

## **STEAM REFORMING GAS ALAM DENGAN REAKTOR MEMBRAN MENGGUNAKAN REAKTOR NUKLIR TEMPERATUR MEDIUM**

**Djati H. Salimy**

Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) - BATAN  
Jl. Abdul Rohim Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710  
Telp./Faks. 021-5204243, Email: [djatihs@batan.go.id](mailto:djatihs@batan.go.id)

Masuk: 18 Oktober 2010

Direvisi: 25 Oktober 2010

Diterima: 16 November 2010

### **ABSTRAK**

#### **PRODUKSI HIDROGEN PROSES STEAM REFORMING GAS ALAM DENGAN REAKTOR MEMBRAN MENGGUNAKAN REAKTOR NUKLIR TEMPERATUR MEDIUM.**

Telah dilakukan pengkajian proses steam reforming gas alam dengan reaktor membran untuk produksi hidrogen dengan memanfaatkan reaktor nuklir temperatur medium sebagai sumber energi panas. Berbeda dengan proses konvensional steam reforming gas alam yang beroperasi pada temperatur tinggi (800-1000°C), proses steam reforming dengan reaktor membran beroperasi pada temperatur yang relatif rendah (~500°C). Ini dimungkinkan karena pemanfaatan membran perm-selective yang memisahkan produk secara simultan di dalam reaktor, mendorong tercapainya konversi optimal pada temperatur yang lebih rendah. Di samping itu reaktor membran perm-selective juga mampu mengambil alih peran pemisahan produk sehingga unit pabrik jauh lebih kompak. Dari sisi pemanfaatan panas nuklir, rendahnya temperatur operasi membuka peluang pemanfaatan reaktor nuklir temperatur medium sebagai sumber panas proses. Kopel reaktor nuklir temperatur medium dengan proses diharapkan akan menguntungkan dari sisi penghematan bahan bakar fosil yang berimplikasi pada penurunan emisi gas rumah kaca.

**Kata kunci:** steam reforming gas alam, reaktor membran, reaktor nuklir temperatur medium

### **ABSTRACT**

#### **MEMBRANE STEAM REFORMING OF NATURAL GAS FOR HYDROGEN PRODUCTION BY UTILIZATION OF MEDIUM TEMPERATURE NUCLEAR REACTOR.**

The assessment of steam reforming process with membrane reactor for hydrogen production by utilizing of medium temperature nuclear reactor has been carried out. Difference with the conventional process of natural gas steam reforming that operates at high temperature (800-1000°C), the process with membrane reactor operates at lower temperature (~500°C). This condition is possible because the use of perm-selective membrane that separate product simultaneously in reactor, drive the optimum conversion at the lower temperature. Besides that, membrane reactor also acts the role of separation unit, so the plant will be more compact. From the point of nuclear heat utilization, the low temperature of process opens the chance of medium temperature nuclear reactor utilization as heat source. Couple the medium temperature nuclear reactor with the process give the advantage from the point of saving fossil fuel that give direct implication of decreasing green house gas emission.

**Keywords:** natural gas steam reforming, membrane reactor, medium temperature nuclear reactor.

## 1. PENDAHULUAN

Sampai saat ini lebih dari 85% kebutuhan hidrogen dunia diproduksi dengan proses *steam reforming* gas alam, yang beroperasi pada temperatur tinggi (800-1000°C) dengan sumber energi panas pembakaran bahan bakar fosil<sup>[1]</sup>. Pembakaran bahan bakar fosil sebagai sumber energi panas, berakibat pada tingkat pemborosan cadangan bahan bakar fosil serta peningkatan emisi CO<sub>2</sub> yang cukup besar. Substitusi sumber energi panas dengan reaktor nuklir dapat mengurangi laju pengurasan cadangan bahan bakar fosil, sekaligus menurunkan laju emisi CO<sub>2</sub>. Berbagai studi aplikasi panas nuklir temperatur tinggi telah dilakukan, namun masih menunggu realisasi komersialisasi reaktor temperatur tinggi<sup>[2]</sup>. Untuk itu, berbagai litbang proses *steam reforming* terus dilakukan untuk memperoleh proses yang dimungkinkan beroperasi pada temperatur lebih rendah sehingga reaktor nuklir temperatur medium dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi panas. Salah satu proses yang diharapkan dapat diandalkan adalah proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor membran yang dapat menurunkan temperatur operasi pada kisaran 500-600°C. Temperatur ini jauh lebih rendah dibanding proses *steam reforming* gas alam konvensional yang beroperasi pada kisaran temperatur 800-1000°C.

Sebagai modifikasi proses *steam reforming* gas alam, beberapa dasawarsa terakhir ini, dilakukan pengembangan proses *steam reforming* gas alam dengan memanfaatkan *perm-selective membrane* sebagai media reaktor. Reaktor membran didefinisikan sebagai sebagai peralatan kimia yang mengkombinasikan ruang reaksi yang berisi katalisator sebagai tempat berlangsungnya reaksi, dengan membran *perm-selective* untuk menambahkan pereaksi dan atau mengusir produk<sup>[3]</sup>. Pada proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor membran, reaktor berfungsi sebagai tempat terjadinya reaksi sekaligus pemisahan produk. Membran yang mampu berfungsi memisahkan produk hidrogen dari campuran pereaksi sisa dan produk samping secara simultan, menguntungkan ditinjau dari sisi keseimbangan reaksi. Dengan dipisahkannya hidrogen menggunakan membran *perm-selective* palladium, keseimbangan reaksi bergeser ke kanan seolah tanpa batas, sehingga reaksi optimal bisa dicapai pada temperatur 500°C<sup>[4,5]</sup>. Jika pada proses konvensional, konversi reaksi dibatasi oleh keseimbangan reaksi yang terjadi pada temperatur tinggi (800-1000°C), pada proses dengan reaktor membran, konversi reaksi lebih dipengaruhi oleh tingkat porositas dan difusivitas membran. Beberapa penelitian terakhir menyebutkan pemanfaatan reaktor membran mampu meningkatkan konversi pembentukan hidrogen sampai 96%<sup>[4]</sup>. Dari sisi operasi, pemanfaatan reaktor membran dalam proses *steam reforming* akan memberikan keuntungan karena instalasi pabrik akan jauh lebih kompak. Instalasi pabrik tidak lagi membutuhkan unit pemisahan dan unit *shift-converter* karena fungsinya telah diambil alih oleh reaktor membran.

Konsep aplikasi energi nuklir sebagai sumber energi (panas dan listrik) untuk industri telah dikaji lebih dari 50 tahun. Reaktor temperatur tinggi berpendingin gas (HTGR) yang beroperasi pada temperatur tinggi (~1000°C) dan reaktor pembiak cepat (FBR) yang beroperasi pada temperatur medium (500-700°C) diperkirakan merupakan jenis reaktor yang sangat potensial menyumbangkan produksinya untuk kebutuhan industri. Jika sampai saat ini dari reaktor nuklir komersial hanya menghasilkan listrik, ada suatu prediksi bahwa nantinya reaktor nuklir juga dapat menghasilkan hidrogen sebagai energi alternatif<sup>[6]</sup>. Tersendatnya komersialisasi reaktor temperatur tinggi, mendorong sejumlah pakar nuklir untuk mengembangkan reaktor nuklir temperatur medium dan rendah untuk dapat dimanfaatkan panas nuklirnya sebagai sumber panas untuk kepentingan industri. Sejumlah studi di negara-negara maju terkait dengan pemanfaatan reaktor temperatur medium terus dilakukan. Sebagai contoh di Rusia dikembangkan reaktor temperatur medium BN600 untuk dikopel dengan proses pencairan batubara menghasilkan bahan bakar sintetis.

Dalam makalah ini akan dibahas proses *steam reforming* gas alam menggunakan reaktor membran produksi hidrogen dengan memanfaatkan panas reaktor nuklir temperatur medium. Tujuan studi adalah untuk memahami berbagai aspek dan karakteristik proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor membran serta kemungkinan pemanfaatan reaktor nuklir temperatur medium sebagai sumber energi panas untuk menjalankan proses.

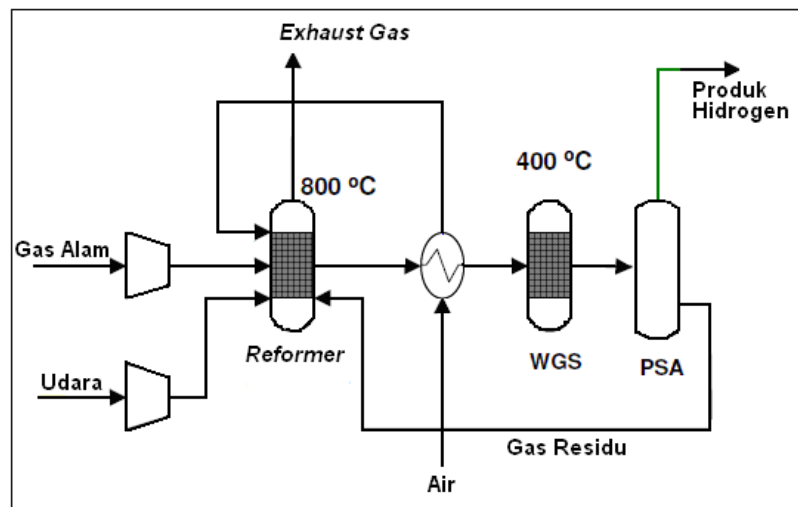
## 2. PROSES STEAM REFORMING GAS ALAM DENGAN PANAS NUKLIR

### 2.1. Steam Reforming Gas Alam Proses Konvensional

Proses konvensional *steam reforming* gas alam merupakan teknologi yang paling *established* dan paling banyak dipakai pada saat ini. Diperkirakan lebih dari 85% produksi hidrogen di dunia dihasilkan dengan proses ini. Proses *steam reforming* gas alam melibatkan 2 buah reaksi, yaitu reaksi *reforming* yang sangat endotermis (Persamaan 1) dan dan reaksi *water-gas shift* yang sedikit eksotermis (Persamaan 2)<sup>[5,7]</sup>.



Sedangkan total reaksi (1) dan reaksi (2) sering disebut sebagai reaksi *reforming-shift* dengan persamaan reaksi:



Gambar 1. Diagram Alir Proses Steam Reforming Gas Alam<sup>[8]</sup>

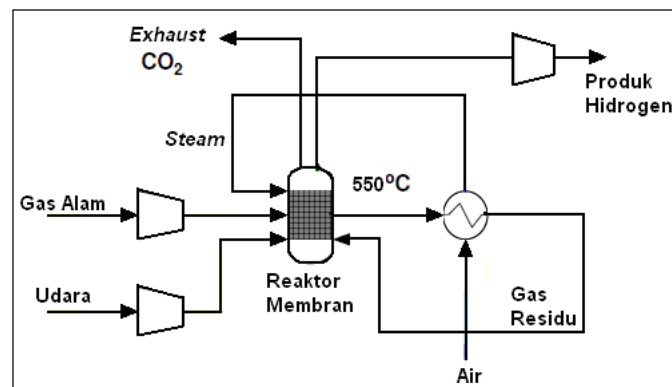
Diagram alir proses *steam reforming* gas alam dapat dilihat pada Gambar 1. Pada proses konvensional, reaktor *reformer* bentuk tabung *fixed-bed* yang beroperasi pada temperatur 800-1000°C digunakan untuk menjalankan reaksi *reforming* yang sangat endotermis. Produk reaksi berupa campuran  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  dan  $\text{H}_2$  diumpankan ke unit *water gas shift converter* (WGS) untuk memperkaya hidrogen, kemudian dimasukkan ke unit pemisah (*pressure swing adsorbtion*, PSA) untuk memisahkan hidrogen sebagai produk dan mendaur ulang komponen lain ke *reformer*. Pada proses konvensional ini, kemampuan

konversi dibatasi oleh keseimbangan reaksi, dan operasi optimal baru dapat dicapai pada temperatur yang sangat tinggi.

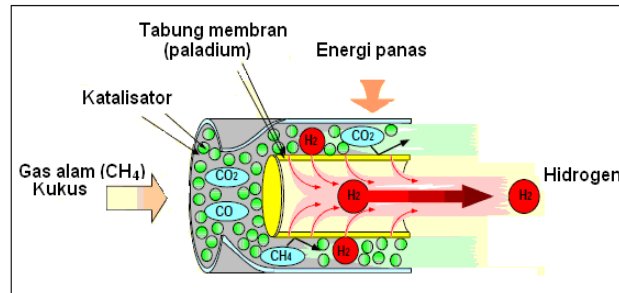
## 2.2. Steam Reforming Gas Alam dengan Reaktor Membran

Teknologi membran sudah banyak dipakai sejak lama untuk proses pemisahan yang tidak bisa dilakukan dengan teknologi pemisahan konvensional. Sebagai contoh, pemisahan campuran larutan azeotrop yang sangat tidak efisien dilakukan dengan proses distilasi, dapat dilakukan dengan efisien menggunakan teknologi membran. Pada perkembangannya, teknologi membran mulai dipakai pada reaktor kimia. Dalam reaktor kimia, membran berfungsi memisahkan produk dari pereaksi sisa dan produk samping yang tak diinginkan. Pemisahan produk secara simultan dengan reaksi kimia, akan mendorong keseimbangan reaksi ke arah produk, sehingga temperatur operasi dapat dicapai lebih rendah dibanding pada reaktor konvensional. Di samping itu, karena kemampuan membran dalam memisahkan produk dengan kemurnian tinggi, proses kimia yang memanfaatkan reaktor membran biasanya menghasilkan produk yang lebih murni<sup>[4]</sup>.

Skema proses *steam reforming* dengan reaktor membran dapat dilihat pada Gambar 2. Berbeda dengan proses konvensional, unit WGS dan PSA semuanya menyatu dalam reaktor membran (*membrane reformer*). *Steam reforming* gas alam dengan reaktor membran, dilakukan dengan memanfaatkan membran palladium yang bersifat *perm-selective* tinggi terhadap hidrogen. Proses dilangsungkan pada reaktor *fixed-bed* bentuk *shell and tube*. Tabung luar (*shell*) berisi katalisator dan berfungsi sebagai zona reaksi, yaitu tempat terjadinya reaksi. Sedang tabung bagian dalam (*tube*) terbuat dari membran palladium yang berfungsi menyerap hidrogen secara selektif. Hidrogen hasil reaksi dari zona reaksi secara selektif akan terpisah masuk ke dalam tabung bagian dalam, kemudian hidrogen dengan kemurnian tinggi mengalir ke luar dari tabung bagian dalam. Reaksi pembentukan hidrogen dan pemisahan hidrogen dengan membran *perm-selective* yang dapat dilakukan secara simultan, menyebabkan keseimbangan reaksi cenderung bergeser ke arah produk, sehingga operasi optimal dapat dicapai pada kisaran temperatur 450-600°C. Skema reaktor membran dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram Alir Proses Steam Reforming Gas Alam dengan Reaktor Membran<sup>[8]</sup>

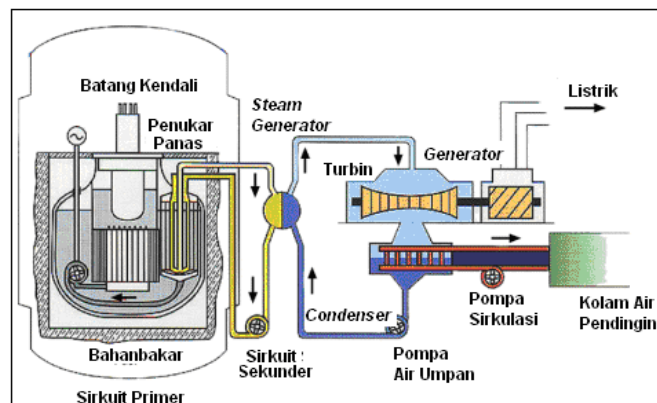


Gambar 3. Skema Proses di Reaktor Membran<sup>[7]</sup>

### 2.3. Teknologi Reaktor Nuklir Temperatur Medium

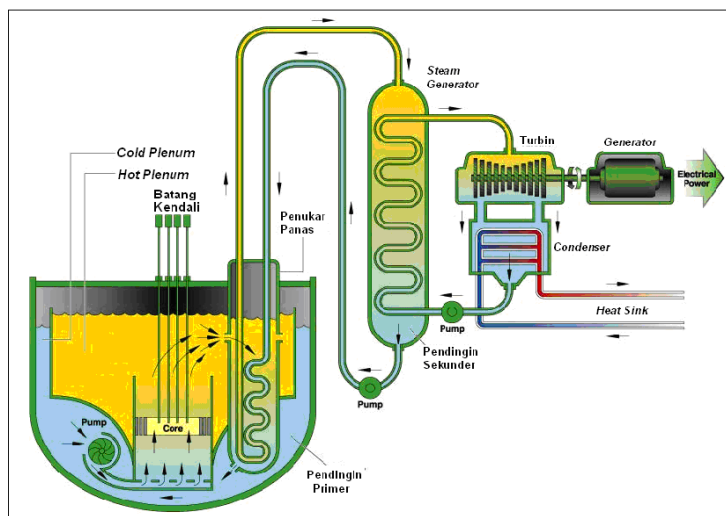
Proses *steam reforming* dengan reaktor membran yang temperatur operasinya lebih rendah dibanding proses konvensional, membuka peluang pemanfaatan reaktor nuklir temperatur medium sebagai sumber energi panas untuk mengoperasikan proses. Tujuan pemanfaatan energi panas reaktor nuklir adalah untuk mengurangi laju pembakaran bahan bakar fosil sebagai sumber energi panas. Pengurangan pembakaran bahan bakar fosil akan berimplikasi pada penghematan cadangan bahan bakar fosil, dan berpotensi menurunkan laju emisi CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang signifikan. Di samping itu, pemanfaatan reaktor nuklir untuk proses kimia juga merupakan diversifikasi pemanfaatan reaktor nuklir. Berbagai studi aplikasi reaktor temperatur medium untuk produksi hidrogen dengan proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor membran telah dilakukan<sup>[9,10,11]</sup>.

Pengembangan reaktor nuklir temperatur medium terus dilakukan di negara-negara maju. Reaktor nuklir dengan *fast neutron* tipe pembiak, telah dikembangkan di sejumlah negara. Reaktor-reaktor jenis ini dikembangkan dengan tujuan menghemat cadangan bahan bakar nuklir dunia dengan melakukan olah ulang bahan bakar bekas untuk menghasilkan plutonium dan uranium sisa yang keduanya digunakan sebagai bahan baku bahan bakar baru. Plutonium hasil olah ulang dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar MOX (*mixed oxide*). Sedangkan uranium sisa (*recovered uranium*) dimanfaatkan sebagai *blanket*, pada reaktor pembiak (*breeder*) untuk menghasilkan bahan fisil baru. Di samping tujuan pemanfaatan bahan bakar bekas, reaktor-reaktor yang beroperasi pada temperatur 500-600°C ini, potensial dimanfaatkan sebagai sumber energi panas pada proses kimia. Sebagai contoh, Rusia mengembangkan reaktor BN600 jenis *pool type* yang beroperasi pada temperatur 550°C. Berbagai studi dilakukan untuk memanfaatkan BN600 sebagai sumber energi panas pada proses pencairan batubara untuk menghasilkan bahan bakar cair sintetis. Pada Gambar 5 ditampilkan reaktor BN600 yang dikembangkan di Rusia.

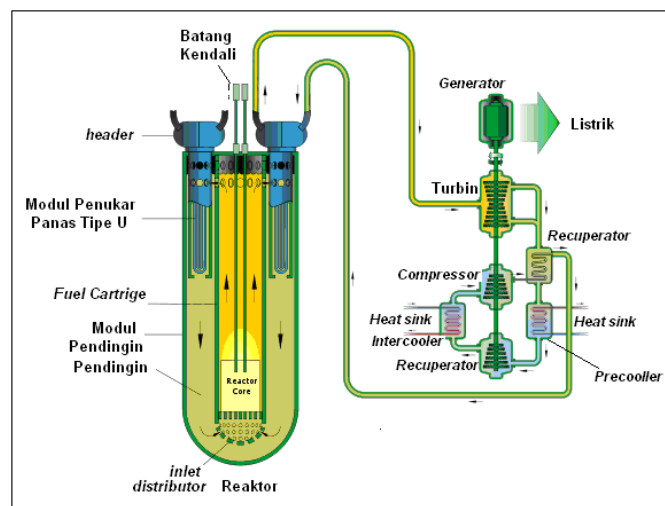


Gambar 4. Reaktor Nuklir Temperatur Medium BN600<sup>[12]</sup>

Di samping itu, dalam jajaran reaktor Generasi IV terdapat beberapa jenis reaktor temperatur medium yang secara sangat intensif dikembangkan di negara-negara maju. Reaktor jenis ini selain sebagai penghasil listrik, juga didedikasikan untuk menghasilkan panas yang dapat dimanfaatkan untuk industri. Pada Gambar 5 dan 6 ditampilkan 2 reaktor Generasi 4 yang sedang dikembangkan di negara-negara maju. Reaktor Cepat Berpendingin Natrium (*Sodium Cooled Fast Reactor, SFR*) merupakan reaktor nuklir temperatur medium berpendingin natrium cair dengan bahan bakar MOX yaitu logam campuran uranium dan plutonium. Bahan bakar dibungkus dengan kelongsong baja yang diisi dengan natrium cair di dalam ruang kelongsong (Gambar 5). Reaktor Cepat Berpendingin Timbal Cair (*lead-cooled fast reactor, LFR*) adalah reaktor nuklir temperatur medium yang menggunakan pendingin berupa timbal (Pb) atau timbal-bismuth (Pb/Bi) dan memanfaatkan sistem pendinginan konveksi alamiah (Gambar 6). Reaktor ini beroperasi pada kisaran temperatur sebesar 550°C, dan memungkinkan ditingkatkan sampai temperatur 800°C.



Gambar 5. Reaktor Nuklir Temperatur Medium, *Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)*<sup>[13]</sup>

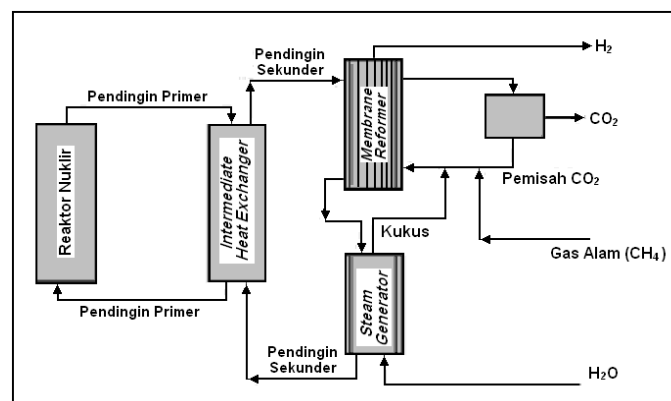


Gambar 6. Reaktor Nuklir Temperatur Medium, *Lead-cooled Fast Reactor (LFR)*<sup>[14]</sup>

## 2.4. Kopel Panas Nuklir

Studi aplikasi reaktor nuklir temperatur medium untuk produksi hidrogen dengan proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor membran telah dilakukan di beberapa negara<sup>[9,10,11]</sup>. Bahrum *dkk.*, melakukan studi kopel reaktor cepat berdaya rendah dengan pendingin timbal-bismuth untuk menjalankan proses<sup>[10]</sup>. Chikazawa *dkk.*, mengkopel proses dengan reaktor temperatur medium berpendingin sodium cair (SFR, *Sodium cooled fast reactor*)<sup>[11]</sup>. Sedangkan Hori, memodifikasi studi Chikazawa dengan model *recirculation type* untuk menekan emisi CO<sub>2</sub><sup>[9]</sup>. Pada Gambar 7, ditunjukkan salah satu diagram kopel reaktor nuklir temperatur medium dengan proses *steam reforming* gas alam menggunakan reaktor membran.

Proses panas yang dibawa oleh pendingin reaktor nuklir yang dapat berupa sodium cair atau timbal bismuth cair, pada kisaran temperatur 550°C dialirkan ke *Intermediate Heat Exchanger* (IHX) untuk memindahkan panasnya ke media sekunder. Panas yang dibawa media sekunder pada kisaran temperatur 540°C inilah yang dimanfaatkan untuk mengoperasikan proses *steam reforming*. Panas media sekunder yang keluar dari *reformer* pada temperatur sekitar 485°C dimanfaatkan untuk membangkitkan kukus sebelum diumpankan kembali ke IHX. Kukus yang dihasilkan sebagian dimanfaatkan sebagai bahan baku bersama-sama dengan CH<sub>4</sub>, sebagian lagi dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik.



Gambar 7. Kopel Reaktor Nuklir dengan Proses *Steam Reforming* Gas Alam dengan Reaktor Membran<sup>[9,11]</sup>.

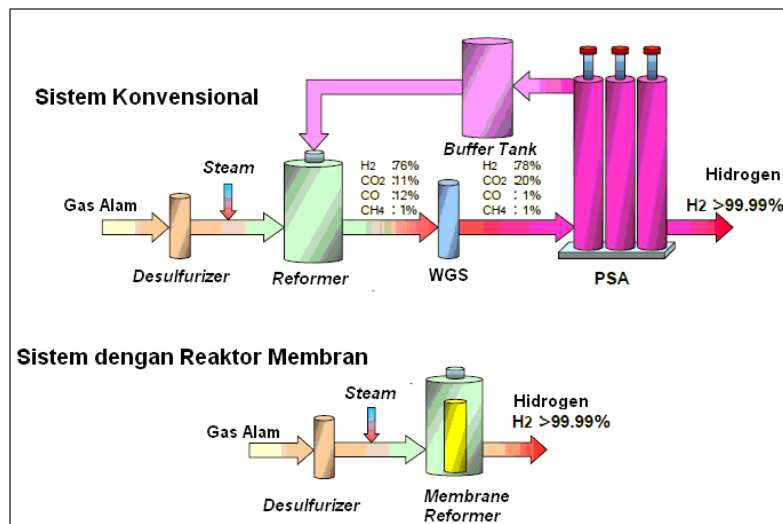
## 3. DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Untuk mengatasi ledakan permintaan hidrogen di masa yang akan datang, berbagai teknologi produksi hidrogen harus terus dicari dan dikembangkan. Sejauh ini, proses steam reforming gas alam masih mendominasi teknologi proses produksi hidrogen. Diperkirakan sekitar 85% kebutuhan hidrogen dunia dipasok dari produksi berbasis proses *steam reforming* gas alam. Proses ini berlangsung pada temperatur sangat tinggi (800-1000°C), yang berimplikasi membutuhkan energi panas dalam jumlah besar. Pasokan energi panas dengan membakar bahan bakar fosil akan berdampak pada emisi CO<sub>2</sub> yang besar dan pemborosan cadangan sumber daya energi. Studi pemanfaatan reaktor nuklir temperatur tinggi untuk mengoperasikan proses *steam reforming* gas alam telah dilakukan sejak dasawarsa 1970-an di negara-negara maju seperti Jepang, Amerika, Jerman, dan lain-lain. Jepang telah menyelesaikan studi aplikasi reaktor nuklir temperatur tinggi untuk proses *steam reforming* gas alam pada awal dasawarsa 2000an, dan memasuki tahap implementasi ujicoba kopel nuklir. Diperkirakan pada awal dasawarsa 2010-an, kopel nuklir temperatur tinggi HTTR dengan proses *steam reforming* gas alam skala *demonstration plant*, akan beroperasi. Namun

demikian, komersialisasi kopel nuklir ini diperkirakan masih akan terkendala dengan belum komersialnya HTGR.

Proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor membran yang beroperasi pada kisaran temperatur yang lebih rendah (500-600°C), akan menguntungkan. Operasi pada temperatur lebih rendah berimplikasi pada berkurangnya kebutuhan energi panas untuk menjalankan operasi. Hal ini akan menguntungkan dari sisi penurunan emisi pembakaran bahan bakar panas, dan penghematan bahan bakar fosil. Jika sumber energi panas memanfaatkan reaktor nuklir, lebih rendahnya temperatur operasi membuka peluang pemanfaatan reaktor nuklir temperatur medium.

Dari sisi proses kimia, kemampuan reaktor membran perm-selective mengambil alih terjadinya proses reaksi sekaligus pemisahan produk, akan menguntungkan karena pabrik akan lebih kompak. Unit proses water-gas shift reaction dan pemisahan hidrogen dapat dihilangkan dari instalasi pabrik. Hal ini jelas akan menguntungkan dari sisi ekonomi. Pada Gambar 8 disajikan perbandingan instalasi proses steam reforming konvensional dan steam reforming dengan reaktor membran.



Gambar 8. Perbandingan Unit Proses *Steam Reforming* Gas Alam Sistem Konvensional dan Reaktor Membran<sup>[9]</sup>

Meskipun sampai sejauh ini PLTN di Indonesia belum terwujud, tetapi dapat diperkirakan ketika PLTN pertama di Indonesia dibangun, dunia sudah memasuki era reaktor nuklir Generasi IV. Pada era ini, reaktor nuklir tidak saja dimanfaatkan untuk produksi listrik, tetapi juga dimanfaatkan sebagai sumber energi panas untuk memasok kebutuhan panas industri. Berbagai kajian aplikasi panas reaktor nuklir untuk keperluan non listrik perlu terus dicermati, agar Indonesia tidak terlalu ketinggalan pada saat memasuki program PLTN secara nyata. Hal ini sesuai dengan kebijakan pemanfaatan energi nuklir guna pembangkitan listrik dan kogenerasi di Indonesia yaitu terwujudnya peran energi nuklir secara simbiotik dan sinergistik dengan sumberdaya energi tak terbarukan maupun terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi nasional guna mendukung pembangunan berkelanjutan<sup>[1]</sup>. Selain mendorong terwujudnya PLTN pertama di Indonesia, 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 temperatur tinggi dan medium seperti produksi hidrogen, gasifikasi batubara, dan lain-lain.



#### 4. KESIMPULAN

Dari kajian proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor membran menggunakan sumber energi panas reaktor nuklir temperatur medium, dapat disimpulkan:

- Pemanfaatan reaktor membran pada proses *steam reforming* gas alam akan menguntungkan karena unit pabrik menjadi jauh lebih kompak, mengingat fungsi WGS dan PSA dapat dihilangkan karena reaktor membran mampu mengambil alih fungsi tersebut.
- Temperatur operasi proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor membran yang lebih rendah, memungkinkan untuk aplikasi panas reaktor nuklir temperatur medium.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. US-DOE, "National Hydrogen Energy Roadmap, National Hydrogen Energy Roadmap Workshop", Washington DC, 2002.
- [2]. HORI, M., SHIOZAWA, S., "Research and Development for Nuclear Production of Hydrogen in Japan", OECD/NEA 3rd Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen, Oarai, 2005.
- [3]. \_\_\_\_\_, Membrane, <http://en.wikipedia.org/wiki/Membrane>, April 2010.
- [4]. FERNANDES, F. A. N., SOARES, A. B., "Modelling of Methane Steam Reforming in a Palladium Membrane Reactor", Journal of Latin American Applied Research, 36:155-161 (2006).
- [5]. DE FALCO, M., IAQUANIELLO, G., MARRELLI, L., "Reformer and Membrane Modules Plant for Natural Gas Conversion to Hydrogen: Performance Assessment", AIDIC Conferene Series, Vol. 9, 2009, 93-100 DOI:10.3303/ACOS0909012.
- [6]. CHARLES, W.F, "Hydrogen, Electricity, and Nuclear Power", Nuclear News, Sept. 2002.
- [7]. SILVA, L. C., MURATA, V. V., HORI, C. E., ASSIS, A. J., "Optimization of a Membrane Reactor for Hydrogen Production Through Methane Steam Reforming Using Experimental Design Techniques and NPSOL", Proceedings of International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 2008.
- [8]. DAMLE, A., ACQUAVIVA, J., "Membrane Reactor for Hydrogen Production", Proceeding of AIChE 2008 Annual Meeting, Philadelphia, 2009.
- [9]. HORI, M., MATSUI, K., TASHIMO, M., YASUDA, I., "Synergistic Hydrogen Production by Nuclear-Heated Steam Reforming of Fossil Fuels, of Fossil Fuels and Nuclear Energy for the Energy Future", Proceedings of The 1st COE-INES International Symposium INES-1, November 1, Tokyo, JAPAN, 2004.
- [10]. BHRUM, A. S., SU'UD, Z., WARIS, A., WAHJOEDI, B. A., "Design Study and Analysis of Pb-Bi Cooled Fast Reactor for Hydrogen Production", Proceedings of International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering in Conjunction with LKSTN, 2007.
- [11]. CHIKAZAWA, Y., KONOMURA, M., UCHIDA, S., SATO, H., "A Feasibility Study of A Steam Methane Reforming Hydrogen Production Plant With A Sodium-Cooled Fast Reactor", Journal of Nuclear Technology, Vol. 152, No. 3, December 2005.
- [12]. \_\_\_\_\_, "BN-600 Reactor", [http://en.wikipedia.org/wiki/BN-600\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/BN-600_reactor), Januari 2011
- [13]. \_\_\_\_\_, "Sodium-Cooled Fast Reactor", [http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium-cooled\\_fast\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium-cooled_fast_reactor), Januari 2011.
- [14]. \_\_\_\_\_, "Lead-Cooled Fast Reactor", <http://en.wikipedia.org/wiki/Lead-cooled-fast-reactor>, Januari 2011.
- [15]. SOENTONO, S., "Peran BATAN dalam Alih Teknologi Energi Nuklir di Indonesia", Seminar Nasional ke-12 Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, 12-13 September 2006.