

## KAJIAN DAMPAK GAS PENGOTOR PENDINGIN PRIMER TERHADAP INTEGRITAS MATERIAL STRUKTUR R G T T

Oleh

Sumijanto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN

### ABSTRAK

**KAJIAN DAMPAK GAS PENGOTOR PENDINGIN PRIMER TERHADAP INTEGRITAS MATERIAL STRUKTUR RGTT.** Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (RGTT) adalah reaktor daya yang kinerja dan ketersediaan teknologinya memungkinkan untuk diimplementasikan di Indonesia dalam waktu sepuluh tahun ke depan. Namun dalam operasi RGTT helium sebagai pendingin primer tidak dapat terlepas dari gas pengotor yang masuk didalamnya, sehingga akan menimbulkan berbagai masalah keselamatan dan keandalan operasi. Dalam makalah ini dibahas analisis dampak pengotor pendingin primer terhadap integritas material struktur RGTT yang mencakup analisis sumber pengotor, interaksi pengotor dengan material struktur RGTT, serta strategi teknologi pengendalian pengotor dalam sistem pendingin primer. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui dampak dari gas pengotor pendingin primer untuk digunakan sebagai pertimbangan dalam pembuatan desain konseptual sistem kontrol inventori helium RGTT. Kajian dilakukan dengan studi inventori pengotor helium, dampak dan teknik pengendaliannya dalam sistem primer. Dari kajian diperoleh data bahwa sumber gas pengotor bermula dari kebocoran udara, jumlah udara maksimal yang diperbolehkan masuk 12 vppm, proses degradasi material struktur melalui reaksi oksidasi, karburasi dan dekarburasi, sedangkan strategi pengendalian gas pengotor dilakukan dengan memperhatikan karakteristik gas pengotor, teknologi proses dan adsorben yang digunakan.

Kata kunci: RGTT, pengotor helium, integritas material, kontrol inventori

### ABSTRACT

**REVIEW OF THE EFFECT OF GAS IMPURITIES IN PRIMARY COOLANT STRUCTURE MATERIAL OF RGTT.** High Temperature Gas-cooled Reactor is one type of nuclear power plants which the performance and technology availability very simple. Based on the performance and the present technology availability, high temperature gas-cooled reactor has possibility to be implemented in Indonesia within the next ten years. In operation condition helium as primary coolant can not be separated from the incoming gas impurities in it, so it will cause problems of safety and operating reliability. In this paper analyzes the impact of impurities on the integrity of the primary coolant material RGTT structures that include an analysis of sources of impurities, the interaction of impurities with RGTT structural material, and the strategy of fouling control technology in the primary cooling system. The purpose of this research is to obtain the effect of gas impurities in the primary coolant to be used in conceptual design RGTT helium inventory control system. The analysis was conducted by reviewing the inventory of helium impurities, impact and control techniques in the primary system. From the analysis of data showed that the source of the gas originated from the leakage of air impurities, the maximum amount of air allowed to enter 12 vppm, the process of structural material degradation through oxidation, carburization and decarburization, while the impurity gas control strategies taking into account the characteristics of impurity gases, process and adsorbent technology used.

Keywords: RGTT, helium impurities, integrity of materials, inventory control recuperator, IHX, SHX

### PENDAHULUAN

Melalui Perpres RI No. 5 Tahun 2006<sup>[1]</sup>, Pemerintah telah menetapkan sasaran bauran energi primer optimal tahun 2025 yang memberi kesempatan kepada sumber energi baru dan terbarukan (biomassa, nuklir, tenaga air, tenaga surya, tenaga angin) untuk berkontribusi lebih dari 5% dari penyediaan energi listrik di Indonesia. Kebijakan pemerintah tersebut memberi peluang dan tantangan terhadap penerapan dan pengembangan reaktor nuklir di Indonesia. Reaktor

berpendingin Gas Temperatur Tinggi (RGTT) adalah reaktor daya yang beroperasi pada tekanan rendah (7 Mpa) dan suhu 950 °C, menggunakan fluida pendingin helium yang *inert* sehingga hal tersebut tidak menuntut penggunaan material dan teknologi yang spesifik<sup>[2]</sup>. Implementasi RGTT ini merupakan salah satu opsi dalam diversifikasi pemenuhan kebutuhan energi listrik paska pembangunan PLTN pertama (PLTN PWR) untuk daerah Jawa Madura dan Bali (JAMALI) apabila jadi dilaksanakan. Penyiapan implementasi pembangunan RGTT tersebut dilakukan melalui berbagai tahapan perencanaan yang meliputi

desain konseptual (*conceptual design*), desain dasar (*basic design*), desain detail (*detail design*), instalasi demonstrasi (*plant demonstration*) atau prototipe, dan operasi komersial (*comercial operation*)<sup>[3]</sup>. Desain konseptual adalah tahapan awal dari tahap pembangunan yang merupakan usaha untuk menjawab dan menyelesaikan persoalan yang ada beserta persyaratannya.

Pendingin primer RGTT menggunakan fluida kerja helium yang diharapkan mampu mengambil seluruh energi termal dari teras reaktor untuk pembangkitan listrik serta kogenerasi dengan produksi hidrogen dan industri. Namun dalam operasinya helium sebagai pendingin primer tidak dapat terlepas dari gas pengotor yang masuk didalamnya, sehingga akan menimbulkan berbagai masalah keselamatan dan keandalan operasi. Permasalahan tersebut dikarenakan pada temperatur tinggi (temperatur operasi RGTT) gas pengotor menjadi spesi yang agresif terhadap material struktur. Guna mengantisipasi dampak negatif gas pengotor dalam sistem pendingin primer maka perlu perencanaan yang matang tentang sistem kontrol inventori helium.

Dalam makalah ini dibahas analisis dampak pengotor pendingin primer terhadap integritas material struktur RGTT yang mencakup analisis sumber pengotor, interaksi pengotor dengan material struktur RGTT, serta strategi teknologi pengendalian pengotor dalam sistem pendingin primer. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui dampak dari gas pengotor pendingin primer, terhadap integritas material struktur RGTT yang selanjutnya akan digunakan dalam pembuatan desain konseptual sistem kontrol inventori helium RGTT sebagai perwujudan kontribusi lokal dalam pembangunan RGTT di Indonesia.

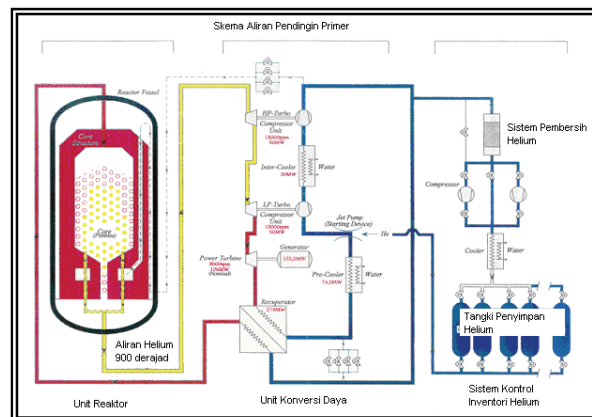
Analisis dilakukan dengan mengkaji sistem primer untuk mendapatkan peluang terhadap berbagai sumber masuknya pengotor kedalam sistem, proses penambahan atau berkembangnya jenis pengotor dalam sistem, interaksi pengotor dengan material struktur yang berdampak terhadap degradasi struktur, serta proses penyerapan / pengendalian pengotor dalam sistem pendingin primer.

## TEORI

### Sistem Pendingin Primer RGTT

Helium sebagai media pendingin primer RGTT berfungsi sebagai pengambil energi termal yang dihasilkan dari rekasi fisi dalam teras reaktor untuk dipindahkan ke unit konversi daya guna pembangkitan listrik ataupun kogenerasi dengan produksi hidrogen dan desalinasi air laut. Helium ini digunakan sebagai pendingin primer karena

sifatnya yang *inert* dan mempunyai kapasitas pembawa energi termal yang besar. Karena helium mengalami kontak langsung dengan berbagai komponen mekanik sistem primer yang beroperasi pada tekanan operasi 7 Mpa dan suhu 950 °C, maka ada peluang helium terkontaminasi dengan udara luar. Sebagai akibat dari hal tersebut maka didalam helium menjadi mengandung berbagai macam gas pengotor yaitu H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, dan O<sub>2</sub> yang merupakan hasil interaksi antara udara dan grafit sebagai kelongsong bahan bakar serta reflektor pada temperatur tinggi<sup>[4]</sup>. Pengotor ini pada temperatur tinggi menjadi agresif terhadap material dan berpotensi untuk mendegradasikan struktur RGTT. Sebagai langkah antisipasi agresifitas gas pengotor tersebut maka dalam sistem primer dipasang sistem kontrol inventori helium yang berfungsi untuk menurunkan kandungan gas pengotor sehingga memenuhi persyaratan operasi<sup>[5]</sup>. Sistem pendingin primer RGTT seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



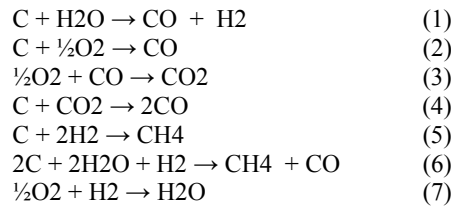
Gambar 1. Sistem pendingin primer RGTT

Bahan struktur sistem primer RGTT terutama sistem pemipaan, dan komponen utama digunakan paduan logam khusus yang mempunyai *base material* Fe, Ni dan Cr. Sedangkan reflektor dan kernel bahan bakar digunakan karbon atau grafit.

### Sistem Pendingin Primer RGTT

Helium dipilih sebagai pendingin primer Reaktor berpendingin Gas Temperatur Tinggi (RGTT) karena helium mempunyai kemampuan transfer panas pada temperatur tinggi yang memadai, bersifat mulia sehingga helium tidak mudah bereaksi dengan struktur material RGTT. Dengan demikian maka pemanfaatan energi termal reaktor dapat dioptimalkan, dan integritas material struktur, serta keandalan operasi RGTT dapat dipertahankan sampai pada umur desainnya.

Namun pada kenyataannya pendingin primer RGTT selalu mengalami kontaminasi dari berbagai gas seperti H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, dan O<sub>2</sub> dimana gas-gas tersebut pada temperatur tinggi merupakan substansi yang agresif. Gas-gas pengotor tersebut berada dalam sistem pendingin primer dimungkinkan pada awalnya berasal dari air (H<sub>2</sub>O) ataupun udara (O<sub>2</sub>) yang masuk kedalam sistem dan selanjutnya bereaksi dengan grafit (C) pada temperatur tinggi menghasilkan impuritas H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, dan O<sub>2</sub> menurut reaksi sebagai berikut<sup>[4]</sup>:



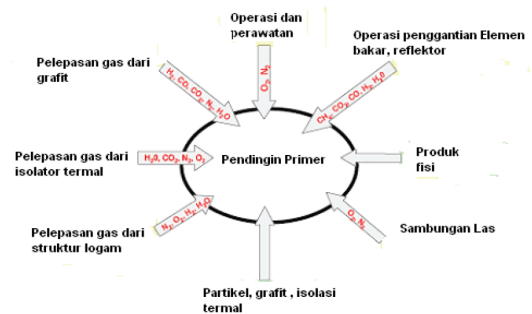
Dari data reaksi 1 dan 2 tersebut dapat diketahui bahwa air dan oksigen yang terkandung dalam udara berinteraksi dengan grafit baik sebagai kelongsong bahan bakar ataupun sebagai reflektor RGTT pada temperatur tinggi menghasilkan gas hidrogen (H<sub>2</sub>) dan gas karbon monoksida (CO). Selanjutnya reaksi berantai berlangsung dalam sistem primer seperti pada reaksi 3 sampai 7 menghasilkan gas pengotor berikutnya yaitu CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, dan CO. Dari analisis reaksi 1 sampai 7 dapat diketahui bahwa kuantitas gas pengotor dalam sistem pendingin primer sangat bergantung pada besar kecilnya udara yang masuk kedalam sistem primer, yang dimungkinkan sebagai akibat kebocoran dari beberapa komponen sistem primer. Guna membatasi jumlah gas pengotor dalam sistem primer maka masuknya udara tersebut juga harus dibatasi sehingga konsentrasi gas pengotor dalam sistem primer tidak melebihi persyaratan konsentrasi yang telah ditetapkan. Persyaratan batas maksimal konsentrasi gas pengotor dalam operasi RGTT seperti pada Tabel 1<sup>[6]</sup>.

Tabel 1. Persyaratan batas konsentrasi maksimal gas pengotor dalam sistem primer RGTT

H <sub>2</sub> O (vppm)	CO <sub>2</sub> (vppm)	H <sub>2</sub> (vppm)	CO (vppm)	CH <sub>4</sub> (vppm)	N <sub>2</sub> (vppm)	O <sub>2</sub> (vppm)
0,2	0,6	3,0	3,0	0,5	0,2	0,02

Komponen sistem primer RGTT yang perlu diperhatikan karena mempunyai kontribusi sebagai asal sumber meningkatnya gas pengotor kedalam sistem primer ditampilkan pada Gambar 2. Dengan memperhitungkan stoikiometri reaksi 1 sampai dengan 7, dan batasan konsentrasi maksimal gas pengotor dalam sistem primer seperti pada Tabel 1, maka konsentrasi udara yang

diperbolehkan masuk kedalam sistem primer maksimal adalah 12 vppm. Data ini merupakan salah satu persyaratan dasar yang harus dituangkan dalam desain konseptual, yaitu bahwa kebocoran udara melalui komponen sistem primer RGTT yang mempunyai kontribusi sebagai sumber gas pengotor tidak boleh melebihi 12 vppm.



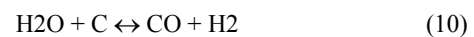
Gambar 2. Komponen sumber gas pengotor dalam sistem pendingin primer RGTT<sup>[7]</sup>

### Pengaruh Gas Pengotor Terhadap Material Struktur RGTT

Pengaruh gas pengotor terhadap material bergantung pada konsentrasi relatif dan temperatur helium, dimana interaksi pengotor dengan material mengarah ke oksidasi dan dapat menyebabkan karburasi atau dekarburasi paduan logam material struktur RGTT. Kerusakan paduan logam struktur dapat terjadi pada permukaan logam dengan membentuk oksida logam atau senyawa karbida logam yang melapisi permukaan logam. Namun karena temperatur tinggi dari helium, maka karbon dan oksigen dapat berdifusi masuk kedalam matrik logam sehingga mengakibatkan perubahan struktur dan terjadi oksidasi, karburasi atau dekarburasi pada bagian dalam logam. Selanjutnya kerusakan logam tidak saja diakibatkan oleh hilangnya atau lepasnya material logam akibat persoalan korosi, tetapi juga dari degradasi sifat mekanik logam akibat penipisan logam ataupun keretakan logam. Dari uraian ini dapat diambil informasi bahwa pada dasarnya keberadaan gas pengotor kedalam helium akan menyebabkan oksidasi, karburasi atau dekarburasi.

### Karburasi<sup>[4]</sup>

Dekarburasi adalah interaksi antara air dan karbon dalam logam yang akan mengakibatkan terbentuknya oksida oleh adanya gelembung gas yang dihasilkan menurut reaksi berikut.

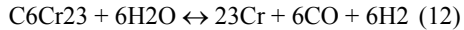


Reaksi dekarburasi ini akan berlangsung terus sehingga kandungan karbon dalam logam menjadi sangat rendah senyawa karbida yang terbentuk

menjadi tidak stabil dan akan terlarut menurut reaksi berikut.



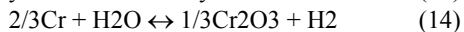
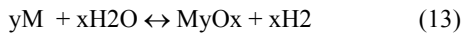
Secara global reaksi karbida dan air adalah sebagai berikut.



Jika reaksi dekarburasi ini terjadi maka sifat-sifat mekanik logam juga akan terdegradasi.

#### Oksidasi<sup>[4]</sup>

Dalam lingkungan operasi RGTT, sebagian besar oksigen yang masuk bereaksi dengan grafit dan reflektor menurut reaksi berikut.

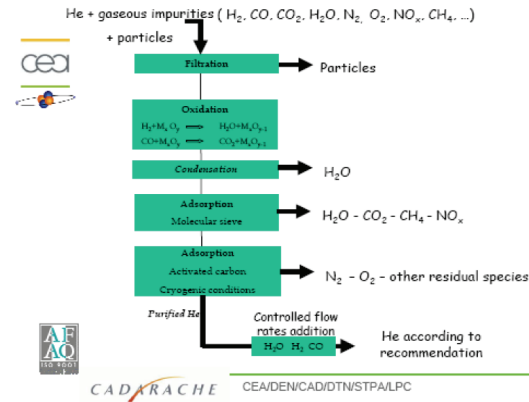
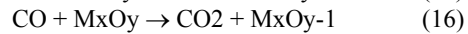
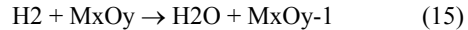


Proses oksidasi ini tidak akan terjadi bila lapisan oksida pelindung dari logam struktur masih baik. Namun bila lapisan oksida pelindung rusak akibat *porous* atau retak maka oksidasi ini atau oksidasi dalam logam dan karburasi akan terjadi. Proses oksidasi ini akan mengakibatkan sifat-sifat mekanik logam menurun dan dampak yang serius adalah terjadinya inisiasi retakan pada *intergranular oxides* pada temperatur tinggi.

#### Strategi Pengendalian Konsentrasi Pengotor

Konsentrasi gas pengotor dalam pendingin primer dibatasi sesuai dengan konsentrasi yang dipersyaratkan dalam operasi sistem primer RGTT. Pada dasarnya pengotor pendingin primer terdiri dari partikel padat berukuran kecil dan gas pengotor hasil interaksi berantai antara udara dan grafit yaitu H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, dan NO<sub>x</sub>. Ukuran molekul gas pengotor ini sebagian besar hampir mendekati ukuran molekul gas helium, sehingga pemisahannya perlu dilakukan menggunakan strategi yang tepat. Strategi pemisahan gas pengotor yang terkandung dalam gas helium ditunjukkan pada Gambar 3. Langkah pertama yang harus dilakukan adalah memisahkan partikel padat berukuran kecil yang terdapat dalam helium, biasanya adalah debu karbon/grafit yang tererosi. Teknik pemisahannya menggunakan filtrasi membran atau *cartridge filter*. Dari proses ini diharapkan semua partikel padat dapat dipisahkan. Langkah kedua adalah oksidasi gas pengotor. Pada langkah ini gas pengotor yang berukuran kecil seperti hidrogen (H<sub>2</sub>) dan karbonmonoksida (CO) dioksidasi oleh oksida logam MxOy sedemikian sehingga hidrogen akan menjadi air dan karbonmonoksida menjadi korbondioksida menurut reaksi berikut. Dengan demikian maka jenis gas

pengotor yang ada adalah H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan NO<sub>x</sub>.



Gambar 3. Strategi pemisahan gas pengotor helium<sup>[5]</sup>

Langkah ketiga adalah kondensasi / pendinginan, pada proses ini sebagian besar air akan terkondensasi dan terpisah dari senyawa gas yang lain. Gas yang tertinggal adalah H<sub>2</sub>O sisa, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>. Langkah kelima adalah adsorpsi dengan karbon aktif tetapi pada kondisi cryogenic (kondisi sangat dingin), pada proses ini maka oksigen dan nitrogen akan terkondensasi sedangkan helium masih dalam kondisi gas sehingga mudah dipisahkan. Untuk mendapatkan kondisi helium sebagai pendingin primer maka langkah-langkah tersebut harus diakomodasi atau terimplementasikan dalam desain konseptual sistem kontrol inventori helium RGTT.

#### HASIL DAN DISKUSI

Seperti telah diuraikan dalam bagian pendahuluan bahwa dalam makalah ini dikaji tentang dampak gas pengotor pendingin primer terhadap integritas material struktur RGTT, serta strategi teknologi pengendalian gas pengotor, yang selanjutnya hasil kajian akan digunakan sebagai dasar dalam pembuatan desain konseptual sistem kontrol inventori helium RGTT. RGTT merupakan salah satu kandidat Sistem Energi Nuklir (SEN) nasional untuk memenuhi kebutuhan terhadap sistem energi nuklir domestik yang memenuhi persyaratan keselamatan dan keandalan tinggi, ekonomis, ramah lingkungan, luwes dalam pemanfaatan di industri, efisien dan luwes dalam pemanfaatan bahan bakar, serta menghasilkan limbah yang minimal. Kogenerasi RGTT dengan produksi hidrogen termokimia I-S serta produksi air

bersih dengan proses desalinasi *Multi Stage Flash Destillation* (MSF) akan memberikan nilai tambah terhadap berbagai kebutuhan masyarakat.

Media pendingin primer yang menggunakan helium merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap keandalan dan kelangsungan operasi RGTT. Oleh karenanya maka sistem kontrol inventori helium harus dirancang mampu mengatasi konsentrasi gas pengotor didalamnya. Untuk membuat desain konseptual sistem kontrol inventori helium maka hal-hal yang terkait dengan eksistensi gas pengotor dalam pendingin primer harus dapat diketahui dengan rinci termasuk strategi pengendaliannya.

Untuk menghindari ataupun memperkecil konsentrasi gas pengotor dalam pendingin primer dapat dilakukan dari sejak awal pembangunan reaktor yaitu pada tahap desain konseptual. Pada desain konseptual ini harus mengakomodasi sumber gas pengotor, dampak gas pengotor, strategi pengendalian gas pengotor dan batasan konsentrasi maksimal gas pengotor yang diperbolehkan dalam operasi RGTT sedemikian sehingga diperoleh desain sistem kontrol inventori helium RGTT yang representatif. Dari desain konseptual ini dapat dijamin bahwa dalam operasi RGTT konsentrasi gas pengotor tidak melebihi persyaratan konsentrasi yang telah ditentukan.

## KESIMPULAN

Dari uraian diatas dapat disimpulkan bahwa sumber dari adanya gas pengotor dalam pendingin primer RGTT bermula dari kebocoran udara melalui beberapa komponen yang kontak dengan pendingin primer dan udara berinteraksi secara berantai dengan grafit pada temperatur tinggi seperti reaksi 1 sampai dengan 7 yang menghasilkan gas H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, dan O<sub>2</sub>. Karena gas pengotor dalam sistem primer adalah spesi agresif yang dapat mengakibatkan degradasi material struktur RGTT melalui berbagai proses yaitu karburasi, dekarburasi, dan oksidasi maka konsentrasi udara yang masuk kedalam sistem primer perlu dibatasi tidak melebihi 12 vpm.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Redaksi Majalah Ilmiah Sigma Epsilon yang telah membantu dalam perbaikan makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. ANONYMOUS, "Kebijakan Energi Nasional", Peraturan Presiden RI, No.5, 2006.
2. ANONYMOUS, "Generation IV Nuclear Energy Systems Ten-Year Program Plan", Advanced Nuclear Research, DOE of Nuclear Energy, Science and Technology, Vol.1, March 2005.
3. DIMIAN, AC., "Integrated Design And Simulation of Chemical Processes", Elsevier, Amsterdam, 2003.
4. KACZOROWSKI, D., Chaovoloff, J., "Material Degradation In High Temperature, The AREVA -NP Corrosion Loop", Prosiding HTR 3<sup>rd</sup> International Tropical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Johannesburg, South Africa, 2006.
5. GASTALDI, O., *et al.*, "Helium Purification", Prosiding HTR 3<sup>rd</sup> International Tropical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Johannesburg, South Africa, 2006.
6. TISCHLER, W., "HTR Specific System, Fuel Handling System, Helium Auxiliary System, HTR Module", High Temperature Reactor Shcool, Framatome-ANP GmbH, 2002.
7. POLETIKO, C., "HPC Loop for Helium Purification", Technical Report, North-West University, France, 2006.