

ASPEK KESELAMATAN PADA APLIKASI REAKTOR NUKLIR SUHU TINGGI UNTUK PROSES STEAM REFORMING GAS ALAM

Djati H. Salimy

Pusat Pengembangan Energi nuklir (PPEN-BATAN)

ABSTRACT

SAFETY ASPECT OF HIGH TEMPERATURE NUCLEAR REACTOR APPLICATION FOR NATURAL GAS STEAM REFORMING. *An assessment of the safety aspect of high temperature nuclear reactor application for natural gas steam reforming has been carried out. The basic safety aspect associated with nuclear coupling to chemical process is to prevent the release of radioactive materials to the environment and or the chemical process. In utilizing nuclear heat for chemical process, intermediate heat exchanger (IHX) is used as an interface that separates nuclear and non nuclear zones. IHX is helium-helium heat exchanger in which the primary helium (905°C) coming out from the reactor, and transfer its heat to the secondary helium gas (890°C). To prevent possible release of radioactive materials from nuclear zone, balanced pressure is applied. The pressure of chemical process (4.5 MPa) is designed to be higher than the pressure of secondary helium (4.1 MPa) or primary helium (4 MPa). The design of balance pressure and the use of IHX cause some inferior condition of the nuclear heated reformer since the lower temperature (~800°C) reaches catalyst tube of reformer. This condition gives impact on lower thermal efficiency (~50%) compared to the fossil-fuelled plant (80-85%). Some modification in design and operation, such as: selecting the bayonet type of reformer equipped with orifice baffle, and enhancing heat utilization, can improve the lack of condition and are capable to increase the thermal efficiency of nuclear heated natural gas steam reformer to reach about 78%.*

Keywords: IHX, natural gas steam reforming, high temperature nuclear reactor

ABSTRAK

ASPEK KESELAMATAN PADA APLIKASI REAKTOR NUKLIR SUHU TINGGI UNTUK PROSES STEAM REFORMING GAS ALAM. *Telah dilakukan pengkajian aspek keselamatan pada aplikasi reaktor nuklir suhu tinggi untuk proses steam reforming gas alam. Aspek keselamatan dasar pada kopel reaktor nuklir dengan proses kimia adalah mencegah kemungkinan lepasnya bahan-bahan radioaktif ke lingkungan dan atau ke zona proses kimia. Pada kopel nuklir untuk proses kimia, digunakan penukar panas intermediate (IHX) sebagai interface yang memisahkan antara zona nuklir dengan zona proses kimia. IHX adalah penukar panas helium-helium, dimana helium primer (905°C) mampu memindahkan panasnya ke helium sekunder (890°C). Untuk menjaga agar tidak terjadi lepasan bahan-bahan radioaktif dari zona nuklir, diterapkan sistem keseimbangan tekanan, yaitu tekanan proses kimia (4,5 MPa) dirancang lebih besar dari tekanan helium sekunder (4,1 MPa) maupun helium primer (4,0 MPa). Rancangan ini mengakibatkan kondisi operasi panas proses yang mampu disediakan oleh reaktor nuklir menjadi tidak optimal yaitu hanya mencapai sekitar 800°C pada daerah tabung katalisator. Kondisi ini mengakibatkan efisiensi termal steam reforming gas alam dengan panas nuklir hanya mencapai 50%, jauh di bawah proses dengan sumber panas bahan bakar fosil (80-85%). Sejumlah modifikasi desain operasi, seperti memanfaatkan reformer tipe bayonet yang dilengkapi dengan orifice baffle, dan peningkatan efektivitas pemanfaatan panas, mampu meningkatkan efisiensi termal steam reforming gas alam dengan panas nuklir menjadi sekitar 78%.*

Kata kunci: IHX, steam reforming gas alam, reaktor nuklir suhu tinggi

1. PENDAHULUAN

Kebijakan pemanfaatan energi nuklir guna pembangkitan listrik dan kogenerasi di Indonesia adalah terwujudnya peran energi nuklir secara simbiotik dan sinergistik dengan sumberdaya energi tak terbarukan maupun terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi nasional guna mendukung pembangunan berkelanjutan^[1]. Untuk itu, disamping mendorong terwujudnya PLTN pertama di Indonesia pada tahun 2016, BATAN juga harus terus melakukan berbagai kajian reaktor nuklir masa depan seperti: konsep reaktor kogenerasi produksi air bersih (desalinasi), penggunaan panas proses untuk operasi industri suhu tinggi seperti produksi hidrogen, gasifikasi batubara, dan lain-lain. Dalam forum internasional, terbentuknya *Nuclear Hydrogen Society* pada tahun 2001 di Jepang^[2], mendorong kerjasama yang semakin intensif untuk mewujudkan terrealisasinya sistem energi nuklir hidrogen, yaitu suatu sistem produksi hidrogen berbasis energi panas dari reaktor nuklir.

Steam reforming gas alam adalah proses konversi gas alam dan kukus (*steam*) pada suhu tinggi menghasilkan gas sintesis (campuran CO + H₂) yang bisa diubah menjadi berbagai macam produk, diantaranya hidrogen, metanol dan bahan-bahan kimia C₁. Sampai sekarang, proses ini merupakan proses paling penting dalam memproduksi hidrogen. Diperkirakan sekitar 85% konsumsi hidrogen dunia, diproduksi dengan proses *steam reforming* gas alam. Proses yang secara kimia mengikuti reaksi endotermis pada suhu tinggi, berimplikasi pada dibutuhkannya panas dalam jumlah besar. Secara konvensional, kebutuhan panas dipasok dengan membakar bahan bakar fosil. Ini berdampak pada makin cepatnya laju emisi CO₂ ke lingkungan, dan semakin cepatnya laju pengurasan cadangan bahan bakar fosil. Seandainya kebutuhan energi panas suhu tinggi bisa digantikan dengan energi panas reaktor nuklir, diharapkan dapat dihemat pembakaran langsung bahan bakar fosil.

Reaktor suhu tinggi berpendingin gas (HTGR) adalah kandidat penting reaktor nuklir yang bisa dimanfaatkan energi panasnya untuk berbagai proses kimia endotermis suhu tinggi. Luaran panas HTGR yang dibawa oleh pendingin reaktor, yaitu gas helium, yang secara teoritis suhunya bisa mencapai 1000°C^[3], sangat potensial untuk dimanfaatkan pada berbagai proses kimia. Kopling HTGR dengan *steam reforming* gas alam merupakan konsep yang paling maju dari aplikasi panas nuklir suhu tinggi untuk proses kimia. Berbagai negara maju seperti Amerika, Jepang, Jerman, Cina, dan Afrika Selatan melakukan studi kopel HTGR dengan proses *steam reforming* gas alam. Di Jepang, studi kopel HTTR (HTGR versi Jepang) dengan proses *steam reforming* gas alam untuk memproduksi hidrogen dan metanol telah dilakukan sejak 1970 an, dan telah memasuki tahap ujicoba implementasi proses. Direncanakan paling lambat tahun 2015, *demonstration plant* kopel HTTR dengan proses *steam reforming* gas alam telah beroperasi penuh dan merupakan yang pertama di dunia.

Kopel HTTR dengan *steam reforming* gas alam dilakukan dengan *interface* penukar panas intermediate (IHX) yang memisahkan antara zona nuklir dan zona proses kimia. IHX adalah penukar panas helium-helium. Helium primer luaran HTTR pada suhu 905°C diambil panasnya dengan helium sekunder yang bebas kontaminasi radioaktif. Helium sekunder inilah yang digunakan sebagai sumber energi panas untuk menjalankan proses. Pemanfaatan IHX penting untuk alasan keselamatan, karena dengan IHX, kontaminasi zona proses dapat dieliminasi sekecil mungkin. Tapi pemanfaatan IHX berdampak negatif pada proses kimia, karena dengan adanya IHX suhu proses yang bisa dimanfaatkan menjadi rendah (karena penurunan suhu) yang berdampak pada tidak optimumnya proses produksi hidrogen.

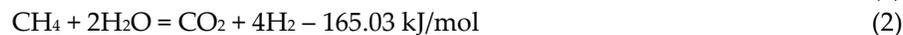
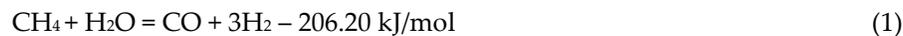
Pada makalah ini akan dibahas aspek keselamatan terkait aplikasi panas reaktor nuklir suhu tinggi untuk proses *steam reforming* gas alam. Reaktor nuklir suhu tinggi yang diambil sebagai contoh kasus adalah HTTR. Tujuan studi ini adalah untuk mempelajari aspek keselamatan yang perlu diterapkan ketika dilakukan aplikasi panas nuklir suhu tinggi dengan proses *steam reforming* gas alam. Diharapkan hasil studi bisa menjadi masukan guna pengambilan keputusan dalam pengembangan program nuklir di Indonesia.

2. KOPEL HTTR DENGAN STEAM REFORMING GAS ALAM

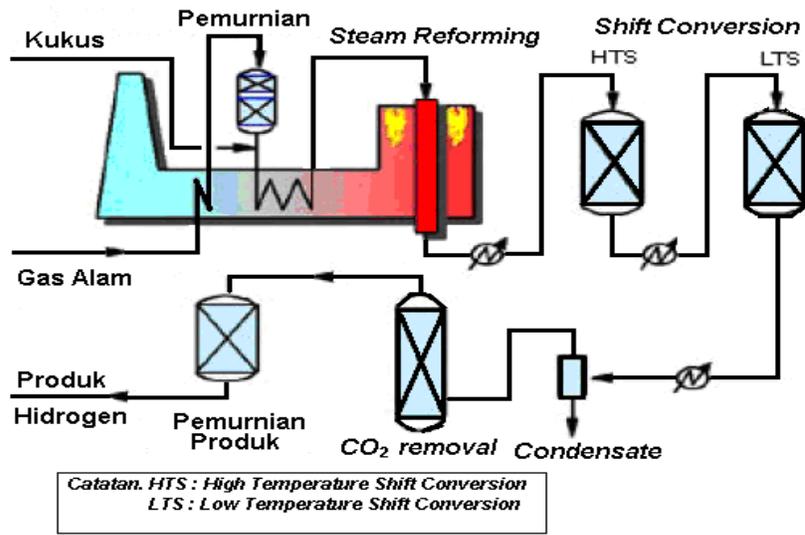
2.1 Steam Reforming Gas Alam

Steam reforming gas alam adalah proses kimia suhu tinggi yang reaksinya bersifat endotermis. Pemanfaatan energi panas nuklir menggantikan bahan bakar fosil diharapkan cukup signifikan menghemat cadangan bahan bakar fosil, sekaligus menghambat laju emisi CO₂. Disamping itu, hidrogen sebagai produk proses, merupakan alternatif bahan bakar masa depan yang bersih lingkungan, juga merupakan bahan baku penting untuk industri petrokimia yang kebutuhannya terus meningkat.

Prinsip dasar reaksi steam reforming gas alam adalah reaksi endotermis yang berlangsung pada suhu tinggi mengikuti persamaan reaksi sebagai berikut^[3,4]:



Reaksi 1 dan 2 disebut reaksi *steam reforming* yang merupakan reaksi endotermis dan berlangsung pada suhu tinggi 800-950°C, menghasilkan gas sintesis (campuran CO dan H₂), CO₂, dan CH₄ tak terkonversi. Sedang reaksi 3 antara CO dengan kukus disebut reaksi *water-gas shift* akan menambah produksi H₂ dan CO₂. Setelah melalui proses pemurnian akan diperoleh hidrogen sebagai produk yang diinginkan. Komposisi gas hasil ditentukan oleh keseimbangan reaksi 1, 2, dan 3. Sedangkan stoikiometri dari produk dikontrol dengan mengatur kondisi operasi reaksi 3. Untuk mencapai komposisi produk yang ideal dalam memproduksi hidrogen dengan *steam reforming* gas alam, kondisi operasi suhu 800-950°C dan tekanan 1-3 MPa adalah yang paling ideal. Pengalaman empiris menunjukkan bahwa penurunan suhu dan kenaikan tekanan akan menurunkan konsentrasi hidrogen dalam keseimbangan campuran. Dengan kata lain, jika tekanan lebih dari 1-3 MPa dan suhu kurang dari 800-950°C akan menurunkan produktivitas hidrogen. Ini merupakan hal penting dalam kopel HTTR dengan proses *steam reforming* gas alam. Aspek keselamatan memaksa proses kimia beroperasi pada tekanan yang lebih tinggi dan suhu yang lebih rendah. Karena alasan keselamatan merupakan hal yang tak bisa ditawar, alternatif yang mungkin dilakukan adalah melakukan modifikasi proses steam reforming sehingga tetap bisa berlangsung pada kondisi operasi yang mampu disediakan oleh HTTR.



Gambar 1. Skema Proses Steam Reforming Gas Alam^[4]

Pada Gambar 1 ditunjukkan skema proses steam reforming gas alam. Dalam industri kimia, *steam reforming* gas alam dikenal sebagai teknologi kunci dalam memproduksi gas sintesis, hidrogen, metanol, maupun bahan kimia rantai C₁. Proses ini menjadi unit plant tersendiri pada industri-industri pupuk, maupun petrokimia^[3].

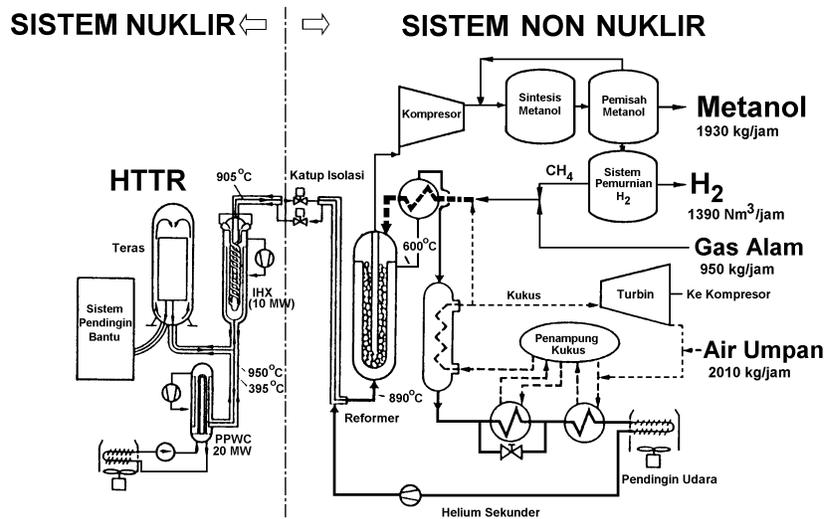
2.2 Kopel HTTR dengan *Steam Reforming* Gas Alam^[3]

Sampai saat ini, kebutuhan energi panas untuk menjalankan proses pada industri, diperoleh dengan pembakaran langsung bahan bakar fosil. Semakin terbatasnya cadangan bahan bakar fosil, dan semakin meningkatnya emisi CO₂ ke lingkungan menyebabkan semakin santernya isu pemanasan global. Hal ini mendorong para ahli nuklir untuk menyumbangkan pemikiran mengganti energi panas pembakaran bahan bakar fosil dengan panas dari reaktor nuklir. Teknologi nuklir saat ini telah menyumbang sekitar 17% kebutuhan listrik dunia, dengan total PLTN sebanyak 435 unit dengan kapasitas pembangkit listrik mencapai 368 Gwe^[5]. Hanya sejumlah kecil produksi energi nuklir dimanfaatkan sebagai energi panas seperti: untuk pemanas air, *district heating*, maupun proses desalinasi. Negara-negara yang telah memanfaatkan energi nuklir untuk proses non listrik antara lain Jepang, Kanada, Cina, Kazakhstan, Rusia, dan Ukraina. Total panas dari reaktor nuklir yang telah dimanfaatkan untuk keperluan non listrik baru sekitar 5 Gwth.

Diantara berbagai reaktor nuklir yang dikembangkan di negara-negara maju, reaktor suhu tinggi berpendingin gas (*High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR*) adalah jenis reaktor paling menjanjikan untuk aplikasi industri suhu tinggi. Hal ini karena luaran suhu reaktor yang dibawa oleh pendingin gas helium bisa mencapai 1000°C. Aplikasi suhu tinggi untuk industri kimia yang banyak dikembangkan di negara-negara maju adalah untuk proses kimia suhu tinggi yang reaksi kimianya endotermis. Hal ini karena reaksi seperti itu membutuhkan energi panas dalam jumlah besar dan suhu tinggi yang jika dipasok dari pembakaran bahan bakar fosil akan sangat memboroskan dan meningkatkan laju emisi CO₂.

Pada Gambar 2 disajikan kopel HTTR (HTGR versi Jepang) dengan proses *steam reforming* gas alam yang dikembangkan di Jepang^[3,6]. Nampak pada gambar tersebut bahwa

zona nuklir dan zona proses kimia dipisahkan oleh alat penukar panas *intermediate* yang akan dibahas lebih lanjut pada bab berikutnya.



Gambar 2. Kopel HTTR dengan Proses Steam Reforming Gas Alam^[3]

3. ASPEK KESELAMATAN

Prinsip dasar aspek keselamatan yang perlu diterapkan dalam aplikasi suhu tinggi reaktor nuklir untuk proses kimia, adalah menjaga agar tidak terjadi kemungkinan lepasan bahan radioaktif baik ke lingkungan maupun ke instalasi proses kimia. Secara garis besarnya, aspek keselamatan yang diterapkan meliputi hal-hal sebagai berikut^[7].

Penghalang Ganda dan Ekstra (*Multiple and Extra Barrier*)

Reaktor nuklir suhu tinggi dirancang mempunyai penghalang ganda untuk mencegah keluarnya produk fisi ke lingkungan. Penghalang ganda pada HTGR meliputi *coating* bahan bakar, sistem pendingin reaktor, tangki pengungkung, dan gedung reaktor. Semua reaktor HGTR memiliki penghalang ganda tersebut, kecuali tangki pengungkung yang melengkapi sistem penghalang pada HTTR Jepang. Tangki pengungkung ini merupakan penghalang ekstra untuk mengungkung produk fisi, dan untuk membatasi kemungkinan masuknya udara yang memungkinkannya bereaksi dengan grafit pada reaktor ketika terjadi kecelakaan.

Pada HTTR, sistem pendingin harus mampu menghalangi kemungkinan terjadinya pelepasan radioaktif ke lingkungan. Gas helium bertekanan digunakan sebagai pendingin reaktor karena kinerja pendinginannya yang bagus dan karakteristik kimia dan neutronik yang bersifat inert. Pada IHX, tekanan helium sekunder dirancang sedikit lebih tinggi daripada tekanan helium primer untuk mencegah kemungkinan mengalirnya kontaminasi radioaktif dari sistem primer ke sekunder jika terjadi kebocoran sekecil apapun pada sistem pemipaan. Sistem ini merupakan penghalang ekstra untuk zona proses kimia.

Keseimbangan Tekanan

Dalam prinsip instalasi nuklir, selalu dirancang agar tekanan dari wilayah non radioaktif lebih besar daripada tekanan pada wilayah radioaktif. Demikian juga pada aplikasi kopel HTTR dengan *steam reforming* gas alam. Karena tekanan pendingin helium yang akan

dimanfaatkan panasnya adalah 4,1 MPa, maka harus dirancang bahwa tekanan operasi proses *steam reforming* gas alam lebih besar dari 4,1 MPa. Pada desain sistem kopel HTTR dengan *steam reforming* gas alam, tekanan proses dirancang 4,5 MPa dengan tujuan mencegah kemungkinan aliran kontaminan radioaktif dari daerah radioaktif ke daerah proses kimia, jika terjadi kebocoran sistem pemipaan pada IHX. Disamping itu, dari analisis desain, rancangan tekanan ini juga akan menjamin integritas struktur tabung katalisator pada reaktor reformer pada suhu tinggi.

Sayangnya tekanan yang tinggi ini sangat merugikan ditinjau dari sisi proses kimia, karena tekanan ideal untuk operasi optimum proses *steam reforming* adalah pada kisaran harga 1-3 MPa. Tetapi karena tuntutan keselamatan lebih penting, dilakukan modifikasi sistem produksi sedemikian rupa agar proses dapat beroperasi secara optimum pada tekanan 4,5 MPa

Intermediate Heat Exchanger

IHX merupakan *interface* antara zona nuklir dengan zona proses kimia. IHX yang merupakan alat penukar panas helium-helium, diperlukan untuk menghindari sekecil mungkin terjadinya kontaminasi radioaktif di zona proses kimia. Pada IHX, mengalir helium sekunder yang murni bebas dari kontaminasi radioaktif, mengambil panas dari helium primer yang keluar dari HTTR. Helium primer keluar dari HTTR pada suhu 905°C, dan mampu memindahkan panasnya ke helium sekunder. Kemudian karena penurunan suhu sepanjang pipa, helium sekunder pada suhu 890°C dimanfaatkan untuk menjalankan proses *steam reforming* gas alam. Pemanfaatan IHX yang bertujuan menjamin aspek keselamatan, lagi-lagi merugikan dari sisi suhu operasi. Dengan pemanas helium pada suhu 890°C, karena perpindahan panas yang terjadi adalah konveksi paksa, suhu maksimum yang bisa dicapai pada daerah tabung katalisator hanya sekitar 800°C, dengan fluks panas hanya sekitar 10.000-20.000 W/m². Sebagai perbandingan, pada proses konvensional yang sudah komersial, energi panas pembakaran bahan bakar fosil masuk ke reformer pada suhu sekitar 950°C, dan karena proses perpindahan panas yang terjadi antara sistem pemanas dengan daerah katalisator adalah radiasi termal maka fluks panas yang dihasilkan bisa mencapai 50.000-80.000 W/m², jauh lebih besar dibanding proses dengan panas nuklir. Lagi-lagi sistem keselamatan dengan *interface* IHX merugikan ditinjau dari sisi proses kimia.

Transfer Bahan Radioaktif ke Unit Proses

Transfer bahan radioaktif dari sistem zona nuklir ke zona proses kimia bisa terjadi dengan dua cara:

- karena kebocoran sistem pemipaan pendingin primer yang mengakibatkan terlepasnya bahan radioaktif ke sistem sekunder
- karena terjadinya permeasi tritium melalui dinding pipa perpindahan panas.

Pada desain HTTR, karena ada tekanan pendingin primer lebih rendah daripada pendingin sekunder, tidak dimungkinkan adanya bahan radioaktif lepas ke zona proses kimia. Bahkan jika terjadi penurunan tekanan pada sistem sekunder karena kebocoran kecil pada sistem pemipaan, level aktivitas radioaktif masih hanya 1/5 nya lebih rendah daripada permeasi tritium melalui dinding pipa perpindahan panas^[7].

Permeasi tritium merupakan proses alamiah yang terjadi pada operasi suhu tinggi. Pada aplikasi HTTR, permeasi tritium terjadi secara difusi melalui dinding pipa perpindahan panas. Dalam operasi HTTR, tritium selalu ada dalam sistem pendingin primer sebagai produk

fisi yang keluar dari *coating* bahan bakar, dan produk reaksi penangkapan neutron terhadap boron yang digunakan sebagai batang kendali ataupun racun dapat bakar.

4. PEMBAHASAN

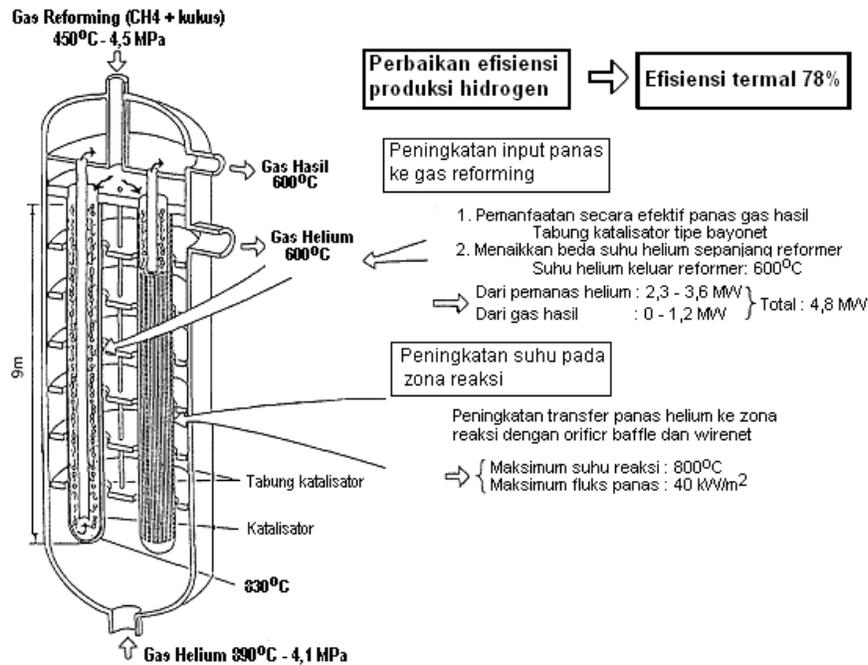
Telah disebutkan bahwa produksi optimal proses *steam reforming* gas alam dengan sumber panas konvensional tercapai pada kondisi suhu 800-950°C dan tekanan 1-3 MPa. Penerapan aspek keselamatan memaksa mengoperasikan reformer dengan suhu masukan sekitar 890°C dan tekanan diatas 4,1 Mpa. Dengan masukan suhu pemanas helium 890°C, karena perpindahan panas yang terjadi adalah konveksi paksa, reaksi pada zona katalisator hanya mencapai suhu sekitar 800°C. Hal ini mengakibatkan menurunnya efisiensi termal proses *steam reforming* gas alam dengan panas nuklir. Karena aspek keselamatan merupakan hal sangat penting, maka perbaikan proses difokuskan pada modifikasi desain reformer. Berikut adalah beberapa modifikasi yang dilakukan untuk memperbaiki proses^{18,91}:

Keseimbangan tekanan. Aspek keselamatan dasar mengharuskan bahwa tekanan proses non nuklir harus lebih tinggi daripada tekanan gas helium. Untuk itu dirancang keseimbangan tekanan, yaitu dibuat tekanan operasi proses sedekat mungkin dengan tekanan gas helium, tapi masih memungkinkan untuk proses kimia. Analisis desain menunjukkan bahwa tekanan 4,5 MPa cukup memadai, dalam arti aspek keselamatan bisa terpenuhi, tapi aspek proses kimia juga tidak terlalu mengganggu.

Meningkatkan efektivitas pemanfaatan panas.

- Peningkatan input panas ke umpan gas. Gas helium keluar reformer dimanfaatkan untuk memanaskan gas *reforming* yaitu umpan CH₄ dan kukus sampai suhu 450°C. Dengan cara ini diperoleh 2 keuntungan: ketika gas umpan mencapai zona tabung katalisator, suhunya bisa naik mencapai 830°C. Sedangkan gas helium keluar dari reformer, karena dimanfaatkan panasnya suhunya turun menjadi 600°C. Peningkatan beda suhu antara helium masuk dan keluar akan meningkatkan input panas ke tabung katalisator. Dengan cara ini, total panas yang bisa mencapai tabung katalisator tidak saja berasal dari gas helium yang masuk ke *reformer* tapi juga berasal dari gas helium yang keluar dari *reformer*.
- Peningkatan suhu reaksi pada tabung katalisator juga dilakukan dengan memperlama waktu tinggal (*residence time*) gas helium di dalam *reformer* dengan memasang *orifice baffle* dan *wirenet*. Ini sesuai dengan prinsip perpindahan panas, semakin lama waktu tinggal akan semakin optimum proses perpindahan panas. Dengan cara ini tidak saja suhu operasi pada tabung katalisator bisa mencapai 830°C, perpindahan panas pun bisa meningkat secara optimum sehingga fluks panas pada zona tabung katalisator bisa mencapai 40.000 W/m².

Peningkatan efektivitas pemanfaatan panas seperti disebutkan di atas, bisa dilakukan dengan memanfaatkan reaktor *reformer* tipe bayonet seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Reaktor Reformer tipe Bayonet dan prinsip peningkatan Efisiensi^[8,9,10]

Sebagai hasil modifikasi proses, diperoleh total efisiensi termal yang lebih tinggi meskipun masih lebih rendah daripada efisiensi termal proses dengan sumber panas konvensional. Pada Tabel 1 disajikan perbandingan proses steam reforming gas alam.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Steam Reformer^[3,9]

Reformer	Konvensional	HTTR	HTTR modifikasi reformer
Tekanan Operasi Reformer	1 – 3 MPa	>Tekanan Helium 4.1 MPa	Keseimbangan Tekanan ($\cong P_{He}$) → 4.5 MPa
Suhu Operasi, °C	850 – 900	≤800	830
Fluks panas, W/m ²	50.000 – 80.000	10.000 – 20.000	40.000
Efisiensi termal, %	80 ~ 85	~50	78

Permeasi tritium merupakan proses alamiah yang terjadi pada operasi suhu tinggi. Pada operasi reaktor suhu tinggi, permeasi tritium terjadi secara difusi melalui dinding pipa perpindahan panas. Keberadaan tritium dalam sistem pendingin primer adalah produk fisi yang lepas dari *coating* bahan bakar, dan produk reaksi penangkapan neutron terhadap boron yang digunakan sebagai batang kendali dan racun dapat bakar. Studi di Amerika menunjukkan bahwa pada kondisi terburuk, lepasan tritium yang mungkin bisa mencapai zona proses diperkirakan hanya 90 Ci/th^[11]. Studi kopel MH GTR-PH dengan proses produksi metanol menunjukkan bahwa konsentrasi tritium pada produk metanol kurang dari 4×10^{-11} Ci/cc. Harga ini jauh lebih rendah dari ambang yang diijinkan untuk kontaminasi *effluent* larutan yaitu 3×10^{-9} Ci/cc. Studi di Rusia pada kopel HTGR untuk produksi pupuk amonia menunjukkan bahwa aktivitas tritium pada produk akhir menyebabkan dosis radiasi ke publik sekitar 2-5 mikrorem/tahun.orang, atau hanya sekitar 1/3 – 1/2 lebih rendah dari radiasi latar^[12].

5. KESIMPULAN

Dari studi dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- Penukar panas intermediate (IHX) berperan penting dalam aplikasi reaktor nuklir suhu tinggi untuk proses kimia. IHX berperan sebagai *interface* yang memisahkan antara zona nuklir dengan zona proses kimia.
- Penerapan aspek keselamatan mengakibatkan kondisi operasi (tekanan dan suhu) energi panas yang dipasok dari HTTR berada di luar range optimum proses steam reforming gas alam. Perlu dilakukan modifikasi desain reformer untuk memenuhi kondisi tersebut.
- Prinsip keseimbangan tekanan antara helium primer, helium sekunder, dan proses kimia, serta pemanfaatan energi panas secara efektif dapat meningkatkan efisiensi termal *steam reforming* gas alam dengan panas nuklir.

PUSTAKA

1. SOENTONO, S., (2006), Peran BATAN dalam alih Teknologi Energi Nuklir di Indonesia, Seminar Nasional ke-12 Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta
2. _____, (2001), Nuclear Hydrogen Society Established in Japan, International Journal of Hydrogen Energy 26.
3. HADA, K., Fujimoto, N., Sudo, Y., (1992), Design of Steam Reforming Hydrogen and Methanol Co-production System to be Connected to the HTTR, Technical Committee Meeting on High Temperature Application of Nuclear Energy, Oarai, Japan.
4. _____, (2005) www.nyserda.org, Hydrogen Production – Steam Methane Reforming (SMR)
5. _____, Statistik Energi Nuklir 2007, PPEN BATAN, Jakarta, 2007.
6. MASAO, H. (2002), “Nuclear Hydrogen Activities in Japan”, Technical Workshop on Large Scale Production of Hydrogen from Nuclear Power, San Diego, USA.
7. FUJIMOTO, N., SAIKUSA, A., HADA, K., SUDO, Y., (1992), Safety Analysis and Considerations for HTTR Steam Reforming Hydrogen/Methanol Co-production System, Technical Committee Meeting on High Temperature Application of Nuclear Energy, Oarai, Japan.
8. IAEA TECDOC 1085, (1999), Hydrogen as an Energy Carrier and Its Production by Nuclear Power, IAEA Publication, Vienna.
9. MASAO, H., SHIOZAWA, S., (2005), “Research and Development for nuclear production of hydrogen in Japan”, OECD/NEA 3rd Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen, Oarai.
10. FUJIMOTO, N., FUJIKAWA, S., HAYASHI, H., NAKAZAWA, T., IYOKU, T., KAWASAKI, K., (2005), Present Status of HTTR Project, Achievement of 950C of Reactor Outlet Coolant Temperature, GTHTR300C for Hydrogen Cogeneration, OECD/NEA 3rd Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen, Oarai.
11. SCHLEICHER, R.W., KENNEDY, A.J., (1992), Potential Application of High Temperature Helium, Proceeding of the 2nd JAERI Symposium on HTGR Technologies, Oarai.
12. GREBENNIK, V.N., (1992), Possible Application and Characteristics of HTGR used for Industrial Cogeneration, Proceeding of the 2nd JAERI Symposium on HTGR Technologies, Oarai.