

STUDI PENANGANAN GAS HIDROGEN PASCA KECELAKAAN WATER INGRESS TERPARAH RGTT200K

Sumijanto, Zuhair

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN

Tlp: 021 7650912, email:sumijanto52@gmail.com

ABSTRAK

STUDI PENANGANAN GAS HIDROGEN PASCA KECELAKAAN WATER INGRESS TERPARAH RGTT200K. Kecelakaan *water ingress* terparah RGTT200K menimbulkan akumulasi gas hidrogen dalam jumlah yang relatif besar dalam pendingin RGTT200K. Akumulasi gas hidrogen dalam pendingin berpotensi terjadinya ledakan serta menyebabkan degradasi material struktur reaktor sehingga mempengaruhi keandalan dan keselamatan operasi. Tembaga oksida (CuO) adalah spesi yang mampu mengkonversi hidrogen menjadi air. Dalam makalah ini dikaji penanganan gas hidrogen menggunakan CuO untuk menurunkan konsentrasi gas hidrogen dalam pendingin sehingga berada dalam batas aman. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh data kapasitas, efektifitas serta kebutuhan CuO untuk penanganan gas hidrogen akibat kecelakaan *water ingress* terparah. Kapasitas, efektifitas serta kebutuhan CuO dihitung berdasarkan proses reaksi kimia stoikiometrik. Data ini selanjutnya digunakan sebagai pertimbangan dalam pembuatan desain konseptual sistem mitigasi kecelakaan *water ingress* terparah RGTT200K. Hasil pengkajian menunjukkan bahwa CuO efektif untuk menangani hidrogen melalui proses oksidasi pada tekanan 5,0 MPa, temperatur 300 °C, laju alir massa 1,0 kg/s. Kapasitas oksidasi 0,025 kg H₂/kg CuO dan 0,325 kg CO/kg CuO. Kebutuhan CuO untuk menangani H₂ dan CO adalah 26.500,53 kg, dalam waktu 3,82 jam.

Kata Kunci : Water ingress, grafit, hidrogen, keselamatan, RGTT200K.

ABSTRACT

STUDY ON THE HYDROGEN GAS HANDLING AFTER SEVERE WATER INGRESS ACCIDENT RGTT200K. RGTT200K of severe water ingress accidents caused the accumulation of hydrogen gas in the large amount relatively in RGTT200K coolant. Accumulation of hydrogen gas in the coolant has potential of explosion and causes degradation of the reactor material structure and so will affects to the reliability and safety of operation. Copper oxide (CuO) is a species that is able to convert hydrogen into water. This paper studied on handling hydrogen gas using CuO to reduce the concentration of hydrogen gas in the coolant that are within safe limits. The purpose of this study was to obtain data capacity, effectiveness and CuO requirements for handling hydrogen gas due to water ingress severe accident. Capacity, effectiveness and necessity CuO calculated based on stoichiometric chemical reaction process. This data is then used as a consideration in making the conceptual design accident mitigation systems RGTT200K by severe water ingress. Results of the studies showed that the CuO effective for hydrogen handling through oxidation process at 5.0 MPa pressure, temperature 300°C, the mass flow rate of 1.0 kg /detik. Oxidation capacity of 0,025 kg H₂/kg CuO and 0.325 kg CO/kg CuO. CuO needs to handle H₂ and CO are 26500.53 kg, in 3.82 hours.

Keywords: Water ingress, graphite, hydrogen, safety, RGTT200K.

PENDAHULUAN

RGTT200K adalah PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) generasi empat berpendingin gas helium temperatur tinggi berdaya 200 MW termal berbasis HTGR (*High Temperature Gas cooled Reactor*). RGTT200K didesain mampu menghasilkan listrik sebesar 80 MW dan energi termal untuk kogenerasi dengan proses industri di Indonesia kedepan[1]. Sistem kogenerasi RGTT200K didesain dengan siklus pembangkit listrik secara tidak langsung dimana fluida pendingin reaktor melalui *Intermediate Heat Exchanger (IHX)* sebagai pembangkit uap air pada sistem sekunder untuk menggerakkan turbin dan memutar generator listrik[2].

Kecelakaan *water ingress* ke dalam pendingin reaktor dapat terjadi melalui kebocoran tabung ataupun pecahnya tabung *steam generator* sehingga air masuk kedalam teras [3]. Peristiwa kecelakaan ini digunakan sebagai kecelakaan dasar desain (*Design Basis Accident /DBA*) dalam pembuatan desain

sistem keselamatan RGTT200K. Air yang masuk kedalam teras akan berinteraksi dengan komponen utama teras seperti bahan bakar bola, reflektor dan moderator neutron yang terbuat dari bahan grafit sehingga grafit teroksidasi dan menghasilkan gas hidrogen. Kecelakaan *water ingress* terparah RGTT200K akan menimbulkan akumulasi gas hidrogen dengan jumlah yang relatif besar dalam pendingin RGTT200K. Akumulasi tersebut perlu segera ditangani karena gas hidrogen dapat mengancam integritas struktur reaktor serta berpotensi terjadinya ledakan hidrogen sehingga mempengaruhi keandalan dan keselamatan operasi reaktor.

Pada kondisi operasi normal, keberadaan hidrogen dalam pendingin helium relatif sangat rendah sehingga masih mampu ditangani oleh sistem pemurnian helium pendingin reaktor yang tersedia. Namun pada kondisi kecelakaan *water ingress* terparah maka keberadaan hidrogen dalam pendingin reaktor menjadi sangat besar sehingga tidak mampu ditangani oleh sistem pemurnian yang tersedia. Oleh karena itu diperlukan sistem tambahan khusus untuk menangani akumulasi hidrogen sehingga konsentrasi hidrogen dalam helium pendingin reaktor dapat diturunkan dengan cepat dan aman. Dari pengalaman operasi sistem pemurnian helium diketahui bahwa hidrogen dalam konsentrasi yang relatif rendah (orde ppm) mampu ditangani dengan menggunakan tembaga oksida (CuO). Dalam proses penanganan tersebut, hidrogen dikonversikan menjadi air (H₂O). Konsep penanganan hidrogen dalam sistem pemurnian helium pendingin reaktor ini digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini untuk proses penanganan hidrogen paska kecelakaan *water ingress* terparah pada RGTT200K.

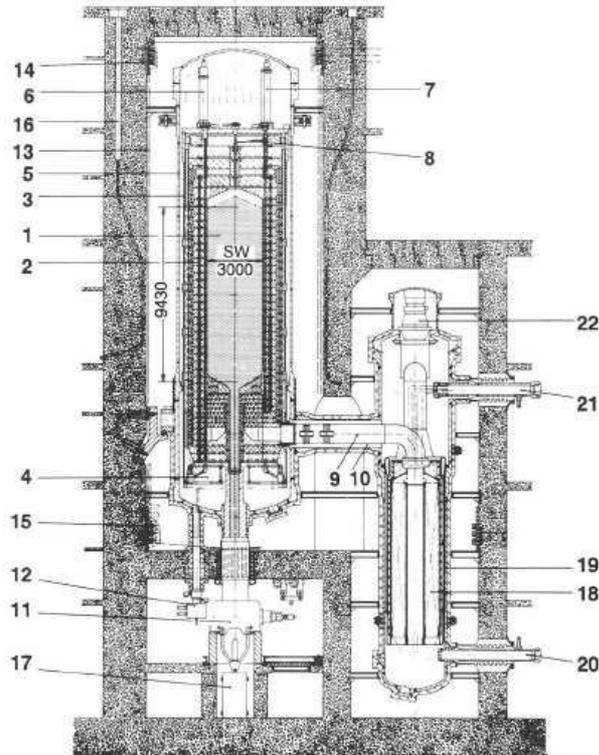
Dalam makalah sebelumnya telah dilakukan analisis dampak kecelakaan *water ingress* terparah terhadap integritas bahan bakar dan pertumbuhan hidrogen pada RGTT200K. Kecelakaan *Water ingress* terparah akibat tabung penukar panas *steam generator* pecah sehingga air masuk dalam teras reaktor dan berdampak pada pertumbuhan gas hidrogen dalam pendingin serta terjadi korosi pada grafit kelongsong bahan bakar bola sehingga terjadi degradasi kekuatan mekanik kelongsong bahan bakar.

Sebagai tindak lanjut maka dalam makalah ini dianalisis penanganan gas hidrogen menggunakan tembaga oksida untuk menurunkan konsentrasi gas hidrogen dalam pendingin sehingga berada dalam batas aman. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh data kapasitas, efektifitas serta kebutuhan tembaga oksida yang diperlukan untuk penanganan gas hidrogen. Kapasitas, efektifitas serta kebutuhan oksida tembaga dihitung berdasarkan proses reaksi kimia stoikiometrik.

TEORI

Teras RGTT200K didesain dengan mengacu pada desain HTR-Modul[4] Jerman dan mengadopsi bahan bakar yang akan digunakan dalam PBMR Afrika Selatan[5]. Teras RGTT200K didesain berbentuk silindris, reflektor grafit yang mengelilingi teras. Pendingin reaktor digunakan gas helium yang mengalir dari atas ke bawah melalui celah-celah bahan bakar *pebble*[6].

Pembangkitan listrik dalam RGTT200K dengan siklus tak langsung yang menggunakan *steam generator* yang menghasilkan uap untuk memutar turbin dan menggerakkan generator listrik. Konsep sistem sirkulasi pendingin RGTT200K ditampilkan pada Gambar 1.



Keterangan

(1) Teras reaktor, (2) Reflektor grafit, (3) Bejana teras, (4) Pendukung teras, (5) Bejana tekan reaktor, (6) Unit penyerap bola kecil, (7) Reflektor, (8) Tabung pengisian elemen bakar, (9) Saluran gas panas, (10) Saluran gas dingin, (11) Katup untuk pelepasan elemen bakar, (12) Katup untuk sistem bola penyerap, (13) Pendingin kavitasi, (14) Jalur kembali pendingin kavitasi, (15) jalur pendingin kavitasi depan, (16) Intrumentasi fluks neutron, (17) Tong tempat bahan bakar, (18) Bundel tabung *steam generator*, (19) *Steam generator shell*, (20) Jalur catu air, (21) Jalur uap air, (22) Sirkulator.

Gambar 1. Konsep Sistem Sirkulasi Pendingin RGTT200K [3].

Steam generator pada RGTT200K didesain dengan *helical tube steam generator once through*. Konsep parameter operasi dan data desain *steam generator* dan teras RGTT200K seperti pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Konsep parameter operasi dan data desain *steam generator* untuk RGTT200K siklus uap[3].

	Siklus Primer	Siklus Sekunder
Parameter		
Daya termal (MW)	200	200
Laju pendingin (kg/s)	120	100
Temperatur <i>inlet</i> ($^{\circ}$ C)	850	170
Temperatur <i>outlet</i> ($^{\circ}$ C)	400	600
Tekanan masuk (MPa)	5	20
<i>Pressure drop</i> (MPa)	0,05	2
Data Desain		
<i>Heat transfer area</i> (m ²)		2100
Jumlah tabung		230
Dimensi tabung (mm)		23 x 4,2 / 23 x 2,5
Tinggi pipa (mm)		8200
Material tabung		Incoloy 800

Tabel 2. Parameter reaktor dan spesifikasi teras reaktor RGTT200K [6].

Parameter reaktor:	
Daya termal reaktor (MW)	200
Volume teras (m ³)	66,657
Temperatur <i>inlet /outlet</i> helium (°C)	550 / 950
Tekanan helium (MPa)	5,0
Laju aliran massa helium (kg/s)	120
Densitas helium pada 273,16K, 10 ⁵ Pa (g/cm ³)	1,78×10 ⁻⁴
Spesifikasi teras:	
Diameter / tinggi teras (m)	3 / 9,43
Jumlah <i>pebble</i> per m ³	5.394
Jumlah <i>pebble</i> dalam teras	359.548
Fraksi <i>packing pebble</i> dalam teras (%)	61
Impuritas boron alam dalam struktur grafit (ppm)	2

Karakteristika Gas Hidrogen

Gas hidrogen (H₂) sangat mudah terbakar dan akan terbakar pada konsentrasi serendah 4% H₂ diudara bebas menurut reaksi berikut[7].



Ketika hidrogen dicampur dengan oksigen dalam berbagai perbandingan, hidrogen meledak seketika jika disulut dengan api dan akan meledak sendiri bila hidrogen berada pada temperatur 560 °C[8].

HASIL DAN PEMBAHASAN

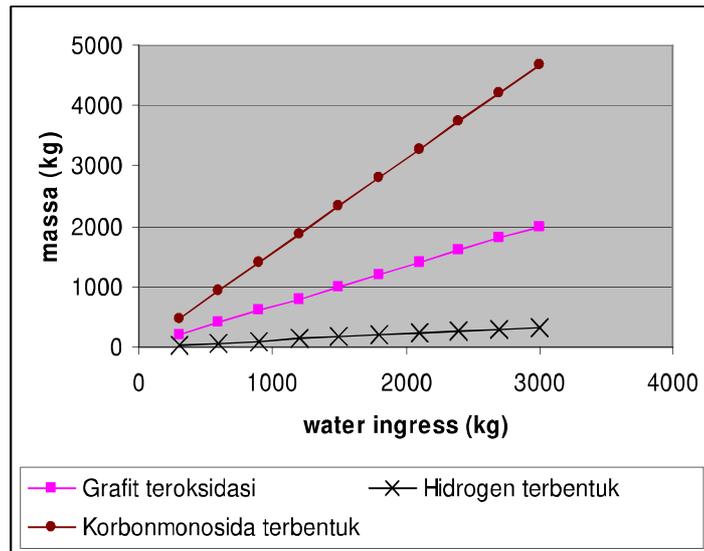
Inventori helium sebagai pendingin RGTT200K dirancang mempunyai volume 4480 m³[9], sehingga pada kondisi operasi RGTT200K dengan tekanan 5,0 MPa, temperatur 950 °Cn dan dari hasil perhitungan menggunakan data tersebut maka kuantitas helium pendingin reaktor adalah 8960 kg.

Kecelakaan *water ingress* terparah diprediksikan bahwa air masuk kedalam teras dengan laju 300 kg per detik dan berlangsung selama 10 detik sehingga mengakibatkan 3000 kg air masuk kedalam teras reaktor[3]. Setelah kecelakaan tersebut reaktor *scram* dan sirkulasi pendingin sekunder dalam *stem generator* berhenti secara otomatis yang ditrigger oleh kavitasi pendingin, sedangkan pendingin primer reaktor (helium) masih tetap bersirkulasi karena kompresor diasumsikan masih bekerja sehingga panas sisa reaktor masih dapat dibuang.

Reaksi kimia stoikiometrik antara air (*water ingress*) dan grafit selama kecelakaan *water ingress* terparah menghasilkan gas hidrogen dan karbonmonoksida menurut reaksi :



Reaksi antara grafit dan air adalah reaksi yang spontan artinya tanpa diperlukan penambahan energi dari luar reaksi sudah terjadi. Reaksi ini berlangsung pada saat kecelakaan *water ingress* pada kondisi temperatur operasi reaktor (950°C). Kondisi ini akan mempercepat reaksi sehingga dalam waktu yang sangat singkat air akan habis dan menghasilkan gas hidrogen dan karbonmonoksida[10]. Kuantitas produk reaksi sangat bergantung pada besar kecilnya *water ingress* dimana semakin banyak *water ingress* semakin banyak pula akumulasi gas hidrogen dan gas karbonmonoksida dalam pendingin reaktor. Korelasi kuantitas gas hidrogen dan gas karbonmonoksida hasil interaksi antara air dan grafit selama kecelakaan *water ingress* mulai dari kecil sampai kondisi terparah (yaitu mulai dari 300 kg hingga 3000 kg) seperti ditunjukkan pada Gambar 2[11].



Gambar 2. Korelasi kuantitas gas hidrogen dan gas karbonmonoksida hasil interaksi antara water ingress dan grafit[11].

Dari Gambar 2 terlihat bahwa, pertumbuhan gas hidrogen dalam pendingin reaktor semakin meningkat dengan meningkatnya H₂O yang masuk dalam teras, dan pada kondisi *water ingress* terparah jumlah gas hidrogen yang dihasilkan sebanyak 333,33 kg atau setara dengan 166,67 kmol gas H₂ dan gas karbonmonoksida sebanyak 4666,64 kg setara dengan 166,67 kmol gas CO. Secara kualitatif gas hidrogen sebanyak 166,67 kmol adalah jumlah yang relatif besar sehingga perlu dipertimbangkan eksensya terhadap keselamatan reaktor mengingat gas hidrogen adalah gas yang sangat reaktif terhadap udara dan sangat eksplosif.

Dari Gambar 2 diketahui bahwa setelah terjadi kecelakaan *water ingress* maka total bobot fluida pendingin (helium, hidrogen dan karbonmonoksida) adalah 13759,97 kg. Berangkat dari data ini maka kadar hidrogen dalam pendingin reaktor adalah 2,42 % , karbonmonoksida 32,46 % dan helium 65,12 %.

Keberadaan gas hidrogen dalam pendingin reaktor sebanyak 2,42% tersebut berpotensi menimbulkan ledakan atau terbakar jika bertemu dengan udara serta mengakibatkan kerusakan atau degradasi kekuatan material struktur reaktor melalui proses hidridisasi, karburasi dan dekarburasi.

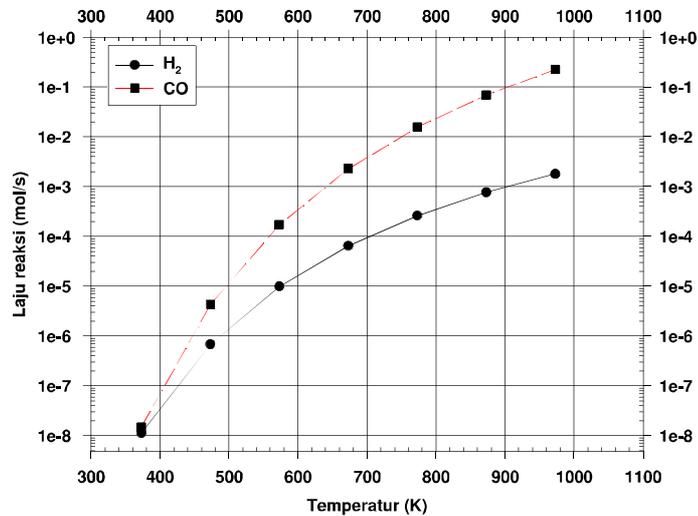
Konsep penanganan gas hidrogen akibat kecelakaan *water ingress* terparah digunakan senyawa oksidator tembaga oksida (CuO) yang akan mengkonversi hidrogen menjadi air melalui proses oksidasi. Selain menghasilkan gas hidrogen reaksi antara air dan grafit pada saat terjadinya kecelakaan *water ingress* terparah juga menghasilkan gas karbon monoksida dimana spesi ini juga akan teroksidasi oleh tembaga oksida, sehingga selain bereaksi dengan gas hidrogen, tembaga oksida juga akan bereaksi dengan karbonmonoksida. Hal ini akan berakibat menambah banyak penggunaan oksidator tembaga oksida. Reaksi hidrogen, karbonmonoksida dengan tembaga oksida seperti pada persamaan reaksi berikut,



Sistem bantu RGTT200K untuk mengkonversi gas hidrogen menjadi air adalah berupa kolom oksidator tembaga oksida, dimana tembaga oksida berada dalam kolom dan fluida helium pendingin reaktor yang mengandung gas hidrogen 2,42 % dan karbonmonoksida 32,46 % serta helium 65,12% dialirkan masuk kedalam kolom.

Laju reaksi konversi hidrogen menjadi air dan karbonmonoksida menjadi karbon dioksida dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya temperatur, kosentrasi, ukuran butir oksidator.

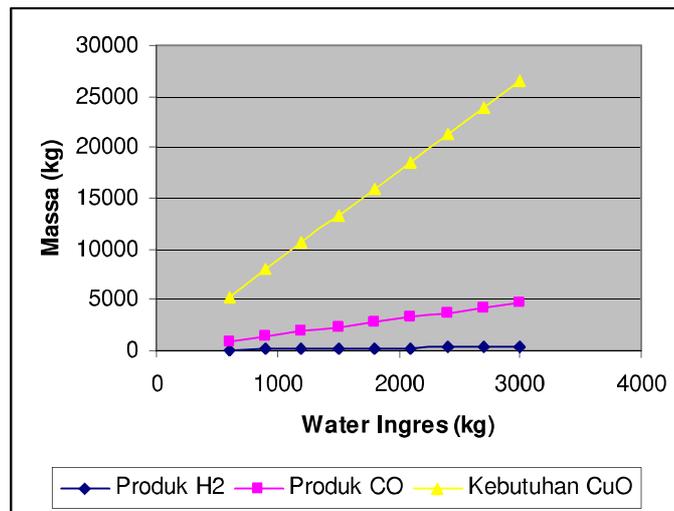
Pengaruh temperatur terhadap laju reaksi hidrogen, karbonmonoksida dengan tembaga oksida seperti ditunjukkan pada Gambar 3[12] .



Gambar 3. Pengaruh temperatur terhadap laju reaksi hidrogen, karbonmonoksida dengan tembaga oksida [12]

Dari Gambar 3 ini terlihat bahwa semakin tinggi temperatur semakin cepat reaksi. Namun dengan mempertimbangkan kecepatan reaksi oksidasi hidrogen dan karbonmonoksida oleh tembaga oksida yang spontan, karakteristik gas hidrogen yang akan dapat meledak sendiri pada temperatur 560°C, serta pengaruh temperatur terhadap reaktivitas CuO pada reaksi oksidasi hidrogen dan karbonmonoksida[10], maka untuk sistem penanganan hidrogen menggunakan kolom tembaga oksida dipilih pada temperatur operasi oksidasi 300 °C atau 573 K.

Secara stoikiometrik reaksi 2 dan 3 maka kapasitas tembaga oksida untuk mengoksidasi hidrogen dan karbonmonoksida adalah sebanding dengan koefisien stoikiometri reaksi yaitu dua mol tembaga oksida mampu dengan sempurna mengoksidasi satu mol hidrogen dan satu mol karbonmonoksida. Pengaruh kuantitas *water ingress* terhadap kebutuhan tembaga oksida untuk mengoksidasi hidrogen dan karbonmonoksida seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh kuantitas *water ingress* terhadap kebutuhan tembaga oksida

Pada kecelakaan *water ingress* terparah maka kebutuhan tembaga oksida untuk menangani hidrogen sebanyak 26.500,53 kg.

Jika laju alir massa fluida helium pendingin reaktor dalam kolom oksidator didesain 1,0 kg per detik maka waktu yang diperlukan untuk mengkonversi gas hidrogen dan karbonmonoksida adalah sekitar 13760 detik atau sekitar 3,82 jam, dimana waktu ini relatif singkat.

Sistem keselamatan RGTT200K perlu dilengkapi dengan sistem penanganan hidrogen pasca kecelakaan *water ingress* terparah yang terpisah dengan sistem pemurnian helium saat beroperasi normal. Tentunya penambahan sistem ini akan mempengaruhi nilai desain RGTT200K.

KESIMPULAN

Penanganan gas hidrogen pasca kecelakaan *water ingress* terparah, secara efektif dapat dilakukan dengan cara mengoksidasi menggunakan kolom oksidasi tembaga oksida (CuO). Kondisi proses oksidasi dilakukan pada tekanan 5,0 MPa, temperatur 300°C, dan laju alir 1,0 kg/detik. Kapasitas oksidasi tembaga oksida adalah 0,025 kg H₂/kg CuO dan 0,325 kg CO/kg CuO. Tembaga oksida yang dibutuhkan untuk mengoksidasi gas hidrogen dan karbonmonoksida akibat kecelakaan *water ingress* terparah adalah 26.500,53 kg. Waktu yang diperlukan untuk proses oksidasi adalah 3,82 jam.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Ir. Sriyono, Ir. Zuhair M.Eng, Drs. Ign. Djoko Irianto M.Eng dan seluruh staf Bidang pengembangan Reaktor PTRKN yang telah banyak membantu dalam berbagai hal sehingga karya tulis ini dapat disusun dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim RENSTRA PTRKN BATAN 2009 – 2014
2. Ign. Djoko Irianto “Kajian Unjuk Kerja Intermediate Heat Exchanger Pada Sistem Kogenerasi Reaktor VHTR” Prosiding Seminar Nasional ke -15 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Surakarta 17 Oktober 2009.
3. Zuoyi Zhang and Yujie Dong “Assessment Of Water Ingress Accident In A Modular High temperature Gas-Cooled Reactor” Tsinghua University Institute Of Nuclear technology, Beijing 100084, China, 2004
4. ERICH GERHARDS, Abbrandmessung am HTR-Modul Reaktor, Forschungszentrum Julich (1993).
5. KOSTER, H.D. MATZNER, D.R. NICHOLSI, PBMR Design for the Future (Journal of Nuclear Engineering and Design 222, 231–245, 2003).
6. Zuhair “Studi Efek Fraksi Packing Triso Dalam Desain Kritikalitas RGTT200K” , Prosiding Seminar Nasional TKPFN ke 17 di Yogyakarta, ISSN 084-2910, 2011.
7. [carcassi, M.N. (Juni 2005) “Deflagrations Of H₂-Air And CH₄ –Air lean mixtures in a vented multi component” Energy 30(8): 1439-1451.doi :10.1016/j. energy.2004.02.012.],
8. [Staff (10 September 2015) “Safety Data For Hydrogen” Chemical and Other Safety Information. The Physical and Theoretical Chemistry Laboratory, Oxford University].
9. Anonim, “Brief Overview Helium Impurities, Purification And Impact In HTGR Operation”
10. Sumijanto “Analisis Pengaruh Temperatur Terhadap Karakteristika Oksidasi Grafit Oleh Water Ingress Pada RGTT200K.” Sedang dalam proses penerbitan di Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir VI, 2013

11. Sumijanto “ Analisis Kekuatan kelongsong Bahan Bakar Dan Pertumbuhan Hidrogen Akibat Kecelakaan Water Ingress Terparah Pada RGTT200K” Sedang dalam proses penerbitan di Prosiding Seminar Nasional PIPDIPTN Yogyakarta 2013.
12. Sumijanto dkk “ Analisis Proses Oksidasi H₂ Dan CO Untuk desain Konseptual Sistem Pemurnian Pendingin Primer RGTT200K” Majalah Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir” Sigma Epsilon, Volume 15 Nomor 2, 2011.

DISKUSI/ TANYA JAWAB :

Pertanyaan: (Hery Adrial - PTRKN BATAN)

- Apakah CuO₂ dimasukkan ke dalam teras reactor?

Jawaban: (Sumijanto – PTRKN BATAN)

- CuO adalah spesi yang digunakan untuk mengoksidasi H₂ menurut reaksi $H_2 + CuO \rightarrow H_2O + Cu$.
- Jadi dalam hal ini pendingin yang telah terkontaminasi gas H₂ dialirkan dengan laju kg/detik masuk ke kolom CuO. Jadi CuO berada di luar sistem pendingin dan pendingin inilah yang dialirkan ke dalam kolom CuO dan bukan sebaliknya yaitu CuO dimasukkan ke teras reaktor.