Jerman [3].

Pada bahan bakar yang berbentuk *pebble* dengan struktur berlapis triso maka terdapat beberapa lapisan pada bahan bakar kernel yaitu lapisan pertama adalah bahan bakar kernel yang mengandung UO_2 yang dilapisi moderator keramik dan grafit. Bahan bakar berada pada posisi sentral dengan diameter 450 μm . Bahan bakar selanjutnya dilapisi oleh lapisan penyangga dengan tebal 90 μm . Lapisan penyangga terbuat dari grafit berpori yang mempunyai fungsi untuk penyerapan unsur radioaktif hasil fisi yang lepas dari lapisan pertama. Selain itu lapisan penyangga ini dapat mengakomodasi pembengkakan bahan bakar kernel yang karena adanya pemuaian akibat kenaikan suhu sampai 1600 $^{\circ}C$. Lapisan selanjutnya adalah lapisan karbon pirolitik (PyC) dengan tebal 35 μm yang berfungsi sebagai lapisan bejana penerima tekanan dari lapisan sebelumnya. Lapisan silisium karbida (SiC) yang mempunyai fungsi sebagai penahan keselamatan unsur radioaktif hasil fisi yang lepas dari lapisan sebelumnya, lapisan ini mempunyai tebal 40 μm . Lapisan terluar adalah lapisan dibuat dari grafit pirolitik (PyC) yang mempunyai tebal 45 μm yang berfungsi sebagai pertahanan akhir dari bahan bakar [10-13]. Struktur lapisan triso ini pada kondisi normal mampu menahan radionuklida hasil fisi dan transurium tetap berada pada struktur bahan bakar.

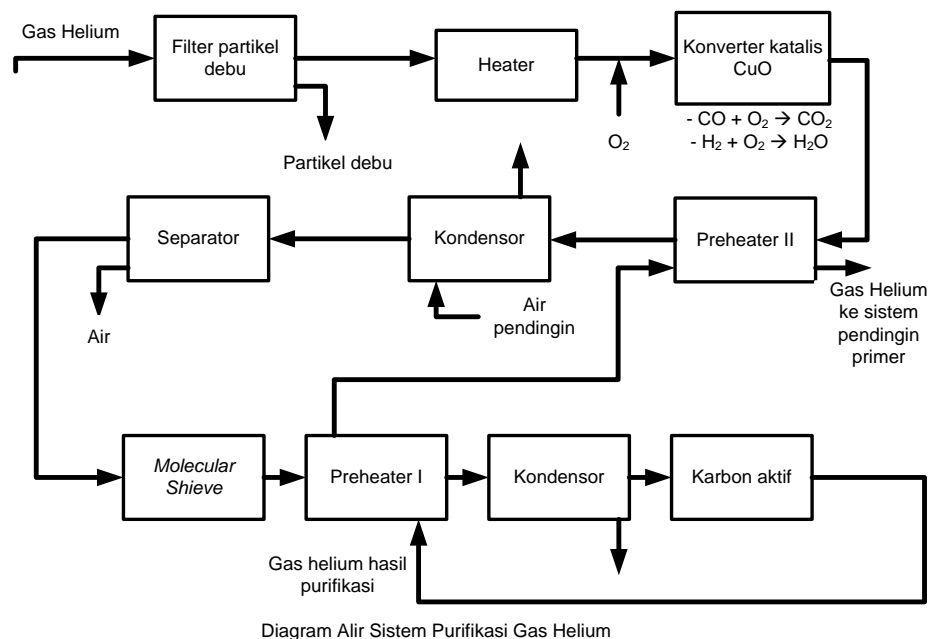
Bahan bakar RDE tipe HTR-10 berbentuk pebel (bentuk bola) dimana setiap elemen pebel yang berdiameter 6 cm berisi 8.335 partikel berlapis triso. Setiap elemen pebel mengandung 5 gram *heavy metal* (HM) yang merupakan campuran dari U-234, U-235, dan U-238. Partikel-partikel tersebut didalam pebel terimobilisasi dalam matriks grafit. Seperti yang terlihat pada Gambar 1 bahwa dalam reaktor, lapisan luar dari elemen pebel bersinggungan langsung dengan molekul gas helium, sehingga terdapat resiko adanya partikel debu yang lepas dari lapisan luar tersebut dan terdispersi kedalam gas helium. [3].

Sistem Purifikasi Gas Helium Pada Rde Tipe HTR-10

Sistem pendingin primer RDE tipe HTR-10 yang menggunakan gas helium sebagai media pendingin reaktor memiliki beberapa fungsi [2,9,14-16]:

- Penghilangan kontaminan kimia dan partikel debu grafit dari pendingin primer untuk mempertahankan nilai kemurnian gas helium sesuai dengan spesifikasinya.
- Penyediaan gas helium murni ke sistem yang membutuhkannya (teras reaktor dan pembangkit uap air).
- Pengosongan gas helium dari sistem primer dan sistem pendukung yang berisi gas helium dan ditampung dalam tangki penampung gas helium murni (kegiatan tersebut dilakukan pada saat kegiatan perawatan).
- Pengurangan tekanan dan penghilangan gas helium dari sistem pendukung dan penunjang yang berisi gas helium, dan memungkinkan menampung kontaminan radioaktif dalam gas helium.
- Evakuasi sistem primer dan sistem pendukung gas helium.

Sistem purifikasi gas helium pada operasi normal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 3. Diagram Sistem Purifikasi Gas Helium [2,9,14-16]

Pada sistem ini sebanyak 10,5 kg/j (5% laju alir gas helium) dimasukkan secara *bypass* kedalam sistem purifikasi dan selanjutnya gas helium hasil purifikasi dimasukkan kembali kedalam sistem pendingin primer. Gas helium tersebut pada awalnya melewati filter penghilang partikel debu, dan kemudian dilewatkan ke pemanas. Jika diperlukan, pemanas ini dapat menaikkan suhu gas helium sampai sekitar 250 °C, oleh karena itu sistem purifikasi akan tetap dapat dilakukan bahkan ketika sistem pendingin primer mendingin. Suhu 250 °C merupakan suhu operasi optimal *converter* katalitis CuO. Gas helium panas selanjutnya dilewatkan ke *converter* katalitis CuO untuk mengoksidasi HT menjadi HTO, CO menjadi CO₂ dan H₂ menjadi H₂O dengan penambahan gas O₂ (T adalah tritium yaitu H-3). Gas helium keluar dari *converter* yang masih bersuhu tinggi selanjutnya dilewatkan ke pemanas untuk pemanasan gas helium hasil purifikasi sebelum dimasukkan kembali ke sistem pendingin primer. Gas helium yang keluar dari pemanas kemudian dilewatkan ke pendingin, gas tersebut didinginkan sampai kandungan uap airnya mengembun, selanjutnya embunan uap air dipisahkan pada separator air. Gas helium yang keluar dari separator air mempunyai suhu sekitar 40 °C kemudian dilewatkan ke *molecular sieve* untuk pengambilan partikel yang berukuran kecil (HTO, H₂O dan CO₂). Gas helium yang keluar dari *molecular sieve* yang masih panas selanjutnya digunakan sebagai fluida pemanas pada pemanas untuk pemanasan gas helium hasil purifikasi. Gas tersebut selanjutnya dilewatkan ke

kondensator yang berpendingin nitrogen cair untuk (pengembunan uap airnya) menurunkan suhu gas helium sampai sekitar suhu $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (minus $180\text{ }^{\circ}\text{C}$). Gas fisi seperti Kr-85 dan Xe-133 dan juga gas-gas volatil seperti N_2 , Ar dan CH_4 yang sulit diserap akan diserap dalam filter karbon aktif pada suhu sekitar $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Gas helium yang keluar dari filter merupakan gas helium hasil purifikasi dipanaskan dalam untuk selanjutnya dimasukkan dalam sistem pendingin primer atau disimpan dalam tangki helium murni.

METODOLOGI

Makalah ini berupa kajian yang disusun berdasarkan referensi yang meliputi dokumen teknis kajian pengelolaan limbah RDE tipe HTR-10, spesifikasi teknis dari vendor, dokumen terbitan *International Atomic Energy Agency* (IAEA), publikasi dari para Peneliti dan *Expert* asing, serta hasil diskusi dengan beberapa narasumber dalam berbagai Workshop. Makalah kajian sistem pemurnian helium pada reaktor daya experimental (RDE) tipe HTR-10 ini dilakukan di PTLR-BATAN pada Tahun 2016.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gas pendingin helium setelah keluar dari teras reaktor mengandung gas dan unsur radioaktif *volatile* seperti hasil fisi, gas tritium ($^3\text{H}_2$) dan karbon-14, serta partikel debu grafit. Tritium merupakan hasil aktivasi neutron terhadap boron dan litium (dalam moderator grafit), helium-3 (dalam gas helium), dan pengotor gas helium (berupa CH_4 , uap air dan hidrogen). Karbon-14 merupakan hasil aktivasi neutron dari pengotor gas helium (CO dan N_2). Didalam sirkulasinya, aktivitas, humiditas dan kadar partikel debu didalam gas helium semakin meningkat, oleh karena itu gas helium diolah dalam sistem purifikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Melalui sistem purifikasi gas helium ini maka debu grafit, humiditas dan unsur-unsur radioaktifnya dapat dihilangkan [10,11,17,18].

Gas helium yang digunakan sebagai pendingin primer pada RDE harus memenuhi persyaratan kemurnian yang tinggi. Oleh karena itu sistem purifikasi gas helium menghilangkan kontaminan gas sehingga mencapai kemurnian yang tinggi dengan standar konsentrasi kontaminan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar konsentrasi kontaminan dalam gas helium hasil purifikasi [2,9,14]

Jenis Kontaminan	Nilai Batas Konsentrasi (ppm)
H_2O	$\leq 0,2$
CO	≤ 3
N_2	≤ 1
H_2	≤ 5
CH_4	≤ 1
O_2	$\leq 0,02$
CO_2	$\leq 0,6$

Tabel 1 menunjukkan batas konsentrasi kontaminan yang diijinkan dalam gas helium sebagai sistem pendingin primer. Konsentrasi kontaminan dalam gas helium yang melebihi nilai batas tersebut akan menyebabkan akibat samping yaitu kelebihan kadar H_2O menimbulkan *water ingress* dan kelebihan konsentrasi N_2 dan O_2 menyebabkan *air ingress*. Peristiwa *water ingress* dan *air ingress* harus dihindari karena dapat menyebabkan kecelakaan berupa ledakan pada teras

reaktor. Sedangkan kelebihan kadar N₂, CO, CH₄ dan CO₂ menimbulkan produk aktivasi C-14 pada konsentrasi yang tinggi.

Dalam RDE tipe HTR-10 memiliki 2 unit sistem purifikasi helium yang beroperasi sesuai dengan fungsinya yaitu 1 unit yang berfungsi pada operasi normal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan yang 1 unit lagi yang biasa disebut unit tambahan dioperasikan pada saat dilakukan regenerasi sistem purifikasi dan juga dioperasikan pada saat terjadi kegagalan sistem operasi. Seluruh sistem purifikasi helium dioperasikan sesuai dengan kriteria disain yang telah ditentukan. Unit pemurnian helium dari jalur tambahan secara umum mempunyai fungsi yang mirip seperti unit pemurnian helium utama yang dioperasikan pada kondisi normal. Unit pemurnian utama dan tambahan beroperasi secara bergantian.

Pada kondisi normal, sistem purifikasi dijalankan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Namun demikian jika terjadi kegagalan operasi seperti terjadinya kebocoran air ke dalam sistem utama telah terjadi, maka unit pemurnian tambahan dijalankan secara manual. Sistem utama kemudian diisolasi secara manual dan aliran helium diarahkan ke unit pemurnian helium tambahan. Pada kondisi ini aliran pemurnian helium dinaikkan hingga sekitar 245 kg/jam.

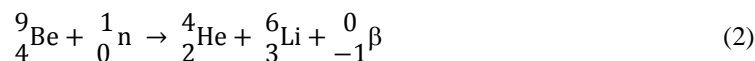
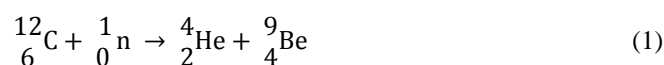
Sistem pemurnian helium tambahan juga beroperasi pada saat dilakukan regenerasi sistem. Jika Sistem pemurnian helium memerlukan regenerasi ketika CuO telah tereduksi menjadi Cu atau *molecular sieve* atau adsorber karbon aktif akan diganti. Meningkatnya jumlah kontaminan tertentu pada aliran gas helium setelah melewati adsorber karbon aktif mengindikasikan bahwa sistem memerlukan regenerasi. Sebelum dilakukan regenerasi aliran pemurnian diubah kedalam aliran pemurnian tambahan dan tekanan dalam sistem yang akan diregenerasi dilepaskan. Regenerasi adsorber karbon aktif dilakukan dengan *backwashing* dengan pemanasan. Setiap regenerasi baik untuk *molecular sieve* maupun adsorber karbon aktif memiliki sebuah siklus regenerasi yang terpisah dan juga sistem evakuasinya. Untuk meregenerasi konverter katalistis CuO, oksigen disuntikkan secara berkala ke dalam aliran pemurnian. Gas-gas bekas proses regenerasi dikumpulkan di dalam tangki penyimpanan helium yang terkontaminasi radioaktif dan dibuang melalui *exhaust* udara baik secepatnya atau setelah waktu penundaan (*delay*) yang cukup tergantung pada komposisi kontaminan tersebut. Semua limbah cair yang mengandung tritium yang dikumpulkan selama proses regenerasi dimasukkan ke dalam sistem ekstraksi air pada sistem pendukung helium.

Pada operasi RDE tipe HTR-10 tentunya akan ditimbulkan banyak hasil fisi. Diantara hasil fisi tersebut terdapat unsur radioaktif hasil fisi Cs-137 dan Sr-90 dapat berdifusi melewati struktur dan konstruksi triso bahan bakar kernel dan masuk kedalam pendingin primer helium. Selain itu unsur radioaktif hasil fisi yang berupa gas seperti gas Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, dan H-3 dapat juga mendifusi melewati struktur dan konstruksi triso dan masuk kedalam pendingin gas helium.

Selain hasil fisi yang mengotori pendingin gas helium, terdapat unsur radioaktif yang harus diperhatikan yaitu tritium (H-3) karena tritium ini dapat menembus bahan logam dan masuk dalam sistim pendingin helium. Hal ini akan menyebabkan terbentuknya H₂. Tritium secara kimia seperti hidrogen, dapat terjadi reaksi pertukaran ion antara tritium dengan hidrogen sehingga di dalam pengotor helium seperti H₂O, H₂ atau CH₄ terdapat ion tritium. Tritium dapat berasal dari aktivasi neutron terhadap pengotor gas helium ataupun dari aktivasi neutron pada boron dan litium yang terdapat dalam moderator grafit. Dalam gas helium terdapat pengotor yang berupa He-3, H₂O, H₂ atau CH₄, N-14 dan C-13. Aktivasi neutron terhadap N-14 dan C-13 akan menghasilkan karbon-14 (C-14).

Berikut adalah beberapa reaksi pembentukan tritium dari beberapa bahan

- 1) Reaksi pembentukan tritium dari aktivasi neutron dari boron dan lithium dalam moderator grafit ditunjukkan pada persamaan reaksi 1,2,3 dan 4 sebagai berikut [2,6,9,19]:





2). Reaksi pembentukan tritium dari aktivasi neutron terhadap He-3 yang terdapat dalam pendingin helium ditunjukkan pada persamaan 5 sebagai berikut [2,6,9,19]:



3). Reaksi pembentukan karbon C-14 melalui aktivasi neutron terhadap pengotor N-14 dan C-13 dalam pendingin He adalah sebagai berikut [[2,6,9,19,20]:

:



Pengoperasian sistem purifikasi helium juga menimbulkan limbah radioaktif padat yang berupa debu grafit yang tertangkap pada *bag filter*, *prefilter*, filter karbon aktif bekas, padatan terkontaminasi dari kegiatan perawatan yang terdiri dari sarung tangan, kertas, kain dan pakaian, dan lainnya.. Selain limbah radioaktif padat, pada pengoperasian sistem purifikasi gas helium juga ditimbulkan limbah radioaktif cair yang mengandung H-3, C-14, Cs-137, Sr-90, pada tingkat aktivitas rendah dan sedang. Seluruh limbah yang ditimbulkan dari operasional sistem purifikasi gas helium harus dilakukan pengelolaan dengan baik agar masyarakat dan lingkungan dapat selamat dalam memanfaatkan teknologi nuklir saat ini maupun dimasa mendatang.

KESIMPULAN

Sistem purifikasi pendingin primer helium merupakan bagian yang penting dari operasional RDE tipe HTR-10. Gas helium dalam teras reaktor mengambil panas dari reaksi fisi untuk selanjutnya panas digunakan untuk pembangkitan uap. Terdapat 2 unit sitem purifikasi helium dalam operasional RDE tipe HTR-10. Sistem utama yang beroperasi pada kondisi normal dan sistem purifikasi tambahan yang beroperasi pada kondisi khusus yaitu pada saat terjadi kegagalan sistem dan pada saat regenerasi beberapa peralatan dalam unit purifikasi helium. Terdapat radionuklida hasil fisi yang menembus lapisan triso dan masuk kedalam gas helium seperti Cs-137 dan Sr-90. Selain itu juga terdapat gas Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, dan H-3 dapat juga mendifusi melewati struktur dan konstruksi triso dan masuk kedalam pendingin gas helium. Oleh karena itu sistem purifikasi gas helium menghilangkan kontaminan tersebut sehingga mencapai kemurnian yang tinggi . Pada operasional unit purifikasi gas helium akan ditimbulkan limbah radioaktif baik cair maupun padat yang harus dikelola dengan baik selamat bagi masyarakat dan lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada rekan rekan Bidang Teknologi Pengolahan dan Penyimpanan Limbah yang telah berpartisipasi dalam penyusunan dokumen teknis pengelolaan Limbah RDE sehingga dapat menjadi acuan dalam kegiatan terkait dengan limbah RDE.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Keputusan Presiden No. 5 Tahun 2000 Tentang Kebijakan Energi Nasional
- [2] Zainus Salimin, Endang Nuraini , Pengkajian Pengelolaan Limbah Radioaktif Reaktor Daya Eksperimental Tipe HTR-10, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIII, PTLR, (2015) 1-14
- [3] Andrew C. Kadak, Ph.D, High Temperature Gas Reactors, Kadak Associates, Inc, 2010, <http://web.mit.edu/pebble-bed/Presentation/HTGR.pdf>
- [4] Rencana Pembangunan Jangka Menengah BATAN 2015-2019, BATAN, 2014

- [5] Hyedong Jeong and Soon Heung Chang, "Estimation of the Fission Products, Actinides and Tritium of HTR-10", International Journal of Nuclear Engineering and Technology Vol 4 No 5. June 2009, 729-738, 2009.
- [6] Zongxin Wu, Dengcai Lin, Daxin Zhong, "The Design Features of The HTR-10", Nuclear Engineering and Design 218, Elsevier, 2002.
- [7] BATAN-RENUKO, " Conceptual Design for General Design features of the RDE " RDE-DS-WBS02-01, Jakarta, September 2015.
- [8] BATAN-RENUKO, "Nuclear Steam Supply Sistem", RDE-DS-WBS02-201-002-001, Jakarta, September 2015.(gambar)
- [9] PTLR, Kajian Pengelolaan Limbah Radioaktif Reaktor Daya Eksperimental (RDE) tipe HTR-10, Dokumen Teknis (2015)
- [10] Sihana, "Pengelolaan Limbah Pebel Suhu Tinggi", Materi Workshop Pengelolaan Limbah HTR-10, PTLR-BATAN, Serpong, 7 Oktober 2014.
- [11] Mohammad Dhandhang Purwadi, "Teknologi Reaktor Gas Temperatur Tinggi dan Limbahnya", Materi Workshop Pengelolaan Limbah HTR-10, PTLR-BATAN, Serpong, 18 September 2014.
- [12] Irson J, " Important Viewpoints Proposed for a Safety Approach of HTGR Reactions in Europe", International Proceeding ICENES, Belgia, 2005.
- [13] Wu Z and Yu S, "HTGR Projects in China", International Journal on Nuclear Engineering and Technology, vol 39. No 2, 103-110, 2007.
- [14] BATAN-RENUKO, "Conceptual Design for Helium Purification Sistem/Helium Supporting Sistem ", RDE-DS-WBS02-201-003, Jakarta, September 2015.
- [15] BATAN-RENUKO, " Helium Purification Scematic Diagram", RDE-DS-WBS02-201-003-002, Jakarta, September 2015.
- [16] BATAN-RENUKO, " Helium Supply and Storage Sistem KBB Scematic Diagram", RDE-DS-WBS02-201-003-003, Jakarta, September 2015.
- [17] Kurt Kugeler, "Waste Management : Spent HTR-Fuel Elements", Institute for Safety Research and Reactor Technology (ISR), Research Center Jülich, 2001.
- [18] K. J. Nortz, "An Overview of HTGR Fuel Recycle", Oak Ridge National Laboratory, Chemical Technology Division, USA, 1976.
- [19] Westing House Electric Company, Radioactive Waste management AP 1000 Design Control Management, Revision 17, Westing House pittsburgh,2010
- [20] Manson benedict, " Nuclear Chemical Engineering Second Edition", Mc Graw Hill Book Company, New York, 1981.