



Kajian Sistem Pemurnian Helium Reaktor HTGR Berdaya Kecil

Siti Alimah^{*1}, Sriyono²

¹Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN)-BATAN, Jl. Kuningan Barat, Jakarta Selatan, Indonesia

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN)-BATAN, Gedung 80, Kawasan Puspitex, Tangsel, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima:

11 Januari 2016

Diterima dalam bentuk revisi:

11 Maret 2016

Disetujui:

11 Mei 2016

Kata kunci:

Sistem pemurnian helium
Pengotor
Pendingin primer
HTGR berdaya kecil

ABSTRAK

KAJIAN SISTEM PEMURNIAN HELIUM REAKTOR HTGR BERDAYA KECIL. Sistem pemurnian helium (SPH) adalah salah satu sistem keselamatan pada reaktor HTGR. SPH berfungsi membersihkan pengotor yang ada pada pendingin primer, sehingga dampak terhadap struktur, sistem dan komponen (SSK) reaktor minimal. Ada dua jenis pengotor pada pendingin yaitu berbentuk partikulat (debu karbon, produk fisi (Kr, Xe, Cs, dll.)) dan gas (O₂, N₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂, dan H₂). Setiap reaktor mempunyai batasan pengotor yang berbeda selama operasi normal tergantung pada daya reaktor, sistem konversi energi dan jenis bahan bakar yang digunakan. Makalah ini membahas SPH pada HTR-10, HTTR dan desain konseptual RDE. Tujuan kajian adalah mengetahui desain SPH yang optimum dan dapat digunakan sebagai masukan desain SPH RDE. Metodologi yang digunakan adalah kajian literatur berdasarkan pengalaman operasi HTR-10 dan HTTR serta evaluasi desain konseptual RDE. Parameter kajian ditekankan pada batasan pengotor yang dipersyaratkan pada operasi normal, komponen utama alat pemurnian, laju alir masa dan proses regenerasi. Komponen utama peralatan pemurnian yang digunakan pada SPH HTR-10, HTTR dan RDE adalah sama yaitu filter, kolom CuO, *water cooler*, kolom *molecular sieve* dan karbon aktif kondisi kriogenik. Berdasarkan pengalaman operasi HTR-10 dan HTTR, desain SPH yang digunakan cukup handal dalam menjaga kemurnian pendingin primer, meskipun batasan pengotor yang ditetapkan berbeda. SPH pada HTTR Jepang memiliki penetapan batas yang lebih ketat yaitu tidak boleh ada pengotor N₂, CH₄ dan O₂ pada operasi normal, serta menggunakan *precharcoal trap* untuk mengadsorpsi debu halus dibawah 0,1 mikron. Kedua parameter ini dapat diadopsi pada desain SPH RDE agar dampak pengotor terhadap SSK minimal.

ABSTRACT

THE ASSESSMENT OF HELIUM PURIFICATION SYSTEM OF SMALL POWER HTGR. The helium purification system (HPS) is one of safety system of High Temperature Gas-cooled Reactor. HPS removes impurities in the primary coolant, so that the impact on structure, system and component (SSC) is minimized. The two impurity types are particulates (carbon dust, fission products (Kr, Xe, Cs etc.) and the gases (O₂, N₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂, and H₂). Every reactor has a different impurity limit during normal operation, depends on the reactor power, energy conversion system and fuel type. This paper discusses the HPS on HTR-10, HTTR and Indonesian RDE conceptual design. The purpose of this assessment is to determine the optimum HPS design as a role model for Indonesian RDE. The utilized methodology is a literature study based on the operating experiences of both HTR-10 and HTTR as well as the evaluation of RDE conceptual design. This study focuses on the impurities limit during normal operation, the main components of HPS, mass flow-rate and regeneration process. The main component that used in HPS for HTR-10, HTTR and RDE are similar i.e. filter, CuO column, water cooler, molecular sieve bed and cryogenic activated carbon bed. Refer to the HTR-10 and HTTR operational experiences, both of those reactors have a purification systems that capable to maintain the helium purity, even though the impurities limit are different. The HPS of HTTR-Japan has a stricter impurities limit that N₂, CH₄, and O₂ should not be contained at all during normal operation and the precharcoal trap is used to adsorb the fine dust below 0.1 micron. Both of these parameters can be adopted to the RDE's HPS design to minimize the effect of impurities to SSC.

Keywords: helium purification system, impurities, primary coolant, small power HTGR.

© 2016 Jurnal Pengembangan Energi Nuklir. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) adalah reaktor temperatur tinggi yang menggunakan gas helium sebagai

pendingin[1]. Gas helium digunakan sebagai pendingin karena karakteristiknya sebagai gas ideal/gas *inert*, tidak mengalami perubahan sifat fisik maupun kimia pada temperatur sangat tinggi, tidak bereaksi dengan gas/zat

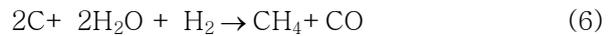
*Penulis korespondensi.

E-mail: alimahs@batan.go.id

lain, efektif untuk keperluan perpindahan panas dan mudah dimampatkan sampai lebih dari 5 MPa [2]. Kemurnian gas helium sebagai pendingin HTGR harus dijaga, baik dari pengotor yang berbentuk partikulat maupun gas [3]. Pengotor partikulat adalah debu karbon yang mempunyai kemungkinan bercampur dengan produk fisi, sedangkan pengotor berbentuk gas adalah O₂, N₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂, dan H₂ [4].

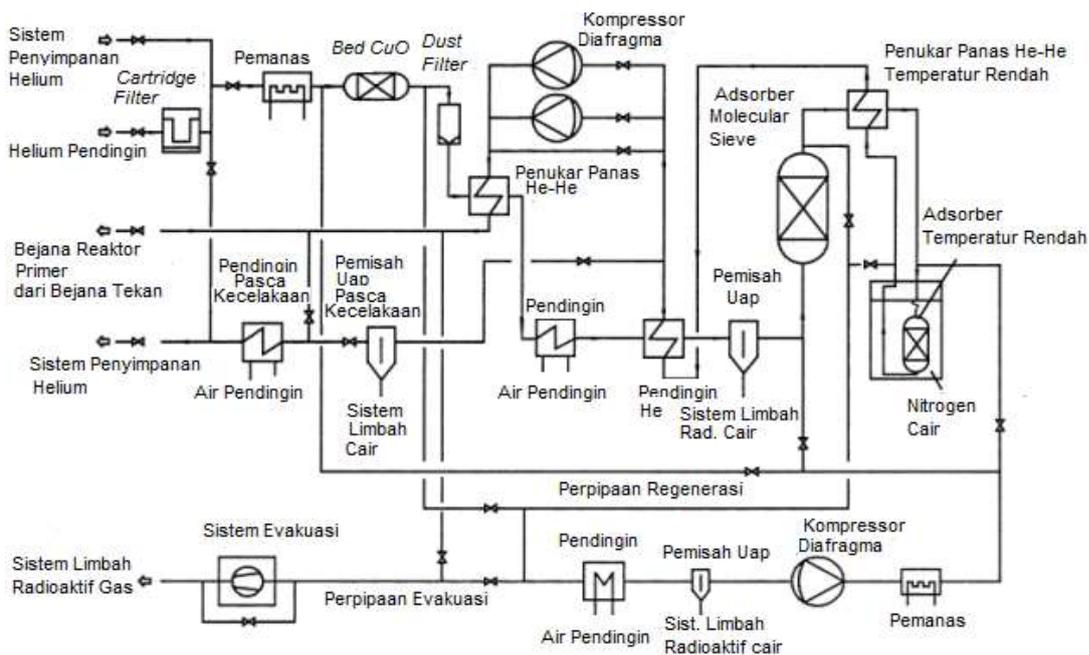
Sumber pengotor debu karbon terutama berasal dari gesekan bahan bakar di dalam teras (jika menggunakan bahan bakar *pebble*) [5] dan gesekan aliran gas helium dengan blok bahan bakar (jika menggunakan bahan bakar prismatic) [6]. Pengotor berbentuk gas berasal dari interaksi antara air (H₂O) atau udara dengan grafit [6,7]. H₂O dapat masuk ke sistem pendingin primer akibat adanya *water ingress*. *Water ingress* dapat terjadi pada saat kebocoran tabung *steam generator*. Sedangkan *Air ingress* (intrusi udara) dimungkinkan terjadi pada saat perawatan, karena pada saat pembongkaran komponen atau sistem pipa primer, dimungkinkan udara masuk ke pendingin primer cukup besar meskipun pada proses pembongkaran tersebut sudah digunakan peralatan pembungkus (*envelope*). Saat operasi, udara yang masuk berinteraksi dengan grafit. Udara yang masuk ke sistem pendingin primer mengandung H₂O meskipun

dalam jumlah kecil karena faktor kelembabannya[8]. Setelah berinteraksi dengan grafit di dalam teras, maka akan terbentuk gas pengotor CO, H₂, CO₂, dan CH₄, yang reaksinya adalah sebagai berikut :



Gas N₂ sudah ada dalam udara, sehingga ketika terjadi kebocoran, maka N₂ akan terbawa masuk ke pendingin.

Pengotor gas helium harus dibersihkan karena memberikan dampak negatif pada struktur, sistem dan komponen (SSK) reaktor. Pengotor debu karbon yang terbawa dalam aliran pendingin akan menempel pada permukaan SSK dan mengakibatkan penurunan kemampuan perpindahan panas. Jika pengotor debu karbon bercampur dengan produk fisi dan terdeposisi pada permukaan SSK maka dapat meningkatkan paparan radiasi ke lingkungan dan pekerja [10,11]. Gas pengotor pada pendingin helium jika melebihi batas yang



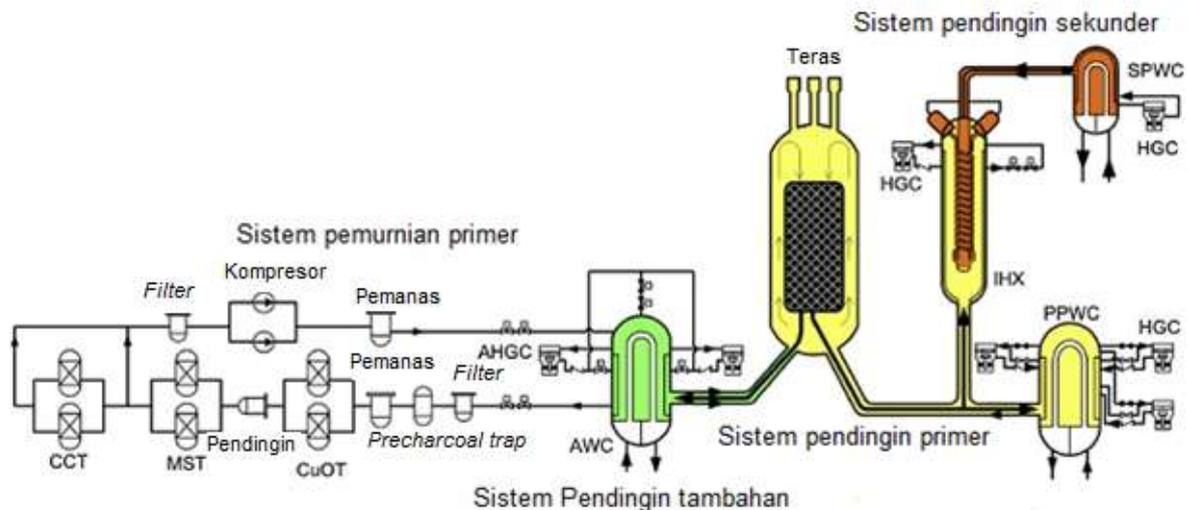
Gambar 1. Diagram Skematik Sistem Pemurnian Helium HTR-10 [17].

dijinkan, selain akan berdampak pada peningkatan paparan radiasi, juga menimbulkan korosi grafit, proses karburisasi dan dekarburisasi pada SSK [12].

Sistem Pemurnian Helium (SPH) pada reaktor HTGR mempunyai fungsi utama untuk mempertahankan/menjaga kualitas helium pendingin sesuai dengan persyaratan yang telah ditetapkan [13]. Sistem ini terdiri dari komponen utama: filter, kolom oksidasi CuO, kondensator (*water cooler*), kolom *molecular sieve* dan kolom karbon aktif temperatur sangat rendah (*cryogenic*). Pada SPH, filter atau *cartridge filter* berfungsi menyaring debu karbon, kolom oksidasi CuO berfungsi mengoksidasi CO menjadi CO₂ dan H₂ menjadi H₂O, dengan katalis CuO. Air atau H₂O akan dipisahkan dengan pengembunan menggunakan kondensator yang dipasang setelah kolom CuO. Kolom *molecular sieve* berfungsi menyerap CO₂, CH₄, dan H₂O [14]. Kolom karbon aktif yang dikondisikan beroperasi pada temperatur yang sangat rendah -180°C (kriogenik) berfungsi menyerap CH₄, gas mulia (Xe, Kr), H₂, N₂ dan produk fisi lainnya yang dihasilkan dari teras reaktor [15].

Saat ini, Indonesia berencana membangun dan mengoperasikan Reaktor

Daya Eksperimental (RDE) yang menggunakan reaktor jenis HTGR dan direncanakan berdaya kecil yaitu 10 MW_{th}. Beberapa reaktor HTGR daya kecil yang telah mempunyai pengalaman operasi adalah HTR-10 (*High Temperature Reactor 10 MW*) China dan HTTR (*High Temperature Engineering Tested Reactor*) Jepang. Masing-masing reaktor tersebut mempunyai SPH yang berbeda dengan batas kendali gas pengotor pada pendingin primer juga berbeda. Makalah ini bertujuan untuk mengetahui desain SPH yang optimum dan dapat digunakan sebagai masukan desain SPH RDE. Ketiga reaktor tersebut dikategorikan berdaya kecil karena dayanya < 300 MW_e. HTR-10 China dan RDE adalah reaktor yang berdaya 10 MW_{th}, sedangkan HTTR berdaya 30 MW_{th}. Sebagaimana HTR-10, RDE direncanakan menggunakan bahan bakar *pebble*, sedangkan HTTR menggunakan bahan bakar prismatik. Ketiga reaktor menggunakan sistem konversi energi tidak langsung (*indirect cycle*) [1,6], dengan penggunaan *steam generator/ intermediate heat exchanger* sebagai komponen pemindah panas dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder. Media dalam sistem pendingin primer adalah gas helium sedangkan pada sistem pendingin sekunder adalah air/*steam*.



Gambar 2. Diagram Skematik Sistem Pemurnian Helium HTTR-Jepang [18].

Keterangan:

- | | | | |
|------|-----------------------------------|------|---------------------------------------|
| CCT | : Cold Charcoal Trap | HGC | : Helium Gas Circulator |
| MST | : Molecular Sieve Trap | IHX | : Intermediate Heat Exchanger |
| CuOT | : Cooper Oxide Trap | PPWC | : Pressurized Water cooling System |
| AHGC | : Auxiliary Helium Gas Circulator | SPWC | : Secondary Pressurized Water Cooling |
| AWC | : Auxiliary Water Cooling System | | |

Komponen SPH yang dibahas hanya komponen utama pemurnian, tidak termasuk komponen bantu seperti *compressor*, *heater/cooler*, katup dan lain-lain. Laju alir (*mass flow rate*) pada *inlet* SPH adalah faktor penting kajian karena berdampak pada kemampuan SPH dalam membersihkan keseluruhan massa helium dalam pendingin reaktor selama rentang siklus operasi tertentu. Hasil purifikasi dari SPH akan dikembalikan ke sistem pendingin primer untuk disirkulasi kembali mengambil panas teras reaktor. Hasil kajian diharapkan dapat memberi masukan dalam perbaikan desain SPH RDE yang direncanakan akan dibangun di Indonesia

2. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan adalah kajian literatur berdasarkan pengalaman operasi HTR-10, HTTR dan evaluasi desain konseptual RDE. Kajian dilakukan terhadap SPH dari masing-masing reaktor. Analisis dilakukan terhadap beberapa parameter, dengan membandingkan masing-masing SPH tersebut, sehingga dapat diketahui desain SPH yang memiliki kelebihan dalam membatasi jumlah gas pengotor pada pendingin, sehingga keandalan SSK terjamin. Parameter kajian adalah komponen utama pemurnian yang digunakan, laju alir massa (*mass flow-rate*) pada aliran masuk ke SPH, proses regenerasi ketika komponen yang digunakan sudah mengalami kejenuhan dan batasan gas pengotor yang dipersyaratkan pada kondisi operasi normal.

3. SISTEM PEMURNIAN HELIUM (SPH) REAKTOR HTGR

3.1. SPH HTR-10 China

HTR-10 China adalah reaktor berdaya 10 MW_{th}, mencapai kritis pertama kali tahun 2000. Reaktor ini telah digunakan untuk eksperimen selama 3 tahun. Reaktor HTR-10 menggunakan siklus tak langsung, dengan pendingin primer adalah gas helium dan pendingin sekunder adalah air. HTR-10 menggunakan bahan bakar

pebble. Diagram skematik SPH pada HTR-10 ditunjukkan pada Gambar 1 [16,17].

Ada 5 komponen utama pada SPH HTR-10 yaitu filter (*cartridge filter*), kolom oksidator

CuO, *water cooler*, kolom *molecular sieve* dan karbon aktif kriogenik. Pada operasi normal, aliran *inlet* SPH adalah aliran *bypass* dari pendingin primer pada lokasi setelah *compressor/circulator* pada temperatur 250°C dan tekanan 3,0 MPa. SPH ini mengambil 5% volume pendingin primer untuk dimurnikan dengan laju alir sebesar 10,5 kg/jam. Konstanta pemurnian adalah sebesar 0,05 per jam. SPH mempunyai satu buah *train* yang terdiri dari rangkaian komponen untuk kondisi operasi normal dan kecelakaan. Kedua komponen ini menyatu dalam satu buah rangkaian (*train*), meskipun untuk komponen kecelakaan diberi nama komponen pasca kecelakaan (*post accident*) [17].

Tabel 1. Batasan Konsentrasi Gas Pengotor Pendingin HTR-10 pada Operasi Normal [17]

No.	Gas Pengotor	Batasan (cm ³ .m ⁻³)
1	H ₂ O	≤ 0,2
2	CO	≤ 3,0
3	N ₂	≤ 1,0
4	H ₂	≤ 3,0
5	CH ₄	≤ 1,0

Pada operasi normal, batasan maksimum gas pengotor yang diijinkan pada pendingin HTR-10 ditunjukkan pada Tabel 1. Setelah melalui SPH, gas helium yang telah bersih akan diinjeksikan kembali ke pendingin primer. Temperatur gas helium keluaran SPH akan dinaikkan dengan *electrical heater* dari -160°C menjadi 185°C [17]. Titik pengambilan aliran masuk ke SPH adalah titik setelah *steam generator* dan titik penginjeksian adalah sebelum *steam generator*.

Regenerasi dilakukan setelah mengalami kejenuhan dan berdasar pengalaman setelah beroperasi 2000 jam [17]. Proses ini akan dilakukan jika pengukuran keluaran SPH batasnya terlampaui. Jika terjadi kecelakaan kebocoran air, maka aliran akan di *bypass* ke komponen pasca kecelakaan yang terdiri dari pendingin air (kondensor) dan *moisture separator* (pemisah uap). Air yang terpisahkan kemudian dikelola sebagai limbah cair. Gas helium bersih kemudian dialirkan kembali ke

train normal operasi untuk membersihkan sisa gas pengotor.

3.2. SPH HTTR-Jepang

HTTR Jepang adalah reaktor berbasis teknologi HTGR dengan daya 30 MW_{th}, dengan

Tabel 2. Batasan Konsentrasi Gas Pengotor Pendingin HTTR pada Operasi Normal 900°C [18]

No.	Pengotor	Batasan (cm ³ .m ⁻³)
1	H ₂ O	≤ 0,2
2	CO	≤ 3,0
3	H ₂	≤ 3,0
4	CO ₂	≤ 0,6

temperatur keluaran teras mencapai 950°C [18]. Bahan bakar yang digunakan adalah jenis prismatik [19,20]. Gas pengotor yang terjadi

pada pendingin primer adalah O₂, N₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂, dan H₂ [18]. Gas ini berasal dari reaksi air/udara yang masuk ke pendingin primer dengan komponen grafit dari

Tabel 3. Batasan Konsentrasi Gas Pengotor pada Pendingin Primer RDE pada Operasi Normal [25]

No.	Pengotor	Batasan (cm ³ .m ⁻³)
1	H ₂ O	≤ 0,2
2	CO	≤ 3
3	N ₂	≤ 0,2
4	H ₂	≤ 3
5	CH ₄	≤ 0,5
6	CO ₂	≤ 0,6
7	O ₂	≤ 0,02

teras reaktor, dan insulasi termal pada *coaxial duct* (bejana penghubung teras dengan komponen primer) [21]. Pada HTTR, gas pengotor harus diantisipasi untuk mencegah korosi grafit di teras dan proses dekarburisasi di tabung *intermediate heat exchanger* (IHX) yang terbuat dari bahan Hastelloy-XR dan beroperasi pada temperatur tinggi [22,23]. SPH pada HTTR dinamakan *Primary Helium Purification System* (PHPS) seperti ditunjukkan pada Gambar 2. PHPS terdiri dari sistem pemurnian dan regenerasi.

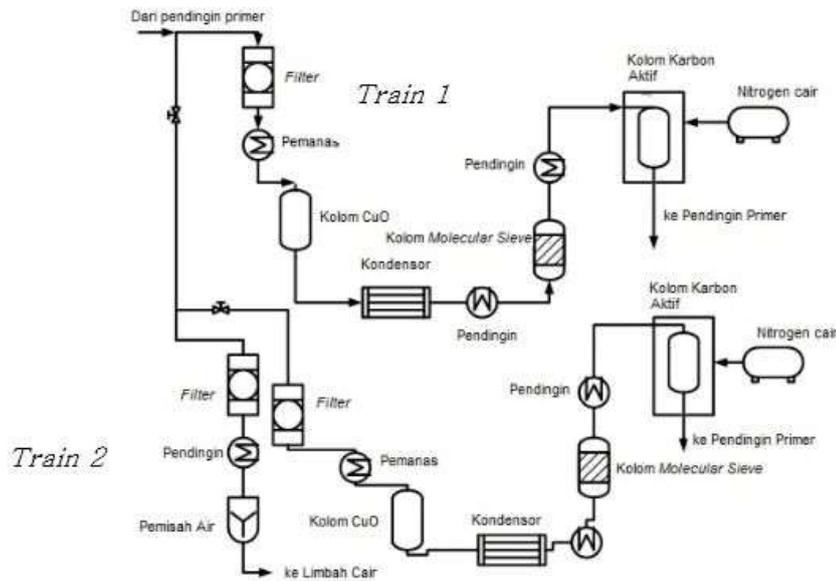
Komponen utama pada PHPS adalah filter, *copper oxide trap* (CuOT), *molecular sieve trap* (CuOT), *cooler/water cooler*, *cold charcoal trap* (CCT) [18]. Pada PHPS dilengkapi dengan *precharcoal trap*, setelah filter pertama. Kedua komponen tersebut menyaring debu grafit yang terbawa dalam pendingin. Kolom CuOT diisi dengan pelet CuO yang berfungsi mengoksidasi CO menjadi CO₂ dan H₂ menjadi H₂O, kedua pengotor ini akan diadsorpsi oleh *molecular sieve*. Untuk

meningkatkan proses adsorpsi, maka pada aliran sebelum masuk ke *molecular sieve*, didinginkan dengan *cooler/water cooler* (pendingin). Tahapan terakhir pada PHPS adalah proses adsorpsi gas N₂ dan O₂. Proses ini dilakukan oleh kolom *charcoal* yang dialiri nitrogen cair untuk mendinginkan, sehingga temperaturnya menjadi -180°C. Batas gas pengotor yang diijinkan pada operasi normal (900°C) reaktor HTTR Jepang ditunjukkan pada Tabel 2.

Pada masing-masing komponen PHPS dipasang komponen *redundancy* untuk proses regenerasi. Ketika satu komponen diregenerasi maka aliran dipindahkan ke komponen siaga (*standby*).

3.3. Desain Konseptual SPH RDE

Saat ini, Indonesia berencana membangun dan mengoperasikan RDE, dengan daya reaktor 10 MW_{th} (3 MW_e), didesain berbasis teknologi HTGR, menggunakan bahan bakar *pebble* dan siklus tak langsung. Dari hasil analisis teknologi berdasar aspek strategi nasional dan aspek tekno ekonomi, pada studi yang telah dilakukan sebelumnya, HTGR yang menggunakan bahan bakar *pebble* memiliki nilai lebih unggul dibanding HTGR yang menggunakan bahan bakar prismatik. Analisis yang telah dilakukan tersebut dengan membuat nilai bobot, dan untuk aspek strategi nasional meliputi tujuan PLTN dibangun, *rating* daya pembangkit dan ketersediaan teknologi fabrikasi elemen bakar. Sedangkan aspek tekno-ekonomi meliputi keselamatan umum, teknologi teruji, kinerja pembangkit, kemudahan produksi elemen bakar, umur desain, interval siklus pengisian bahan bakar, efisiensi thermal, penyederhaan, kemudahan operasi dan perawatan serta proteksi fisik [24]. Berdasar desain konseptual RDE yang telah dibuat oleh BATAN, gas helium digunakan sebagai pendingin primer dan air digunakan sebagai pendingin sekunder [25,26]. Panas pendingin primer dipindahkan ke pendingin sekunder melalui *steam generator*. SPH RDE terdiri dari dua buah *train* yaitu *train* pertama digunakan untuk operasi normal dan *train* kedua digunakan untuk kondisi kecelakaan. *Train* SPH RDE juga mempunyai sistem regenerasi. Desain SPH pada RDE ditunjukkan pada Gambar 3 [25].



Gambar 3. Desain Sistem Pemurnian Helium pada Reaktor RDE [25].

Komponen utama yang digunakan pada SPH RDE adalah filter, kolom CuO, kolom *molecular sieve* dan *bed* karbon aktif kriogenik. Batasan konsentrasi gas pengotor

dari SPH RDE ditunjukkan pada Tabel 3 dan spesifikasi teknis *train* pertama dan kedua SPH RDE ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi Teknis *Train* Pertama dan Kedua SPH RDE [25,27]

<i>Train 1</i>		
Parameter	:	Nilai
Tekanan inlet	:	1 – 39 bar
Temperatur inlet	:	-180 s.d 300 °C
Laju fraksi pemurnian dari seluruh volum inventori (konstanta purifikasi)	:	0,05/jam
Laju aliran masa pemurnian helium pada operasi normal (250°C, 30 bar)	:	~ 10,5 kg/jam
Satu siklus operasi (sebelum regenerasi)	:	1000 jam
<i>Train 2</i>		
Tekanan <i>inlet</i>	:	1–39 bar
Temperatur <i>inlet</i>	:	30–300 °C
Laju pemurnian dari seluruh inventori (konstanta purifikasi)	:	1/jam
Laju aliran masa pemurnian	:	~ 245 kg/jam

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengotor pada pendingin reaktor berbasis desain HTGR yang berbentuk partikel padatan ataupun gas harus dibersihkan karena berdampak negatif pada SSK reaktor. Partikel debu karbon yang bercampur dengan produk fisi jika menempel pada SSK akan meningkatkan paparan radiasi ke lingkungan, sehingga hal ini harus dihindari. Proses

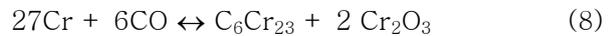
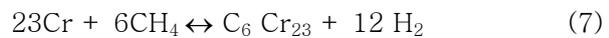
pembersihan dilakukan dengan penyaringan pada SPH. Berdasarkan pengalaman operasi HTGR di dunia, debu karbon yang dihasilkan dari HTGR ukurannya bervariasi dari 0,1 mikron sampai dengan 10 mikron [6,7]. Filter yang dapat digunakan dapat berupa filter *High Efficiency Particulate Air* (HEPA) atau *cartridge filter* yang berisi *microporous filter*. Pada desain HTGR dengan siklus konversi energi langsung (*direct cycle*) seperti *Pebble*

Bed Modular Reactor (PBMR), sebelum proses penyaringan dengan HEPA, debu berukuran besar (5-10 mikron) akan dipisahkan terlebih dahulu dengan *cyclone separator*. Sedangkan pada reaktor HTGR berdaya kecil seperti HTR-10 China dan HTTR Jepang dengan siklus tidak langsung, tidak membutuhkan *cyclone separator* terlebih dahulu, karena ukuran debu karbon yang terjadi lebih halus, dengan ukuran 0,1-5 mikron [7,17,18].

Pada desain HTTR yang menggunakan bahan bakar prismatic, debu karbon yang dihasilkan jauh lebih sedikit dibandingkan dengan HTGR yang menggunakan bahan bakar *pebble*. Debu yang terbawa dalam aliran pendingin biasanya bercampur dengan produk fisi. Berdasarkan pengalaman operasi HTR-10 China, debu karbon yang dihasilkan adalah sekitar 2,74 kg/tahun [7], sedangkan debu karbon yang dihasilkan oleh HTTR Jepang adalah 2,5 kg per tahun [17]. Pada SPH kedua reaktor ini debu karbon dibersihkan dengan *cartridge filter*. Untuk mengantisipasi debu halus dan produk fisi yang masih lolos dari *cartridge filter*, pada SPH HTTR ditambahkan komponen *precharcoal trap*. Desain SPH RDE sudah mengantisipasi adanya kemungkinan pengotor partikulat, baik itu debu karbon ataupun produk fisi dengan komponen filter. *Cartridge filter* ataupun filter dipasang pada tahap pertama SPH RDE. Produk fisi yang masih lolos dari penyaringan (filter) akan diadsorpsi menggunakan karbon aktif kondisi kriogenik pada *stage* paling akhir SPH.

Pengotor berbentuk gas, seperti O₂ akan berdampak pada terjadinya korosi grafit di teras [6]. Komponen yang terbuat dari bahan grafit di teras adalah bahan bakar dan reflektor. Jika material grafit mengalami korosi maka material tersebut akan menjadi rapuh. Adanya gas oksigen dalam pendingin HTGR dapat diukur berdasarkan nilai *oxygen partial pressure*-nya. Nilai ini harus kecil untuk menjamin tidak terjadi korosi grafit. Seperti ditunjukkan pada pada Tabel 1, bahwa batasan maksimum gas pengotor yang diijinkan pada pendingin HTR-10, hanya ada 5 pengotor yang diamati, yaitu H₂O, CO, N₂, H₂ dan CH₄. Gas CH₄ dan CO dalam helium akan menyebabkan reaksi karburasi material SSK reaktor. Reaksi karburasi terjadi jika unsur karbon masuk ke dalam material dan

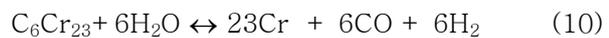
membentuk senyawa karbida (C₆Cr₂₃) [6], sesuai dengan reaksi (7) dan (8):



Senyawa karbida yang terbentuk akan mengakibatkan logam menjadi rapuh sehingga kekuatan mekaniknya menurun. Jika terdapat beban *stress* akibat tekanan dan didukung adanya temperatur tinggi operasi reaktor, akan menyebabkan terjadinya korosi retak (*stress corrosion cracking*). Uap H₂O memberikan dampak yang berbeda dibanding CH₄ ataupun CO terhadap logam, yaitu memberikan dampak dekarburisasi pada material SSK. Proses dekarburisasi yang diakibatkan karena reaksi H₂O dengan C pada logam, ditunjukkan pada reaksi (9):



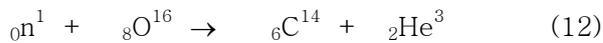
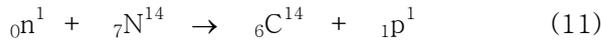
Kedua senyawa ini mengakibatkan senyawa karbida (kromium karbida/kandungan karbon dalam C₆Cr₂₃) yang terbentuk pada proses karburasi menjadi tidak stabil dan akan terlarut ke dalam pendingin, seperti ditunjukkan pada reaksi (10):



Ketika unsur C banyak yang larut ke pendingin maka mengakibatkan kekuatan material berkurang. Korosi grafit terjadi ketika H₂O terbawa sampai ke teras. Di dalam teras, H₂O akan berinteraksi dengan grafit sehingga menghasilkan CO dan CO₂. Jika kondisi ini berkelanjutan secara terus menerus maka akan terjadi kerapuhan material grafit.

Peningkatan paparan radiasi ke lingkungan selain diakibatkan karena produk fisi yang terlepas ke pendingin, dimungkinkan pula adanya C-14 (⁶C¹⁴). Adanya C-14 dalam sistem pendingin primer harus diantisipasi karena akan menimbulkan dampak radiologis pada personil saat melakukan perawatan ataupun perbaikan komponen sistem primer. Terbentuknya C-14 yang merupakan pemancar β dengan umur paruh 5730 tahun merupakan hasil reaksi pengotor N₂ dan O₂ dengan neutron dalam teras. N₂ dan O₂ bereaksi dengan neutron dalam teras

menghasilkan C-14 menurut reaksi (11) dan (12):



Dengan meminimalkan adanya pengotor N₂ dan O₂ dalam pendingin maka penambahan paparan radiasi dapat dicegah.

Pada Tabel 2, pemantauan kandungan pengotor pada pendingin HTTR pada operasi normal, ada 4 pengotor yang dipantau, yaitu H₂O, CO, H₂, CO₂. Keempat pengotor ini harus dijaga pada nilai dibawah batas yang ditentukan agar korosi grafit di teras reaktor dapat dicegah [18]. Sedangkan pengotor yang lain seperti CH₄, N₂ dan O₂ tidak ditunjukkan pada tabel. Hal ini menunjukkan bahwa pengotor tersebut harus tidak ada dalam pendingin. Reaktor HTTR adalah reaktor berbahan bakar prismatic, dan proses penggantian bahan bakar berbeda dengan *pebble*. Tidak ada gesekan antar bahan bakar ketika proses *refuelling* (pengisian bahan bakar) sehingga debu karbon yang dihasilkan jauh lebih sedikit. Proses penggantian bahan bakar prismatic cenderung lebih mampu mengantisipasi adanya kebocoran udara, karena sistem perangkat bahan bakar lebih kompak, dan penggantian bahan bakar dilakukan terhadap satu perangkat utuh.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, bahwa pada HTTR, setiap komponen telah disiapkan komponen regenerasinya, sehingga jika terjadi kejenuhan maka aliran akan dipindahkan secara langsung ke komponen siaga. Dengan kondisi seperti ini maka proses regenerasi tidak mengganggu fungsi SPH secara keseluruhan. Sedangkan pada HTR-10, proses regenerasi dilakukan dengan memindahkan seluruh aliran ke *train* yang siaga, tidak per komponen. Alat pengukur kandungan pengotor baik pada HTR-10, RDE dan HTTR meliputi: gas kromatografi, *infrared optical analyzer*, *dew point analyzer* dan *ion chamber spectrometer*. Gas kromatografi berfungsi untuk mengukur gas pengotor, *infrared optical* untuk mengukur gas CO dan CO₂, *dew point analyzer* untuk mengukur kandungan H₂O sedangkan *ion chamber spectrometer* berfungsi untuk mengukur produk gas fisi yang terbawa dalam aliran pendingin.

Berdasarkan Gambar 3, SPH RDE mempunyai 2 buah *train*. Pada *train* operasi normal ada desain *redundancy* rangkaian. Saat terjadi kejenuhan pada *train* yang sedang beroperasi (diindikasikan dengan proses pemurnian yang tidak efektif lagi), yang mana dapat dideteksi dengan konsentrasi pengotor pada keluaran SPH, maka *train* yang sedang beroperasi harus diregenerasi. Berdasarkan desain SPH RDE, maka proses regenerasi akan dilakukan setelah 1000 jam operasi secara berkesinambungan. Pada saat regenerasi maka aliran dipindahkan ke *train* yang sedang siaga. Proses regenerasi akan dilakukan per komponen pada SPH. Filter yang telah jenuh diregenerasi dengan penggantian, oksidator CuO diregenerasi dengan injeksi oksigen, kolom *molecular sieve* diregenerasi dengan menaikkan temperatur, demikian pula kolom karbon aktif dengan kondisi kriogenik. Lepas gas hasil regenerasi akan ditampung dalam sistem evakuasi gas, dan dikumpulkan serta dikelola sebagai limbah gas aktifitas tinggi.

Berdasarkan Tabel 4, diketahui bahwa *train* ini mengambil (sodetan) volume sistem pendingin primer sebesar 5%, dengan konstanta purifikasi sebesar 0,05 per jam. Jumlah total masa helium pada pendingin primer adalah 210 kg [25], sehingga dengan konstanta pemurnian sebesar 0,05 maka selama 20 jam seluruh gas helium yang ada pada pendingin telah termurnikan. Laju alir pendingin primer RDE adalah sebesar 4,3 kg/detik dan laju aliran masa purifikasi adalah 10,5 kg/jam. Kisaran temperatur pada *train* pertama adalah -180 s.d 300°C, temperatur -180°C dibutuhkan oleh *bed* karbon aktif, sedangkan temperatur 300°C merupakan temperatur masuk ke SPH.

Train kedua adalah *train* yang digunakan pada saat kecelakaan kebocoran air. Kecelakaan kebocoran air adalah masuknya uap air ke pendingin primer, diantaranya akibat pecahnya tabung *steam generator*. Pada saat kecelakaan *steam generator tube rupture* (SGTR), diasumsikan terjadi pecah tabung *steam generator* dengan diameter tertentu, sehingga ada sejumlah *steam* yang terdifusi masuk ke pendingin primer. Pada kejadian ini, reaktor *scram* dan secara manual proses purifikasi dipindahkan dari *train* satu ke *train* kedua. Pada *train* kedua, *steam* didinginkan dengan

kondensator, untuk mengembunkan uap air yang terjadi, selanjutnya air dipisahkan dengan *water separator* dan diolah sebagai limbah cair. Jika terjadi kecelakaan SGTR, beberapa

kilogram massa *steam* dapat masuk ke teras, dan setelah 6 jam terdifusi ke struktur grafit di teras maka dapat mengakibatkan terjadinya korosi grafit.

Tabel 5. Data Perbandingan SPH HTR China HTTR Jepang dan RDE [17,18,25]

Parameter	HTR-10	HTTR	RDE
Aliran bypass <i>inlet</i> dari pendingin primer	5%	10%	5%
Kisaran temperatur operasi	-160°C sampai 300°C	-180°C sampai 300°C	-180°C sampai 300°C
Kisaran tekanan operasi	1-30 bar	1-41 bar	1-39 bar
Laju aliran masuk	10,5 kg/jam	24,3 kg/jam	10,5 kg/jam
Batas gas pengotor pada pendingin saat operasi normal	$H_2O \leq 0,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $CO \leq 3,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; $N_2 \leq 1,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; $H_2 \leq 3,0$; $CH_4 \leq 1,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	$H_2O \leq 0,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $CO \leq 3,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; $H_2 \leq 3,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; $CO_2 \leq 0,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	$H_2O \leq 0,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $CO \leq 3,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; $N_2 \leq 0,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; $H_2 \leq 3,0$; $CH_4 \leq 0,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $CO_2 \leq 0,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $O_2 \leq 0,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Komponen pemurnian utama	<i>cartridge filter</i> , kolom CuO, kolom <i>molecular sieve</i> , karbon aktif kriogenik	filter, <i>pre charcoal trap</i> , CuOT (<i>copper oxide trap</i>), MST (<i>molecular sieve trap</i>), CCT (<i>cold charcoal trap</i>)	<i>cartridge filter</i> , kolom CuO, kolom <i>molecular sieve</i> , karbon aktif kriogenik
Proses regenerasi	Menggunakan <i>train stand by</i>	Menggunakan komponen <i>stand by</i>	Menggunakan <i>train stand by</i>
Masa satu siklus (sebelum regenerasi)	2000 jam	50 hari (~1200 jam)	1000 jam

Terdapat tujuh pengotor yang dipantau setiap saat pada pendingin primer RDE, yaitu CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, O₂ dan N₂, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4. Pemantauan terhadap pengotor ini menunjukkan bahwa kendali kualitas pendingin primer RDE dijaga dengan lebih ketat.

Baik pada HTR-10 dan HTTR menggunakan komponen utama yang sama untuk membersihkan pengotor pada pendinginnya. Perbandingan spesifikasi SPH pada HTR-10 dan HTTR ditunjukkan pada Tabel 5. Komponen-komponen itu adalah filter, kolom oksidator CuO, kolom *molecular sieve* dan kolom karbon aktif kondisi kriogenik.

Pada Tabel 5 terlihat bahwa desain SPH HTTR Jepang dilengkapi *precharcoal trap* sebelum aliran masuk ke kolom CuOT, meskipun debu karbon yang dihasilkan dari pendinginnya jauh lebih sedikit dibandingkan HTR-10, karena berbahan bakar prismatik. Fungsi *precharcoal trap* adalah menyerap terlebih dahulu adanya debu yang sangat halus yang masih terlepas dari *cartridge filter*. Debu halus ini berukuran lebih dari 0,1 mikron, dan dimungkinkan masih terlepas dari *cartridge filter*. Selain itu pada SPH HTTR, temperatur kolom karbon aktif (CCT, *Cryogenic Charcoal*

Trap) pada *stage* terakhir sistem pemurnian menggunakan temperatur nitrogen cair sampai dengan -180°C. Temperatur ini lebih rendah 20°C dibandingkan pada SPH HTR-10 China. Dengan temperatur yang lebih rendah porositas karbon aktif akan semakin mengecil sehingga daya tangkap terhadap N₂ dan O₂ akan semakin bagus. Oleh karena itu efisiensi penangkapan N₂ dan O₂ semakin tinggi. Ukuran pengotor N₂ dan O₂ adalah paling kecil diantara gas-gas pengotor yang ada dalam pendingin HTGR, sehingga peran temperatur pada *bed* karbon aktif akan sangat menentukan efisiensi adsorpsinya.

Berdasar kelebihan desain SPH HTTR Jepang tersebut, maka jika diinginkan pembersihan debu lebih optimal, diperlukan tambahan komponen *precharcoal trap* pada SPH RDE, karena debu halus yang berukuran lebih kecil dari 0,1 mikron dimungkinkan terlepas dari *cartridge filter*. SPH RDE sudah mengakomodasi temperatur kriogenik untuk kolom karbon aktif sampai dengan -180°C, sehingga proses adsorpsi terhadap N₂ dan O₂ sudah optimal.

Berdasar batasan gas pengotor pendingin pada saat operasi normal, mengindikasikan bahwa HTTR Jepang lebih ketat dalam pemantauannya, terutama

terhadap pengotor N_2 , CH_4 dan O_2 . Ketiga pengotor ini harus tidak ada dalam pendingin (bernilai 0). Sedangkan pada HTR-10 China, pengotor CH_4 masih diperbolehkan sampai dengan konsentrasi $1,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Pada SPH RDE, tujuh gas pengotor pada sistem pendingin yang masih diperbolehkan sampai batas tertentu, yaitu $O_2 \leq 0,02$; $N_2 \leq 0,2$; $H_2O \leq 0,2$; $CH_4 \leq 0,5$; $CO \leq 3,0$ $CO_2 \leq 0,6$; dan $H_2 \leq 3,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Jika menginginkan pengendalian gas pengotor yang lebih ketat, batas pengotor yang ditetapkan pada desain SPH RDE dapat mengikuti persyaratan desain SPH HTTR-Jepang.

Berdasar lamanya satu siklus operasi masing-masing SPH sampai proses regenerasi maka dapat diketahui bahwa HTR-10 China mempunyai waktu siklus yang lebih panjang yaitu 2000 jam. Sedangkan SPH HTTR dan RDE hampir sama yaitu 1200 jam dan 1000 jam. Lama satu siklus operasi desain SPH ditentukan juga oleh adanya kebocoran udara/air ke sistem pendingin. Proses regenerasi SPH dapat dilakukan ketika hasil pengukuran masukan dan keluaran sistem tidak ada perbedaan.

KESIMPULAN

Sistem pemurnian helium (SPH) pada reaktor HTGR berdaya kecil berfungsi menjaga kualitas pendingin agar dampak pengotor terhadap SSK minimal. HTR-10 menggunakan SPH dengan satu *train* yang digunakan pada operasi normal dan kecelakaan (*post accident*). Sedang pada HTTR, sistem SPH nya menggunakan dua *train*, yang mana *train* pertama untuk operasi normal dan *train* kedua untuk kondisi kecelakaan. Pada desain konseptual RDE, sistem SPH didesain menggunakan dua buah *train*, satu *train* untuk operasi normal dan satu *train* yang lain untuk kondisi kecelakaan. Komponen utama yang sama digunakan pada SPH ketiga reaktor adalah filter, kolom oksidator CuO , kolom *molecular sieve* dan *bed* karbon aktif pada temperatur kriogenik. Namun, diantara ketiga desain SPH HTGR tersebut, SPH HTTR mempunyai kelebihan yaitu dilengkapi dengan *precharcoal trap* sebelum aliran masuk ke kolom $CuOT$, untuk menyerap debu halus dibawah 0,1 mikron,

sehingga penyerapan debu lebih optimal. Selain itu pada HTTR juga mempunyai batasan yang lebih ketat dalam pemantauan kandungan pengotor pada operasi normal yaitu tidak boleh adanya pengotor N_2 , CH_4 , dan O_2 pada operasi normal. Kedua parameter ini dapat diadopsi pada desain SPH RDE agar dampak pengotor terhadap SSK dapat diminimalisasi.

DAFTAR ACUAN

- [1]. J.M. Beck and L.F. Pincock. "High Temperature Gas-Cooled Reactors Lessons Learned Applicable to The Next Generation Nuclear Plant". Prepared For The U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy, USA, 2011.
- [2]. P. Supriatna. "Kajian Awal Pemurnian Gas He Pendingin Primer Reaktor Kogenerasi", *Prosiding PPI-PDIPTN*, Buku I, Yogyakarta, 14 Juli 2009.
- [3]. W.R. Johnson, *et al.* "Interaction of Metals with Primary Coolant Impurities: Comparison of Steam-Cycle and Advanced HTGRs". *Specialist Meeting on High Temperature Metallic Materials for Application in Gas Cooled Reactors*, 1981.
- [4]. Sriyono. "Kajian Pengaruh Korosi Erosi Akibat Adanya Partikel Laden Karbon Terhadap Keselamatan Pengoperasian HTGR". *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir*, Jakarta, 2009.
- [5]. B. Schlogl. "Graphite Dust in AVR", Presented at Paul Scherer Institute, Switzerland, 2009.
- [6]. K. Natesan, A. Purohit, S.W. Tan. "Material Behavior in HTGR Environments". U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, NUREG/CR-6824 ANL-0237, 2003.
- [7]. M.P. Kissane, F.P. Zhang, M.W. Reeks. "Dust in HTRs: Its Nature and Improving Prediction of Its Resuspension", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 251, 2012, pp. 301-305.
- [8]. D.V. Isakov. "Infrared Detection of Water Ingress in A Composite Laminate Crevice Based on Room Temperature Evaporation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 86, 2015, pp 39-42.
- [9]. Z. Yanhua, S. Lei, W. Yan. "Water-Ingress Analysis for the 200 MWe Pebble-Bed Modular High Temperature Gas-cooled Reactor". *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, 2010, 3095-3107.
- [10]. Sriyono, I. Karlina, P. Supriatna, "Analisis Proses Filtrasi Pada Sistem Pendingin RGTT200K", *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir*, Jakarta, 2012.
- [11]. Sriyono, "Analisis dan Pemodelan Filter HEPA Pada Sistem Pemurnian Helium RGTT200K", *Prosiding dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Yogyakarta, Juli 2011.
- [12]. Sumijanto. "Kajian Dampak Gas Pengotor Pendingin Primer Terhadap Integritas Material Struktur RGTT". *Majalah Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir Sigma Epsilon*, Vol. 14, No. 2, Mei 2010.

- [13]. Sriyono dan Febrianto. "Desain Konseptual Sistem Pemurnian Helium Pada RGTT200K untuk Menjamin Keselamatan Pengoperasiannya", *Majalah Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir Sigma Epsilon*, Vol. 15, No. 3, Agustus 2011.
- [14]. D. Kaczorowski and J. Chapovaloff. "Material Degradation in High Temperature The AREVA-NP Corrosion Loop", *Proceedings HTR2006: 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, Johannesburg, South Africa, 2006.
- [15]. I. Mutoh, *et al.* "Corrosion Behaviour of Ni-Ba₃Se Superalloys at 1373K in Simulated HTGR Impure Helium Gas Environment". *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 207, 2013.
- [16]. Z. Wu. "The Design Feature of HTR-10". *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 218, 2002.
- [17]. M.S. Yao. *et al.* "The Helium Purification System of HTR-10". *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 218, 2002.
- [18]. S. Hamamoto, *et al.* "Investigation of Chemical Characteristics of Primary Helium Gas Coolant of HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor)". *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 271, 2014.
- [19]. T. Furusawa, *et al.* "Cooling System Design and Structural Integrity Evaluation" *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 233, 2004, pp. 113-124.
- [20]. M. Ishihara, *et al.* "Principle Design and data of Graphite Components". *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 233, 2004.
- [21]. Y. Tachibana, *et al.* "Structural Design of High Temperature Metallic Components". *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 233, 2004.
- [22]. L.W. Graham. "Corrosion of Metallic Materials in HTR Helium Environments". *Journal of Materials*, Vol. 171, 1990.
- [23]. T. Takeda. "Research and Development on Prevention of Air Ingress During The Primary Pipe Rupture Accident in HTTR". *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 233, 2004.
- [24]. S. Alimah, E. Dewita, S. Ariyanto, "Analisis Komparasi HTGR Tipe Prismatik dan Pebble Bed". *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol. 16, No.1, Juni 2014.
- [25]. Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir – BATAN. "Spesifikasi Teknis Reaktor Daya Eksperimental (RDE)". Dokumen No: DT 002.KRN.2014, 2014.
- [26]. Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir – BATAN. "Justifikasi Teknis Pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE)". Dokumen No: DT 001. KRN.2014, 2014.
- [27]. Siemens AG-KWU, "Technical Design Features HTR Module, Chapter 2: Helium Purification System" (as Indonesian-RDE Design Reference), Interatom, Germany, 1985.