

DESAIN KONSEPTUAL SISTEM KONTROL INVENTORI HELIUM PENDINGIN PRIMER RGTT200K

Sumijanto dan Ign. Djoko Irianto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310
e-mail: sumijanto52@yahoo.com

ABSTRAK

DESAIN KONSEPTUAL SISTEM KONTROL INVENTORI HELIUM PENDINGIN PRIMER RGTT200K. Kecelakaan PTLN BWR di Fukushima merupakan pelajaran berharga dalam merencanakan pembangunan PLTN di Indonesia ke depan. Ada dua kejadian penting pada kasus ini, pertama naiknya suhu air pendingin yang berakibat melelehnya bahan bakar, kedua interaksi air pendingin dengan kelongsong bahan bakar menghasilkan gas hidrogen. Berdasarkan pengalaman tersebut maka reaktor daya berpendingin gas menjadi alternatif sebagai calon PLTN yang akan dibangun di Indonesia. RGTT200K adalah reaktor daya berpendingin gas temperatur tinggi 200MW kogenerasi menjadi pilihan untuk dibangun. Media pendingin primer pada RGTT200K digunakan gas helium. Integritas struktur dan komponen RGTT200K dijamin oleh sistem kontrol inventori helium (HICS). Dalam makalah ini diuraikan analisis desain konseptual sistem kontrol kimia helium pendingin primer yang merupakan komponen utama HICS. Tujuan penelitian ini untuk mempersiapkan desain konseptual HICS dalam mendukung pembangunan sistem energi nuklir (SEN) di Indonesia. Analisis dilakukan dengan menggunakan metoda neraca kesetimbangan masa pada komponen utama sistem kontrol kimia helium. Dari hasil analisis diperoleh bahwa sistem kontrol kimia helium didesain mampu menurunkan konsentrasi gas H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, N₂, dan O₂ dari 40 ppmV hingga menjadi 1 ppmV. Operasi sistem diperlukan filter HEPA dua unit, oksidator CuO = 470 kg/hari, molecular sieve zeolit tipe 5A = 3072 kg/hari, dan adsorber karbon aktif = 1210,8 kg/hari. Hasil ini digunakan sebagai dasar dalam mempersiapkan desain HICS.

Kata kunci: Desain konseptual, keselamatan operasi, kontrol kimia helium, RGTT200K.

ABSTRACT

CONCEPTUAL DESIGN OF HELIUM INVENTORY CONTROL SYSTEM FOR PRIMARY COOLANT OF RGTT200K. BWR accident in Fukushima is a valuable lesson in planning for nuclear power plant in Indonesia in the future. There are two important events in this case, the first rise in temperature of the cooling water which resulted the melting of fuel, the second cooling water interaction with the cladding of fuel to produce hydrogen gas. Based on the experience, gas cooled reactor could be the alternative of nuclear power plant which be build in Indonesia. RGTT200K is gas-cooled power reactors high temperature 200MW cogeneration an option to be built. Media RGTT200K primary coolant used in helium gas. The integrity of the structure and components RGTT200K assured by helium inventory control system (HICS). In this paper described the analysis of the conceptual design of chemical control system which is the primary coolant helium HICS component. The purpose of this study to prepare conceptual designs HICS in supporting the development of nuclear energy systems (SEN) in Indonesia. Analyses were performed using the balance sheet method on the main components of chemical control system of helium. From the analysis found that the chemical control system is designed capable of lowering the concentration of helium gas of H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, N₂, and O₂ of 40 ppmV up to 1 ppmV. Operating system required two units of HEPA filters, oxidizing CuO = 470 kg / day, molecular sieve zeolites of type 5A = 3072 kg / day, and activated carbon adsorber = 1210.8 kg / day. These results are used as the basis in preparing the design HICS.

Keywords: conceptual design, operation safety, chemical control of helium, RGTT200K.

1. PENDAHULUAN

Kecelakaan reaktor nuklir Fukushima merupakan suatu musibah yang disebabkan oleh peristiwa gempa bumi dan tsunami. Reaktor Fukushima tentu saja telah didesain dengan mempertimbangkan spesifikasi teknis dan lingkungan yang sangat aman. Namun intensitas gempa bumi dan tsunami yang terjadi dan dampaknya tidaklah mudah diprediksikan sehingga pada kenyataannya gempa bumi dan tsunami mampu menimbulkan kerusakan reaktor nuklir di Fukushima. Kasus Fukushima ini hendaklah dijadikan pelajaran yang berharga dalam merencanakan pembangunan PLTN di Indonesia kedepan.

Ada dua fenomena penting yang dapat digunakan sebagai pelajaran. Pertama, peristiwa gempa bumi dan tsunami pada akhirnya berdampak terhadap kenaikan suhu air pendingin reaktor sehingga terjadi proses penguapan pendingin. Proses ini berkelanjutan sehingga suhu kelongsong bahan bakar naik mencapai 900 °C lebih. Kedua, seiring dengan tingginya suhu kelongsong tersebut maka material kelongsong yang terdiri dari paduan logam zirkonium menjadi sangat reaktif terhadap air dan bereaksi menghasilkan gas hidrogen. Hal ini berbeda jika reaktor pada kondisi normal dimana suhu operasi pendingin hanya berkisar 350 °C sehingga air dan paduan logam zirkonium tidak bereaksi menghasilkan hidrogen^[1].

Melalui Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional, telah ditetapkan bahwa untuk menjamin kelangsungan pasokan energi pada sektor industri kedepan, sasaran bauran energi primer optimal tahun 2025 memberi kesempatan kepada sumber energi baru dan terbarukan untuk berkontribusi dalam penyediaan energi listrik di Indonesia^[2]. Kebijakan pemerintah tersebut memberi peluang dan tantangan terhadap pengembangan reaktor nuklir di Indonesia sebagai sumber energi. Seiring dengan peraturan presiden tersebut dan dengan memperhatikan pengalaman kasus Fukushima maka reaktor daya berpendingin gas menjadi alternatif sebagai calon PLTN yang akan dibangun di Indonesia.

RGTT200K adalah Sistem Energi Nuklir (SEN) berpendingin gas temperatur tinggi menjadi nominasi untuk dikembangkan kedepan. Reaktor ini secara khusus dikembangkan dan didesain PTRKN-BATAN dalam rangka memenuhi kebutuhan energi listrik di Indonesia. Pengembangan RGTT200K tersebut harus dilakukan melalui berbagai tahapan desain yang meliputi *design requirement*, desain konseptual (*conceptual design*), desain dasar (*basic design*), desain rinci (*detail design*), demonstrasi instalasi (*plant demonstration*) atau prototipe, dan operasi komersial (*comercial operation*)^[3].

Desain RGTT200K sebagai penyedia energi di Indonesia harus memenuhi kriteria ramah lingkungan, aman, ekonomis, dan mampu menghemat cadangan uranium dunia. Oleh karenanya RGTT200K harus didesain tidak melepaskan polutan apapun yang dapat merusak atau mempengaruhi lingkungan. Media pendingin primer pada RGTT200K didesain menggunakan gas helium. Helium selain sebagai pendingin primer juga berfungsi sebagai *barier* keselamatan ke enam (1. *meat* kernel, 2. *pyrolitic carbon*, 3. *silicon carbide*, 4. *pyrolitic carbon*, 5. *pabble*, dan 6. pendingin helium) dalam sistem keselamatan RGTT200K^[4]. Helium adalah molekul *inert* sehingga

tidak mudah berinteraksi dengan material, namun pada kenyataannya selama operasi reaktor helium akan terkontaminasi oleh berbagai impuritas melalui *air ingress*, *oil ingress* dan *water ingress*. Impuritas ini tentu saja akan selalu terbawa ke dalam sistem primer sehingga kontak dengan material struktur dan komponen reaktor. Pada suhu yang relatif tinggi impuritas ini menjadi agresif terhadap material yang dilewatinya dan bereaksi menimbulkan berbagai kerusakan. Kerusakan inilah yang tidak dikehendaki karena dapat menimbulkan gangguan dalam sistem keselamatan RGTT200K. Sistem kontrol kimia dan tekanan helium adalah dua sub sistem HICS yang berfungsi untuk mengontrol kandungan gas pengotor dan tekanan dalam pendingin primer RGTT200K.

Dalam makalah ini diuraikan analisis desain konseptual sistem kontrol kimia helium pendingin primer. Tujuan dari analisis desain ini adalah untuk memperoleh konsep dasar tentang proses kontrol kimia helium yang diperlukan untuk membuat desain konseptual HICS-RGTT200K. Analisis dilakukan dengan menggunakan metoda neraca kesetimbangan masa pada masing-masing komponen utama sistem kontrol kimia helium. Komponen utama sistem kontrol kimia meliputi filter, kolom oksidator, kolom *molecular sieve*, dan kolom karbon aktif sebagai kesatuan unit proses kontrol kimia helium.

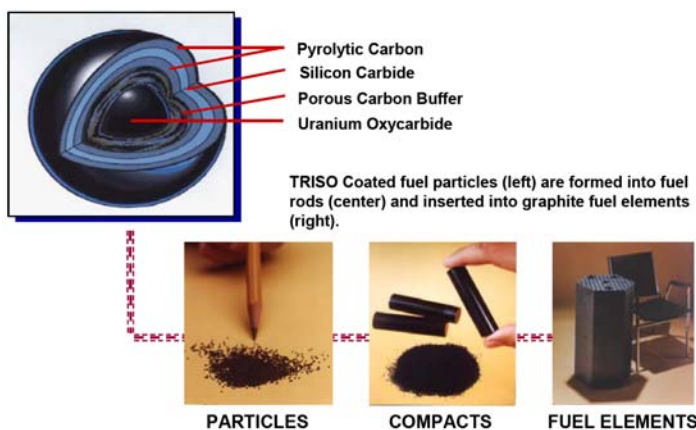
Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan pengkajian pendahuluan tentang dampak gas pengotor terhadap integritas material struktur baik pada kondisi operasi normal maupun kondisi darurat reaktor. Kajian dampak gas pengotor meliputi analisis sumber pengotor, dan interaksi pengotor dengan material struktur reaktor^[5]. Hasil analisis menunjukkan bahwa gas pengotor helium sebagai media pendingin primer merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap keandalan dan kelangsungan operasi reaktor. Sumber dari adanya gas pengotor tersebut bermula dari masuknya udara, *oil*, dan air melalui beberapa komponen yang kontak dengan pendingin primer. Interaksi gas pengotor secara berantai dengan grafit dalam teras reaktor menghasilkan gas pengotor lainnya, antara lain: H₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂, N₂ dan O₂. Disamping itu, teras reaktor juga akan melepaskan partikel radioaktif dari produk fisi ataupun karbon 14 hasil interaksi gas pengotor sehingga mengganggu proses perawatan ataupun perbaikan komponen reaktor. Karena gas pengotor dalam sistem primer juga merupakan spesi agresif maka dapat mengakibatkan degradasi material struktur melalui berbagai proses yaitu karburasi, dekarburasi, maupun oksidasi.

Kegiatan penelitian tentang desain konseptual sistem reaktor daya maju berbasis RGTT juga telah dilakukan di PTRKN-BATAN^[6]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kogenerasi dari RGTT200K adalah untuk produksi gas hidrogen, pembangkitan listrik dan desalinasi air laut menjadi air bersih dengan distribusi daya dari masing-masing proses pasokan energi adalah 59,5 MWt untuk produksi gas hidrogen, 57,6 MWe untuk pembangkitan listrik, dan 81,9 MWt untuk desalinasi. Desain konseptual siklus sistem kogenerasi RGTT200K mempunyai efisiensi termal (untuk pembangkitan listrik) 29% dan faktor utilisasi energi (*energy utilization factor*, EUF) 63%. Dengan demikian 37% dari 200 MWt energi panas yang dibangkitkan dalam reaktor dibuang ke lingkungan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

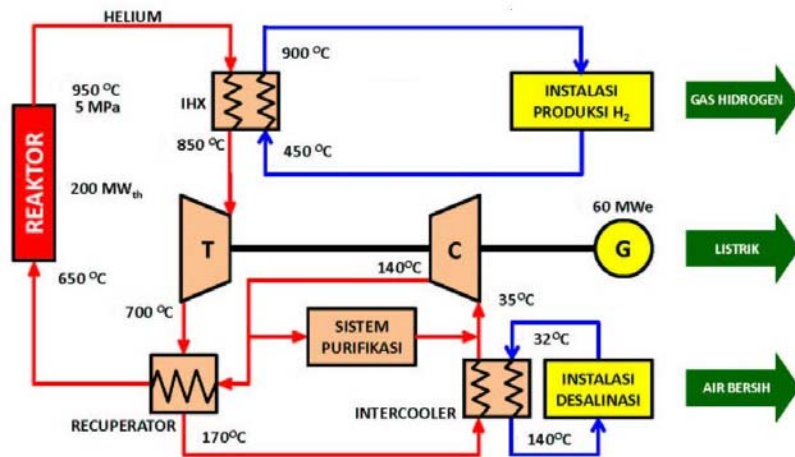
2.1. Konsep RGTT200K

Dalam rangka merealisasikan kegiatan pembangunan SEN di Indonesia, PTRKN BATAN telah melakukan desain konseptual awal RGTT200K berbasis HTGR (*High Temperatur Gas cooled Reactor*)^[4]. Bahan bakar berbentuk partikel uranium berlapis TRISO terdiri dari kernel UCO berdiameter 0,78 mm yang dilapisi oleh lapisan-lapisan material resistansi temperatur tinggi, seperti silikon karbida (SiC) atau zirkonium karbida (ZrC) dan grafit pirolitik (PyC). Struktur dibentuk ke dalam *pebble* atau bola yang siap dimanfaatkan dalam teras *pebble bed* atau kompak sebagai bahan bakar teras RGTT200K. Konfigurasi elemen bakar RGTT200K seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Konfigurasi elemen bakar RGTT200K^[4]

Media pendingin primer untuk mengambil panas hasil reaksi fisi digunakan gas helium dengan temperatur *outlet* rektor didesain 950 °C tekanan 5 MPa. Konsep siklus sistem pendingin primer dan konfigurasi RGTT200K ditunjukkan pada Gambar 2^[6].



Gambar 2 : Konsep siklus sistem pendingin primer dan konfigurasi RGTT200K

Bahan struktur utama teras reaktor serta kelongsong bahan bakar bola digunakan grafit dengan densitas termal yang rendah sedemikian rupa sehingga dalam kondisi apapun tidak akan terjadi pelelehan teras. Bahan struktur komponen dan sistem pendingin primer digunakan paduan

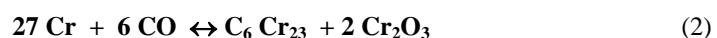
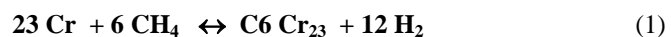
logam berbasis nikel sehingga tahan temperatur dan tekanan tinggi. Temperatur fluida pendingin (helium) keluaran dari teras reaktor RGTT200K didesain 950 °C sehingga akan memperluas pelayanan dalam berbagai kebutuhan energi termal di berbagai industri strategis. Kemampuan RGTT200K untuk menghasilkan temperatur fluida luaran yang sangat tinggi hingga mencapai 950 °C tersebut, akan sangat ideal untuk dikopel dengan sistem kogenerasi khususnya produksi hidrogen termokimia I-S. Dengan demikian maka selain menghasilkan listrik RGTT200K juga menghasilkan hidrogen yang juga merupakan pembawa energi baru yang ramah lingkungan. Instalasi desalinasi air laut didesain menggunakan panas buangan pada *precooler* untuk menghasilkan air bersih. Kogenerasi RGTT200K menghasilkan energi listrik dengan kapasitas 57,6 Mwe, bahan bakar hidrogen dengan kapasitas 160.000 Nm³ hidrogen /hari, dan air bersih dengan kapasitas 35000 m³ air bersih/ hari^[7].

2.2. Dampak gas pengotor terhadap integritas struktur RGTT200K

Pengaruh gas pengotor terhadap integritas struktur RGTT200K bergantung pada konsentrasi gas pengotor dan temperatur, dimana interaksi pengotor dengan material mengarah ke oksidasi dan dapat menyebabkan karburasi atau dekarburasi paduan logam material struktur RGTT200K. Kerusakan logam struktur dapat terjadi pada permukaan dengan membentuk oksida logam atau senyawa karbida logam yang melapisi permukaan. Namun karena temperatur tinggi, 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^[5].

2.2.1. Karburasi^[5].

Karburasi terjadi ketika potensial karbon dalam material lebih rendah dari potensial karbon dalam gas pengotor. Jika kondisi ini terjadi maka karbon akan masuk kedalam material dan membentuk senyawa karbida. Ada dua jenis senyawa karbida yang mungkin terbentuk yaitu C₆Cr₂₃ dan C₃Cr₇. Komposisi dan stoikiometri karbida bergantung pada komposisi paduan logam dan kelarutan karbon. Dua pengotor dalam pendingin primer RGTT200K yang menyebabkan pembentukan karbida adalah CH₄ dan CO menurut reaksi sebagai berikut. Metana (CH₄) pada temperatur tinggi (800 °C) tidak stabil sehingga mudah bereaksi dengan Cr dalam logam, demikian juga karbonmonoksida (CO).



Senyawa karbida yang terbentuk di dalam logam akan mengakibatkan logam menjadi rapuh (*brittle*) atau kekuatan mekaniknya menurun dan dengan beban tertentu menyebabkan korosi retak (*stress corrosion cracking*).

2.2.2. Dekarburasi^[5].

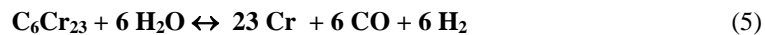
Dekarburasi adalah interaksi antara air dan karbon dalam logam yang akan mengakibatkan terbentuknya oksida oleh adanya gelembung gas yang dihasilkan menurut reaksi berikut.



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.



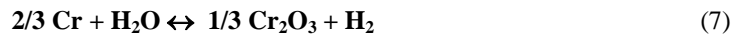
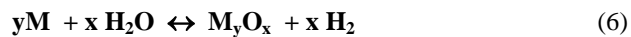
Secara global reaksi karbida dan air adalah sebagai berikut.



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

2.2.3. Oksidasi^[5].

Dalam lingkungan operasi RGTT200K, 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.

Dengan memperhatikan dampak gas pengotor tersebut maka 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 RGTT200K.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem kontrol inventori helium (HICS) berfungsi untuk mengontrol kuantitas dan tekanan helium serta kandungan pengotor helium pendingin primer sehingga reaktor beroperasi dengan aman. Pengotor helium terdiri dari debu karbon dan gas yang muncul akibat oleh adanya *water*, *air* dan *oil ingress*. Debu karbon dirancang dibersihkan menggunakan filter HEPA dengan laju aliran fluida 12 kg/s (10 % dari laju aliran pendingin 120 kg/s)^[8]. Hal tersebut dilakukan dengan pertimbangan bahwa kandungan debu cukup tinggi. Hal ini berbeda dengan laju alir untuk kontrol gas pengotor dimana probabilitas terjadinya *water*, *air* dan *oil ingress* pada sistem primer adalah relatif kecil dibanding dengan laju pertumbuhan debu sehingga konsentrasinya juga tidak sebesar debu maka untuk kontrol kimia helium dirancang mengambil fluida sebesar 1%.

Dalam HICS pengaturan kuantitas dan tekanan dilakukan dengan menginjeksikan helium dengan kemurnian dan tekanan tinggi kedalam sistem pendingin primer. Sedangkan kandungan gas

pengotor dalam pendingin dikontrol menggunakan sistem kontrol kimia helium. Pengotor helium pendingin primer berasal dari adanya *air*, *water*, dan *oil ingress* dan berinteraksi secara berantai dengan karbon menghasilkan spesi H_2 , CO , CH_4 , CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 . Kecuali H_2O dan CO , gas pengotor lainnya adalah senyawa non polar. Sehingga untuk menurunkan konsentrasi gas pengotor dalam pendingin digunakan sorben non polar juga. Gas karbon oksida (CO) tentu saja tidak dapat diserap dengan baik oleh sorben non polar karena karbon oksida adalah senyawa polar. Lalu konsep solusinya adalah perlu diubah menjadi senyawa polar yaitu dengan dilakukan oksidasi menjadi karbon dioksida (CO_2) yang non polar. Hidrogen, meskipun senyawa non polar namun senyawa ini berbeda dengan senyawa non polar lainnya karena hidrogen tidak mempunyai elektron bebas dalam molekulnya sehingga menjadi sulit diserap oleh sorben non polar. Maka konsep solusinya juga harus dioksidasi lebih dulu sehingga menjadi H_2O . Dengan demikian maka tinggal H_2O adalah satu-satunya senyawa polar yang mestinya juga sulit diserap oleh sorben non polar. Namun H_2O mempunyai sifat yang mudah terkondensasi kalau didinginkan atau menabrak material sorben. Oleh karena itu untuk memisahkan H_2O , dalam sistem kontrol harus dilewatkan melalui pemisah air / didinginkan sampai terkondensasi. Dengan demikian maka tinggal senyawa non polar yang harus ditangani.

Desain konseptual sistem kontrol kimia helium pada pendingin primer RGTT200K dibuat dengan mempertimbangkan karakteristik dari masing-masing gas seperti tersebut serta asumsi sebagai berikut :

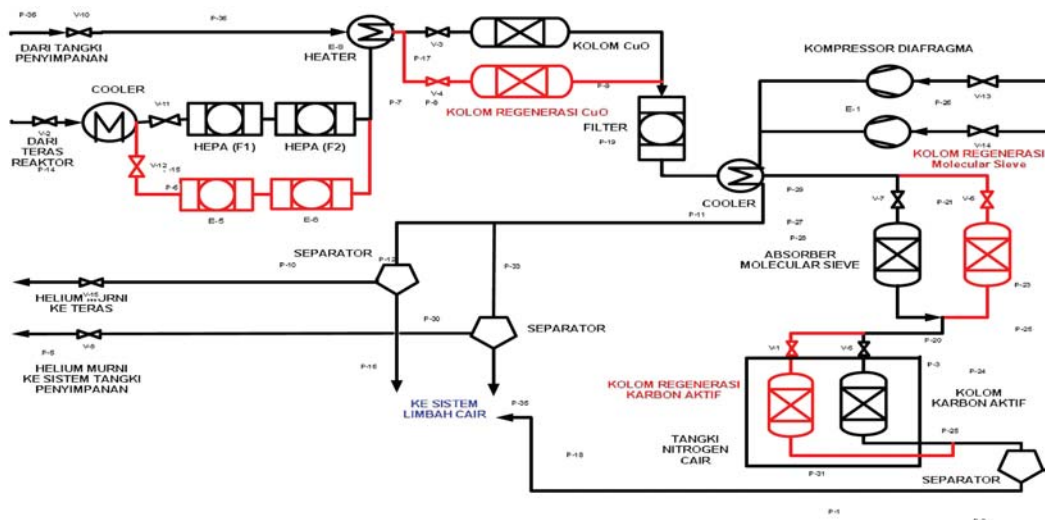
1. Konsentrasi gas pengotor helium diasumsikan mempunyai konsentrasi sebesar masing-masing 40 ppmV(part per million volume). Kondisi ini adalah kondisi jumlah pengotor terburuk dari operasi RGTT200K.
2. Laju alir *inlet* sistem kontrol kimia helium adalah 1% (1,2 kg/s) dari laju alir pendingin primer sebesar 120 kg/s. Dengan 1% ini dirancang mampu mempertahankan kemurnian helium pendingin primer.
3. Aliran fluida (1%) masuk sistem kontrol kimia helium diambil dari titik keluar kompresor dengan suhu $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 5,2 Mpa. Kondisi ini diambil pada tekanan pendingin yang tinggi namun suhunya cukup rendah. Tekanan ini dirancang mampu melawan *pressure drop* yang terjadi dalam sistem. Sedangkan kondisi suhu ini cukup kompak dengan kondisi operasi filter HEPA yang merupakan *inlet* awal fluida.
4. Aliran fluida helium murni yang diinjeksikan masuk kembali dalam sistem pendingin primer melalui titik *inlet* kompresor pada kondisi suhu $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kondisi suhu ini juga disesuaikan dengan kondisi suhu tangki simpanan helium murni hasil pengolahan.

Berdasarkan karakteristik gas pengotor helium pendingin primer maka tahapan proses yang harus dilakukan adalah sebagai berikut^[9]:

- Filtrasi untuk memisahkan partikulat padat / debu karbon
- Kolom tembaga Oksida (CuO) untuk mengoksidasi H_2 , CO dan CH_4
- Pemisah air (kondensor) untuk memisahkan air

- Penyaring molekuler untuk memisahkan CO², uap H₂O
- Pendingin suhu rendah untuk memisahkan sisa H₂O, CO₂ dan CH₄
- Kolom karbon aktif kondisi cryogenic untuk memisahkan N₂ dan O₂

Konsep diagram alir sistem kontrol kimia helium RGTT200K seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 : Konsep diagram alir sistem kontrol kimia helium^[8]

Pada masing-masing komponen sistem kontrol kimia helium dipasang redudansi secara paralel guna kepentingan regenerasi.

Rancangan siklus operasi sistem kontrol kimia helium adalah sebagai berikut :

- Filtrasi partikulat padat yang terkandung dalam helium pendingin primer dilakukan sebelum masuk ke kolom CuO, menggunakan filter HEPA khusus (*High efficiency Particulate Air / HEPA*) pada kondisi suhu 140 °C 5 MPa. .
- Pada dasarnya proses kontrol menggunakan fenomena adsorpsi dengan dua tipe adsorben yang berbeda yaitu *absorber molecular seive* dan karbon aktif. Namun karena gas H₂ dan CO sulit untuk diserap baik oleh *absorber molecular seive* ataupun karbon aktif maka proses dikembangkan dengan mengkonversi gas H₂ dan CO menjadi H₂O dan CO₂ melalui kolom oksidator CuO pada temperatur 350 °C. Dalam proses ini CH₄ juga akan mengalami oksidasi menghasilkan H₂O dan CO₂ menurut 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. Selanjutnya flux gas helium pendingin primer dilewatkan melalui kolom *absorber molecular seive* yang beroperasi pada temperatur kamar (30 °C) dimana akan terjadi adsorpsi gas CO₂, H₂O. Jika

media *absorber molecular seive* jenuh maka dilakukan regenerasi dengan memanaskan media *absorber molecular seive* pada temperatur 250 °C dan dibawah tekanan 10 -20 kPa.

- Proses kontrol kimia selanjutnya adalah dilakukan adsorpsi pada kondisi *cryogenic* (temperatur sangat rendah – 180 °C) menggunakan karbon aktif. Kondisi ini dimaksudkan untuk meningkatkan kapasitas serapan, dimana pada kondisi ini adsorpsi sangat efektif. Namun dalam proses ini tidak diperbolehkan ada air karena air akan membeku dan menutup kolom. Dalam proses yang terakhir ini (kondisi *cryogenic*) dimaksudkan untuk menyerap oksigen (O₂), Nitrogen (N₂), dan seluruh spesi gas sisa yang tidak terserap oleh penyering molekuler. Regenerasi karbon aktif dilakukan dengan memanaskan karbon aktif jenuh pada temperatur 150 °C dibawah tekanan 10 – 20 kPa.
- Dengan pertimbangan bahwa proses operasi purifikasi tersebut berada pada berbagai kondisi temperatur yang berbeda-beda, maka HPC yang tersusun oleh berbagai penukar panas (HE) serta ekonomiser perlu diatur konfigurasi sedemikian sehingga dapat meminimalkan biaya operasi sistem.

Neraca masa kolom oksidator CuO

Perhitungan neraca masa pada kolom oksidator dilakukan dengan asumsi :

- Konsentrasi gas pengotor dalam helium pendingin primer RGTT200K masing-masing 40 ppmV.
- Laju alir helium masuk dalam kolom oksidator CuO 1,2 kg/s (1% dari laju alir pendingin primer).
- Konsentrasi gas pengotor keluar kolom CuO (H₂, CO, dan CH₄) masing-masing 2,0 ppmV.
- Gas pengotor mempunyai karakteristik gas ideal.

Dengan asumsi tersebut maka diperoleh hasil perhitungan neraca masa kolom oksidator seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 : Hasil perhitungan neraca massa total pada kolom oksidator CuO

Gas	Input flux Kolom CuO mol/ h	Output flux Kolom CuO mol/ h	Konsumsi CuO mol / h
H ₂	43,2	2,16	41,04
CO	43,2	2,16	41,04
CH ₄	43,2	2,16	164,16
H ₂ O	43,2	166,32	-
CO ₂	43,2	125,28	-
N ₂	43,2	43,2	-
O ₂	43,2	43,2	-
Konsumsi CuO			246,24

Untuk operasi per hari (24 jam) maka kebutuhan **CuO** adalah = (246,24 mol/jam)x(79,5 gram/mol)x(24 jam / hari) = **470 kg / hari**

Neraca masa kolom *molecular sieve*

Perhitungan neraca masa pada kolom *molecular sieve* dilakukan dengan asumsi :

- Konsentrasi gas pengotor masuk dalam *molecular sieve* adalah keluaran dari kolom oksidator CuO.
- Konsentrasi gas pengotor keluar kolom *molecular sieve* (H₂, CO, CH₄, CO₂ dan H₂O) masing-masing 2,0 ppmV.

Molecular sieve digunakan **zeolit tipe 5A** dengan karakteristik^[8] :

Volume pori [cm ³ / gram]	0,3
Diameter pori [Å]	5
Ukuran partikel [mm]	1,6
Luas permukaan [m ² /gram]	700 s/d 800
Porositas internal [%]	50

Kapasitas penyaringan :

150 gram H₂O per 1 kg *molecular sieve*

50 gram CO₂ per 1 kg *molecular sieve*

Dengan asumsi tersebut maka diperoleh hasil perhitungan neraca masa kolom *molecular sieve* seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 : Neraca massa total pada kolom *molecular sieve*

Gas	Input flux kolom <i>molecular sieve</i> [mol/ h]	Output flux kolom <i>molecular sieve</i> [mol / h]	<i>molecular sieve</i> terpakai (kg / h)
H ₂	2,16	2,16	-
CO	2,16	2,16	-
CH ₄	2,16	2,16	-
H ₂ O	166,32	2,16	20
CO ₂	125,28	2,16	108
N ₂	43,2	43,2	-
O ₂	43,2	43,2	-
Masa <i>molecular sieve</i> terpakai per hari			128

Untuk operasi per hari (24 jam) maka kebutuhan *molecular sieve* = (128 kg / jam)(24 jam / hari) = **3072 kg per hari**

Neraca masa kolom karbon aktif

Perhitungan neraca masa pada kolom karbon aktif dilakukan dengan asumsi :

- Konsentrasi gas pengotor masuk dalam kolom karbon aktif adalah keluaran dari kolom *molecular sieve*.
- Konsentrasi gas pengotor keluar kolom karbon aktif (H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, N₂, dan O₂) masing-masing 1,0 ppmV.
- Karakteristika karbon aktif yang digunakan^[8] ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3: Karakteristika karbon aktif

Volume pori [cm ³ /gram]	0,6
Diameter pori [Å]	24
Ukuran partikel [mm]	2 s/d 5
Luas permukaan [m ² /g]	1100
Porositas [%]	55 – 75
Densitas [kg / m ³]	450
Kapasitas [g gas / kg]	100

Dengan asumsi tersebut maka diperoleh hasil perhitungan neraca masa kolom karbon aktif seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 : Neraca massa total pada kolom karbon aktif

Gas	Input flux kolom karbon aktif [mol/ h]	Output flux kolom karbon aktif [mol/ h]	Konsumsi karbon aktif terpakai [kg / h]
H ₂	2,16	1,08	0,02
CO	2,16	1,08	0,30
CH ₄	2,16	1,08	0,17
H ₂ O	2,16	1,08	0,20
CO ₂	2,16	1,08	0,48
N ₂	43,2	1,08	23,0
O ₂	43,2	1,08	26,28
Masa karbon aktif terpakai per hari			50,45

Untuk operasi 24 jam per hari maka kebutuhan karbon adalah = (24 jam / hari)x(50,45 kg / jam) = **1210,8 kg karbon aktif**

4. KESIMPULAN

Sistem kontrol kimia helium pendingin primer yang merupakan komponen HICS dirancang mampu menurunkan konsentrasi gas pengotor H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, N₂, O₂ masing-masing dari 40 ppmV hingga menjadi 1 ppmV. Komponen utama sistem kontrol kimia helium meliputi filter HEPA, kolom oksidator, kolom *molecular sieve*, dan kolom karbon aktif sebagai kesatuan unit proses kontrol kimia helium. Filter HEPA berfungsi untuk menyaring partikulat padat. Kolom Oksidator (CuO) untuk mengoksidasi gas H₂, CO, dan CH₄ menjadi H₂O dan CO₂. Kolom *molecular sieve* untuk menyaring gas CO₂ dan H₂O. Kolom karbon aktif untuk menyerap gas N₂ dan O₂ serta sisa gas yang belum terserap pada kolom *molecular sieve*. Untuk mengontrol H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, N₂, O₂ diperlukan oksidator CuO = 470 kg/hari, zeolit tipe 5A = 3072 kg/hari, dan karbon aktif = 1210,8 kg/hari. Dengan pertimbangan bahwa proses operasi komponen sistem berada pada berbagai kondisi suhu yang berbeda-beda, maka sumber energi yang terdiri dari *heat exchanger* dan *economiser* perlu diatur sedemikian sehingga dapat meminimalkan biaya operasi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. ANDANG WIDI HARTO, Menyibak Fakta Dibalik Ledakan PLTN Fukushima dan Urgensi Pembangunan PLTN di Indonesia, Diskusi Ilmiah , Kampus Teknik UGM, 22 Maret 2011.
- [2]. Anonim, "Kebijakan Energi Nasional", Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2006.
- [3]. DIMIAN A.C, " Integrated Design And Simulation of Chemical Processes ", Elsevier, Amsterdam, 2003.
- [4]. SUWOTO dkk, Analisis Sensitivitas Parametrik Dalam Perhitungan Kritikalitas Sel Kisi Kernel Bahan Bakar RGTT Menggunakan Program Monte Carlo MCNP5, Prosiding Seminas Nasional ke -16 tentang Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir , Surabaya 28 Juli 2010.
- [5]. SUMIJANTO, Kajian Dampak Gas Pengotor Pendingin Primer Terhadap Integritas Material Struktur RGTT, Majalah Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir Sigma Epsilon, Volume 14 Nomoe 2, Mei 2010.
- [6]. DHANDHANG PURWADI, Desain Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT, Prosiding Seminar Nasional ke -16 tentang Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir , Surabaya 28 Juli 2010.
- [7]. SUMIJANTO, Analisis Aplikasi Energi Termal RGTT200K Untuk Produksi Hidrogen PLTN dan Desalinasi, Prosiding Seminas Nasional ke -16 tentang Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir , Surabaya 28 Juli 2010.
- [8]. SRIYONO, dkk " Desain Konseptual Sistem Pemurnian Helium Pada RGTT200K Untuk Menjamin Keselamatan Pengoperasiannya, Seminar Keselamatan Nuklir, Bapeten, 28 Juni 2011.
- [9]. GASTALDI,O,et all "Helium Purification" Proceedings HTR 2006, 3 rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Johannesburg, South Africa, 2006.

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Syarip, PTAPB-BATAN)

- Mengapa sampai saat ini teknologi pengelolaan pendingin jenis He belum andal?. Contohnya beberapa reaktor cepat (Super Phenix di Perancis) di *shutdown*.

JAWABAN: (Sumijanto, PTRKN-BATAN)

- *Pengelolaan pendingin jenis He sebenarnya tidaklah terlalu sulit, karena He adalah senyawa inert serta mempunyai kapasitas perpindahan panas yang memadai. Jadi, di-shutdown-nya beberapa reaktor di Perancis tersebut bukan karena dampak dari He sebagai pendingin.*