

**ENERGI NUKLIR SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF  
PADA PROSES PRODUKSI HIDROGEN**

Djati Hoesen Salimy\*

**ABSTRAK**

**ENERGI NUKLIR SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF PADA PROSES PRODUKSI HIDROGEN.** Pengkajian peran energi nuklir sebagai pendukung sistem produksi hidrogen di masa yang akan datang telah dilakukan. Menipisnya cadangan minyak mentah ringan, mendorong meningkatnya eksplorasi minyak mentah berat. Hal ini berakibat pula dengan meningkatnya permintaan hidrogen untuk memproses minyak berat menjadi bahan bakar transportasi yang lebih ramah lingkungan. Di samping itu menyongsong era hidrogen sebagai bahan bakar transportasi di masa depan, maka akan dibutuhkan hidrogen dalam jumlah besar. Jika industri nuklir ingin lebih ditingkatkan perannya sebagai sumber pemasok energi, teknologi nuklir harus mampu berperan dalam produksi hidrogen. Berbagai studi di negara maju menunjukkan bahwa kopel nuklir dengan proses industri sangat dimungkinkan. Jika ini bisa direalisasikan, akan diperoleh berbagai keuntungan seperti penghematan bahan bakar fosil yang berimplikasi pada pengurangan emisi CO<sub>2</sub> ke lingkungan, dan diversifikasi pemanfaatan energi nuklir.

**ABSTRACT**

**NUCLEAR ENERGY AS AN ALTERNATIVE ENERGY AT THE PROCESS OF HYDROGEN PRODUCTION.** The assessment of nuclear energy in the future for supporting hydrogen production system has been carried out. Rapidly exhausting supplies of light crude oil has drive the exploration of heavy crude oil. Light crude oil can be converted to gasoline and jet fuel without the use of hydrogen, but converting heavy crude oil to gasoline and jet fuel requires large quantities of hydrogen. Beside that, to anticipate hydrogen era as transportation fuels, the big amount of hydrogen production is needed in the future. If nuclear want to enhance its function as energy supply, nuclear must have capability in hydrogen production system. Some studies in developed countries show that nuclear couple with hydrogen production processes is very possible. If this condition can be realised, some advantages can be obtained such as, reducing combustion of fossil fuels that give implication of decreasing of CO<sub>2</sub> emission to the environment. Diversification of nuclear energy is also the other advantage.

---

\* Pusat Pendayagunaan Iptek Nuklir (PPdIN-BATAN)

## I. PENDAHULUAN

Konsumsi hidrogen dunia untuk industri pupuk dan kilang minyak yang saat ini mencapai 50 juta ton per tahun, dengan laju sekitar 4-10% per tahun diperkirakan akan meningkat terus dengan laju yang lebih cepat. Dengan semakin menipisnya cadangan minyak mentah ringan (*light crude oil*) akan mendorong eksplorasi cadangan minyak mentah berat (*heavy crude oil*), yang untuk memprosesnya menjadi bahan bakar transportasi dibutuhkan hidrogen dalam jumlah besar[1]. Pada kilang minyak, hidrogen dimanfaatkan untuk menghasilkan bahan bakar transportasi dengan kadar hidrogen sekitar 15% sehingga diperoleh bahan bakar transportasi (*gasoline, jetfuel*) yang lebih ramah lingkungan.

Sementara itu, hidrogen juga merupakan kandidat bahan bakar transportasi yang paling menjanjikan. Ujicoba mobil hidrogen telah lama dilakukan. Pembakaran internal mesin kendaraan dengan bahan bakar hidrogen terbukti sama baiknya dengan mesin kendaraan berbahan bakar konvensional. Tapi efisiensi pembakaran langsung ini jauh lebih rendah daripada efisiensi konversi energi kimia ke energi gerak, sehingga hidrogen sebagai bahan bakar transportasi diperkirakan paling efektif jika dalam bentuk *fuel cell*. Berbagai ujicoba kendaraan *fuel cell* oleh industri-industri otomotif terkemuka dunia sejak lebih dari 50 tahun terakhir mulai menunjukkan titik terang dalam pemanfaatan *fuel cell* berbasis hidrogen sebagai bahan bakar kendaraan. Jika hasil ujicoba ini memberikan hasil yang positif diperkirakan pada akhir dasawarsa ini akan menjadi awal era mobil *fuel cell* di dunia. Pada saat itulah akan terjadi lonjakan permintaan hidrogen dalam jumlah sangat besar. Sebagai contoh, studi di Amerika menunjukkan bahwa jika era mobil *fuel cell* dimulai, Amerika sendiri membutuhkan sekitar 40 juta ton hidrogen per tahun untuk menggerakkan sekitar 100 juta mesin-mesin mobil *fuel cell* [2].

Selama ini industri nuklir berasumsi bahwa listrik merupakan *energy carrier* utama, sehingga listriklah produk utama reaktor nuklir sejak beroperasinya reaktor nuklir pertama di dunia. Di masa depan, asumsi ini boleh jadi tidak sepenuhnya benar, karena berbagai kajian terbaru menyatakan bahwa hidrogen bisa menjadi *energy carrier* terbesar pada era tahun 2050-an. Jika industri nuklir ingin menjadi sumber energi masa depan, industri nuklir harus mengantisipasi kemungkinan menjadikan hidrogen sebagai produk reaktor nuklir.

Ditinjau dari konsumsi energi dunia, hanya 33% energi yang berbentuk listrik, sisanya adalah energi untuk transportasi, rumah tangga dan industri. Sampai saat ini di seluruh dunia telah beroperasi 435 reaktor nuklir komersil yang telah menyumbang produksi listrik dunia sekitar 17%, tapi relatif sama sekali belum menyumbangkan energi untuk keperluan industri maupun transportasi yang kebutuhannya jauh lebih besar

dibanding listrik. Jika energi nuklir ingin meningkatkan peran yang lebih besar sebagai pemasok energi, nuklir harus mampu menyumbang bukan hanya listrik, tapi juga energi untuk keperluan yang lebih besar yaitu untuk industri dan transportasi. Konsep aplikasi panas nuklir sebagai sumber energi panas bagi industri telah dikaji lebih dari 50 tahun. Reaktor suhu tinggi berpendingin gas (HTGR) yang beroperasi pada suhu tinggi diperkirakan merupakan jenis reaktor yang sangat potensial menyumbangkan produksi energi panasnya untuk kebutuhan industri.

Dalam makalah ini akan ditinjau kemungkinan kopel reaktor nuklir dengan sistem produksi hidrogen dalam rangka menyongsong era energi hidrogen di masa yang akan datang.

## II. PRODUKSI HIDROGEN

### II.1 Produksi Hidrogen

Hidrogen bisa diproduksi dari berbagai sumber bahan baku dan dengan berbagai proses produksi. Bahan baku untuk produksi hidrogen meliputi air, bahan bakar fosil, biomas, alga/bakteri, dll. Pada Tabel 1 disajikan beberapa proses pembuatan hidrogen, baik yang sudah komersial maupun yang masih tahap pengembangan tetapi memiliki potensi menjanjikan di masa depan.

Table 1. Beberapa proses produksi hidrogen [3]

Bahan baku/proses	Efisiensi	Status
- Steam reforming gas alam	78,5%	Komersil
- Gasifikasi batubara	68,2%	Komersil
- Oksidasi parsial minyak residu	76,8%	-
- Elektrolisis (air/listrik)	27%	Komersil
- Termokimia (air)	~50%	Litbang

Proses steam reforming gas alam merupakan proses yang paling maju dan paling banyak dipakai. Sampai saat ini diperkirakan sekitar 80% produksi hidrogen dunia, dipasok dengan produksi cara ini. Sedang proses gasifikasi batubara banyak dimanfaatkan di negara-negara yang miskin sumber bahan bakar minyak/gas, tapi sangat melimpah dengan batubara. Sebagai bahan bakar yang paling mencemari lingkungan pada pembakaran langsung, proses pemanfaatan batubara dengan mengkonversikannya menjadi hidrogen merupakan pilihan paling bijak untuk mendayagunakan batubara, mengingat dibanding bahan bakar fosil yang lain, batubara merupakan sumber yang paling melimpah.

Isu lingkungan global dan semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil (karena bukan sumber terbarukan), mendorong para peneliti melakukan terobosan untuk

memproduksi hidrogen dengan bahan baku air. Elektrolisis merupakan satu-satunya proses produksi hidrogen komersial dan biasanya beroperasi pada skala kecil. Mahalnya listrik mengakibatkan produksi skala besar akan kurang ekonomis kecuali tersedia listrik dengan harga sangat murah. Untuk mengatasi mahalanya listrik dikembangkan suatu proses baru berbasis teknologi elektrolisis yaitu elektrolisis termal. Proses ini pada prinsipnya mengganti sebagian energi listrik yang menjadi pemicu reaksi elektrolisis dengan energi panas. Penggantian sebagian energi listrik dengan energi panas berimplikasi pada lebih tingginya suhu operasi proses elektrolisis dibanding proses elektrolisis konvensional. Karena harga energi panas jauh lebih murah dari pada listrik, hidrogen yang dihasilkan diharapkan jauh lebih murah, dan tingkat efisiensi termalnya pun bisa lebih tinggi. Di samping proses elektrolisis, produksi hidrogen dari air dapat dilakukan dengan proses termokimia yang pada prinsipnya merupakan reaksi air dengan bantuan energi termal menjadi hidrogen dan oksigen. Berbagai jenis proses termokimia telah dikembangkan di seluruh dunia. Proses siklus sulfur-iodine (proses SI) mula-mula dikembangkan oleh General Atomic di USA, dan kemudian juga oleh JAERI di Jepang. Serta proses berbasis siklus Br-Ca-Fe atau yang lebih dikenal dengan siklus UT-3 yang dikembangkan oleh Universitas Tokyo, kedua proses tersebut diperkirakan merupakan 2 kandidat penting proses termokimia yang paling menjanjikan [4].

## **II.2 Reaktor Nuklir untuk Produksi Hidrogen**

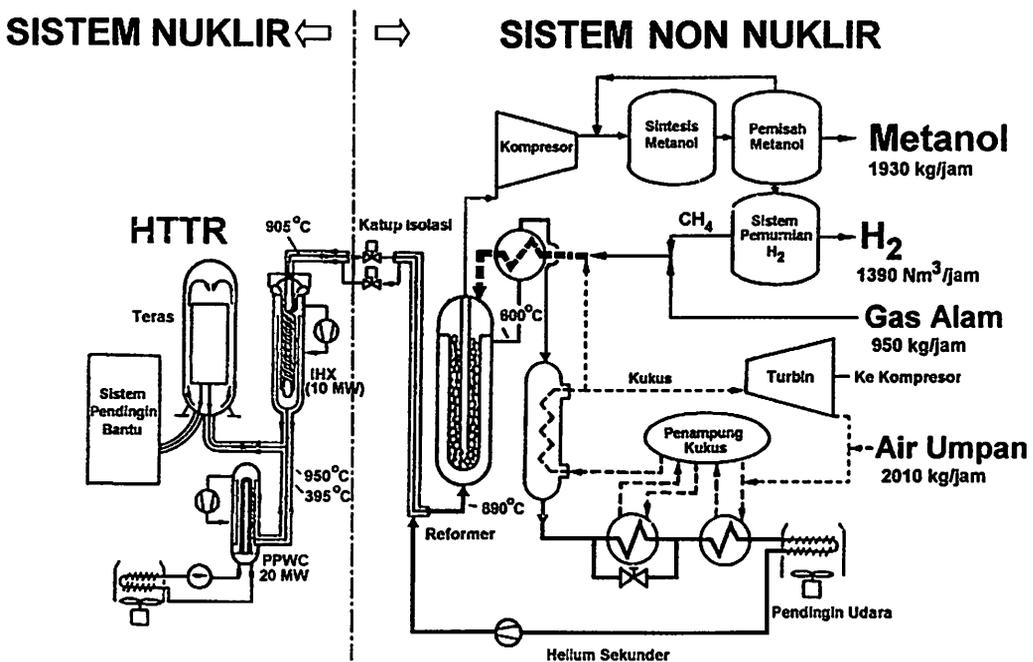
Pengalaman pada operasi reaktor nuklir menunjukkan bahwa pembangkitan energi nuklir dalam unit dan skala kecil tidak terlalu ekonomis dibanding skala besar per unit reaktornya. Ini salah satu alasan mengapa per unit reaktor nuklir selalu berkapasitas termal jauh lebih besar dibanding unit pembangkit jenis lain. Jika nuklir dimaksudkan untuk produksi hidrogen, maka skala permintaan hidrogen juga harus cukup besar, agar unit pabrik hidrogen yang akan digerakkan oleh energi nuklir sesuai dengan output kapasitasnya. Untuk menjawab tantangan itu, saat ini kapasitas pabrik hidrogen yang disebut sebagai kelas terbaru dan masih dalam tahap konstruksi di Amerika, dibangun dengan kapasitas 200 juta ft<sup>3</sup> / hari, yang setara dengan PLTN 1600 MWth [5].

Untuk memenuhi kebutuhan energi panas sebagai penggerak proses produksi hidrogen yang kebanyakan merupakan proses kimia endotermik dan bersuhu tinggi, dibutuhkan reaktor nuklir yang mampu beroperasi pada suhu tinggi. Proses kimia endotermik bersuhu tinggi mengimplikasikan bahwa proses tersebut beroperasi pada suhu tinggi dan membutuhkan energi panas dalam jumlah besar sebagai penggerak terjadinya reaksi. Reaktor suhu tinggi berpendingin helium dengan sistem keselamatan pasif melekat yang telah dikembangkan di berbagai negara maju sejak lebih dari 50 tahun terakhir diperkirakan merupakan jenis reaktor yang cocok untuk aplikasi produksi hidrogen. Reaktor ini berpendingin gas helium, yang suhu luaran pendinginnya bisa

mencapai 900°C. Suatu kisaran suhu yang cocok untuk berbagai proses produksi hidrogen.

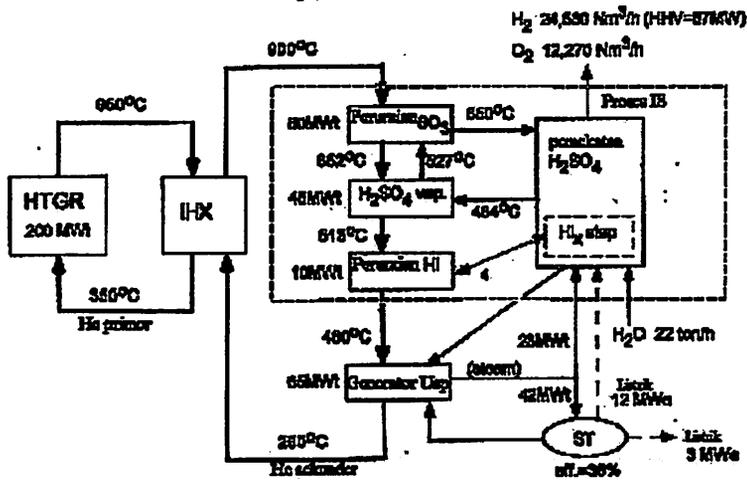
### III. SISTEM KOPEL NUKLIR HIDROGEN

Studi berbagai sistem koppel antara reaktor nuklir dengan sistem produksi hidrogen telah lama dipelajari di negara-negara maju. Jepang, sebagai salah satu negara yang cukup ambisius dalam bidang ini telah melakukan berbagai studi sangat intensif. Pada Gambar 1 disajikan koppel HTGR dengan *steam reforming* gas alam untuk memproduksi hidrogen yang diujicoba oleh JAERI Jepang.



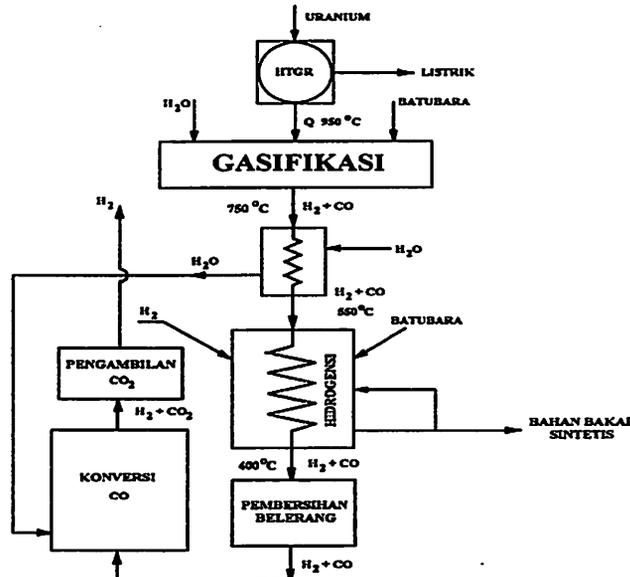
Gambar 1. Sistem produksi hidrogen proses steam reforming gas alam dengan panas nuklir [6,7]

Di samping itu Jepang juga mengembangkan proses produksi hidrogen dari air dengan metoda termokimia proses iodine-sulfur (proses I-S) yang mula-mula dikembangkan oleh General Atomic di Amerika. Setelah berhasil menjalankan suatu proses I-S secara kontinu dengan skala laboratorium pada pertengahan 1990-an, maka pada akhir dasawarsa 1990-an, Jepang membangun suatu *demonstration plant* produksi hidrogen proses I-S, yang rencana ke depannya akan dikopel dengan sumber panas HTGR. Selanjutnya berbagai konsep desain koppel nuklir dengan proses termokimia juga terus dikembangkan. Pada Gambar 2 diperlihatkan konsep koppel HTGR dengan proses I-S yang dikembangkan oleh JAERI dan Toshiba.



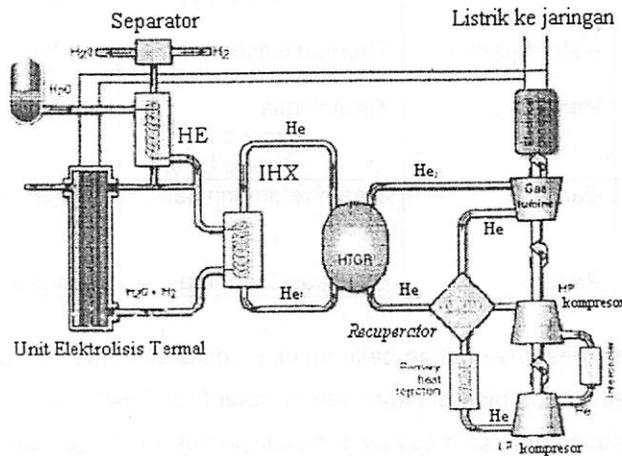
Gambar 2. Konsep sistem produksi hidrogen proses termokimia siklus I-S dengan panas nuklir [8]

Studi produksi hidrogen dari batubara juga telah dipelajari dengan sangat intensif di negara-negara maju seperti Amerika, Rusia, Jerman, dll. Meskipun batubara merupakan sumber energi bahan bakar fosil yang paling kotor pada pembakaran langsungnya, tapi karena masih sangat melimpah dibanding sumber energi bahan bakar fosil yang lain, maka akan lebih baik jika dikonversi menjadi bahan bakar yang lebih ramah lingkungan seperti methanol, bahan bakar sintetis, maupun hidrogen. Pada Gambar 3 ditunjukkan kopel nuklir dengan proses gasifikasi batubara untuk menghasilkan hidrogen dan bahan bakar sintetis.



Gambar 3. Sistem produksi hidrogen proses gasifikasi batubara dengan panas nuklir [9]

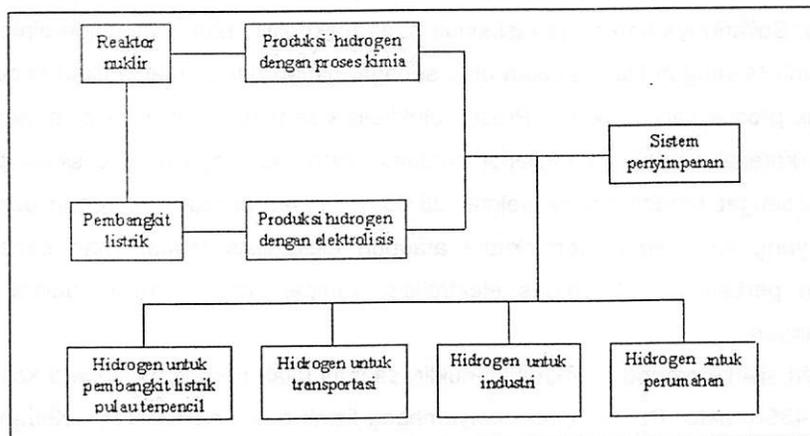
Proses elektrolisis termal yang beroperasi pada suhu tinggi dan merupakan perbaikan proses elektrolisis konvensional juga dikaji terus. Proses yang prinsipnya mengganti sebagian kebutuhan energi listriknya dengan energi panas, akan berimplikasi naiknya suhu operasi elektrolisis. Mengingat harga panas jauh lebih murah daripada harga listrik, diperkirakan proses ini juga akan mempunyai efisiensi termal yang jauh lebih baik. Pada Gambar 4 ditunjukkan skema kopel nuklir dengan unit elektrolisis termal.



Gambar 4. Sistem produksi hidrogen proses elektrolisis termal dengan panas dan listrik nuklir [9]

#### IV. DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Secara umum, sistem produksi hidrogen dengan energi nuklir berikut sistem yang terkait dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Skema Sistem Energi berbasis Nuklir-Hidrogen [11]

Sedang rangkuman metoda proses produksi hidrogen dengan energi nuklir dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Proses produksi hidrogen dengan energi nuklir [12]

Bahan Baku	Pasokan Energi Nuklir	Proses Produksi	Status Teknologi	Efisiensi Termal
Air	Listrik	Elektrolisis - alkali - solid polimer - solid oxyde	Komersial Demo Litbang	25-30%
	Listrik&panas	Thermal electrolysis	Litbang	~40%
	Panas	Termokimia - Proses IS - Proses UT-3	Litbang	~50%
Hidrokarbon	Panas	Steam reforming gas alam	Komersial	70-80%
	Panas	Gasifikasi batubara	Komesial	~70%

Pada garis besarnya bahan baku untuk produksi hidrogen dikelompokkan jadi 2, yaitu hidrogen dari air dan hidrogen dari bahan bakar fosil. Teknologi konvensional *steam reforming* gas alam sampai saat ini mendominasi produksi hidrogen sampai sekitar 85%, sedang hidrogen dari air dengan proses elektrolisis baru menyumbang sekitar 4% produksi hidrogen dunia. Meskipun proses produksi hidrogen berbahan baku hidrokarbon teknologinya telah mapan dan komersial, tetapi isu lingkungan global dan keterbatasan sumber daya alam: bahan bakar fosil (karena tak terbarukan) mendorong dilakukannya terobosan produksi hidrogen dari air. Dari sisi lingkungan, produksi hidrogen dari air jauh lebih bersih, sedang dari sisi ketersediaan bahan baku, air sangat melimpah. Satu-satunya teknologi produksi hidrogen dari air yang sudah mapan dan komersial adalah elektrolisis. Sayangnya karena reaksi kimia pada elektrolisis hanya mungkin dipicu oleh energi listrik (sehingga listrik seolah-olah sebagai bahan baku), menjadikan kebutuhan listrik untuk proses sangat besar. Proses elektrolisis sendiri efisiensinya bisa mencapai 85%, tapi karena rendahnya efisiensi produksi listrik, sehingga total efisiensi proses elektrolisis sangat rendah hanya sekitar 25-30%. Proses produksi hidrogen berbahan baku air yang lain seperti termokimia ataupun elektrolisis termal yang sebetulnya merupakan perbaikan dari proses elektrolisis, sampai saat ini masih dalam tahap pengembangan.

Dari sisi kemampuan teknologi nuklir, saat ini telah beroperasi secara komersial sebanyak 435 reaktor PLTN, telah menyumbang listrik dunia sekitar 17%. Kebanyakan dari reaktor-reaktor tersebut adalah reaktor termal berpendingin air dan berbahan bakar uranium alam atau uranium pengkayaan rendah. Faktor kapasitas reaktor-reaktor ini

cukup tinggi, dengan rekor sistem keselamatan yang baik dan secara ekonomi sangat kompetitif dibanding pembangkit listrik jenis lain. Luaran suhu pendingin reaktor-reaktor ini maksimum hanya mencapai suhu 400 °C sehingga terlalu rendah untuk proses termokimia, *steam reforming* gas alam, ataupun gasifikasi batubara. Jenis reaktor lain adalah reaktor berpendingin gas. Sebagai cikal bakalnya adalah reaktor *Magnox*, atau generasi penggantinya yaitu AGR (*Advanced Gas cooled Reactor*) yang cukup sukses beroperasi secara komersial terutama di negara-negara Eropa seperti Prancis dan Inggris. Tapi kebanyakan reaktor jenis ini sekarang dianggap tidak layak lagi karena alasan ekonomi. Generasi baru reaktor berpendingin gas dengan bahan bakar jenis *coated particle* telah dikembangkan di USA, Jerman, serta negara-negara maju yang lain. Meskipun komersialisasi belum tercapai, berbagai variasi desain telah dikembangkan dan beberapa reaktor eksperimen skala kecil telah beroperasi. Suhu luaran pendingin gas helium bisa mencapai 900°C, yang cocok untuk berbagai proses produksi hidrogen.

Jika penggunaan energi nuklir dalam waktu dekat adalah dengan reaktor suhu tinggi, nampaknya juga belum siap untuk mendukung proses produksi hidrogen suhu tinggi. Pada era energi hidrogen yang akan segera masuk sementara itu teknologi produksi reaktor suhu tinggi ataupun teknologi proses produksi seperti termokimia belum siap, maka alternatif aplikasi yang paling mungkin adalah elektrolisis. Di sini listrik PLTN dapat dimanfaatkan untuk elektrolisis pada keadaan *peak off*, sebab pada keadaan beban rendah seperti ini, harga listrik relatif sangat murah dibanding pada beban normal, apalagi pada beban puncak [13].

Pemanfaatan panas nuklir untuk produksi hidrogen merupakan alternatif pemanfaatan reaktor nuklir sebagai sumber energi proses yang sangat baik. Dari sisi penghematan cadangan bahan bakar fosil, penggantian sumber panas untuk industri yang selama ini menggunakan bahan bakar fosil dan kemudian diganti dengan panas nuklir, akan memberikan dampak pada penghematan bahan bakar fosil yang sangat signifikan. Dengan demikian keadaan ini akan berimplikasi pada pengurangan emisi CO<sub>2</sub> sebagai akibat pembakaran bahan bakar fosil. Sebagai contoh, studi di Jerman menunjukkan bahwa proses gasifikasi batubara yang diganti dengan sumber panas nuklir akan menghemat cadangan batubara sampai sepertiganya dibanding jika menggunakan batubara sebagai sumber energi panasnya. Dari sisi diversifikasi energi, pemanfaatan energi nuklir untuk proses produksi hidrogen akan meningkatkan peran nuklir di bidang energi, tidak saja sebagai produsen listrik, tapi juga produsen energi panas/listrik untuk proses produksi hidrogen.

## V. KESIMPULAN

1. Laju permintaan hidrogen sebagai bahan baku konversi minyak mentah berat menjadi gasoline dan *jetfuel* di dunia meningkat terus dengan tajam. Di masa yang akan datang hidrogen juga bisa menggantikan bahan bakar minyak sebagai bahan bakar transportasi.
2. Sebagai transisi ke arah produksi berbasis bahan baku air, teknologi berbasis bahan bakar fosil perlu terus dikembangkan mengingat ujicoba hidrogen sebagai bahan bakar transportasi di negara-negara maju memberikan hasil yang sangat positif
3. Pemanfaatan reaktor nuklir sebagai sumber energi produksi hidrogen akan sangat menguntungkan ditinjau dari segi penghematan pembakaran bahan bakar fosil, pengurangan emisi CO<sub>2</sub> ke lingkungan, dan diversifikasi reaktor nuklir di bidang energi.

## DAFTAR PUSTAKA

1. CHARLES W.F, Hydrogen, electricity, and nuclear power, Nuclear News, Sept. 2002.
2. US-DOE, "National Hydrogen Energy Roadmap", National Hydrogen Energy Roadmap Workshop, Washington DC, April 2-3, 2002
3. ATTILIO BISIO, and SHARON BOOTS, Encyclopedia of Energy Technology and the Environment, Volume 3, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
4. MASAO HORI, Nuclear Hydrogen Activities in Japan, Technical Workshop on Large Scale Production of Hydrogen from Nuclear Power, San Diego, USA, May 14-15, 2002.
5. CHARLES W.F, The Advanced High Temperature Reactor for Hydrogen Production, Technical Workshop on Large Scale Production of Hydrogen from Nuclear Power, San Diego, USA, May 14-15, 2002.
6. IAEA-TECDOC-1056, Nuclear Heat Application : design aspect and operating experiences, IAEA Publ., Vienna, 1998
7. IAEA, Nuclear Heat Application, Proc. Of a Technical Committee Meeting and Workshop, IAEA Publ., Vienna, 1984
8. ONUKI KAORU, Private Communication, 2001.
9. GREBENIK, V. N., et al., Prospects of HTGR Nuclear Heat Application in Russia, Proc. of the 2<sup>nd</sup> JAERI Symposium on HTGR Technologies, Japan , 1992.
10. STEVE HERRING, High Temperature Electrolysis Using Solid Oxide Fuel Cell Technology, Technical Workshop on Large Scale Production of Hydrogen from Nuclear Power, San Diego, USA, May 14-15, 2002.

11. CHARLES W.F., PAUL S.P., The Advanced High Temperature Reactor : Matching Nuclear Energy System to Thermochemical Hydrogen Production, American Institute of Chemical Engineers' Spring National Meeting, New York, March 12, 2002.
12. MASAO HORI, Important Issues for Nuclear Production of Hydrogen, Technical Workshoop on Large Scale Production of Hydrogen from Nuclear Power, San Diego, USA, May 14-15, 2002.
13. WALTER L, WADE S, LEWIS D, "Transition to a Nuclear/Hydrogen Energy System", World Nuclear Association Annual Symposium, London, Sept. 4-6, 2002.