

PERBANDINGAN PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ENERGI NUKLIR PROSES ELEKTROLISIS DAN STEAM REFORMING

DJATI H. SALIMY, IDA N. FINAHARI
Pusat Pengembangan Energi Nuklir - BATAN
Jl. Abdul Rohim Kuningan Barat, Mampang Prapatan
Jakarta 12710 Telp./Faks. (021)5204243
Email: djatihs@batan.go.id

Abstrak

PERBANDINGAN PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ENERGI NUKLIR PROSES ELEKTROLISIS DAN STEAM REFORMING. Makalah membahas perbandingan produksi hidrogen dengan energi nuklir untuk 2 buah teknologi proses produksi hidrogen yaitu proses elektrolisis dan steam reforming. Perbandingan ditinjau dari sisi kerugian dan keuntungan, efisiensi termal, dan perkiraan awal biaya produksi, serta status teknologi. Kedua proses merupakan teknologi yang sudah proven, dan telah dipakai secara luas dengan sumber energi non nuklir. Pada aplikasi energi nuklir sebagai sumber energi, steam reforming harus dibangun di dekat lokasi PLTN karena energi nuklir yang dimanfaatkan dalam bentuk panas. Ini berimplikasi diperlukannya sejumlah perhatian khusus terkait dengan masalah keselamatan nuklir. Efisiensi termal proses steam reforming (~85%) sekitar 3 kali lebih bagus daripada proses elektrolisis (25-40%). Perkiraan awal biaya produksi juga menunjukkan bahwa steam reforming jauh lebih murah. Meskipun begitu dari sisi bahan baku, elektrolisis lebih menguntungkan karena ketersediaan bahan baku yang tak terbatas dan terbarukan. Untuk aplikasi energi nuklir, proses steam reforming segera memasuki tahap operasi demonstration plant dengan memanfaatkan reaktor riset HTTR. Sedang untuk operasi komersial, masih menunggu komersialisasi HTGR. Efisiensi termal proses elektrolisis bisa dioptimalkan dengan memanfaatkan listrik PLTN suhu tinggi yang efisiensi konversi ke listriknya lebih besar. Di samping itu, operasi elektrolisis dengan memanfaatkan beban peak off listrik, akan menguntungkan secara ekonomi.

Kata kunci: steam reforming, electrolisis, efisiensi termal, HTGR

Abstract

COMPARISON OF NUCLEAR HYDROGEN PRODUCTION BETWEEN ELECTROLYSIS AND STEAM REFORMING PROCESS. Paper describes comparison of nuclear hydrogen production for two proven technology processes: electrolysis and steam reforming processes. The comparison is analyzed from the point of advantages and disadvantages, thermal efficiency, preliminary estimation of production cost, and technology statues. Both of two processes are proven technology and already used commercially with the non nuclear energy as the energy source. For nuclear energy utilization, steam reforming should be build near the nuclear power plant, since the form of nuclear energy utilized is process heat. Some special attentions associated with nuclear safety are needed. Thermal efficiency of steam reforming (~85%) is about three time of electrolysis (25-40%). Preliminary estimation of production cost also showed that steam reforming is far cheaper than production cost of electrolysis, even when implemented with a nuclear reactor. However, from the point of raw material, electrolysis more advantage since the unlimited and renewable raw material. For nuclear application, test production of nuclear steam reforming will soon be fully operated by utilization of HTTR. Meanwhile, for commercial operation this process still wait the commercialization of HTGR. Thermal efficiency of electrolysis can be optimized by utilization of high temperature nuclear power plant which have the high efficiency of electricity conversion. Beside that, costs may be reduced by using offpeak electricity for the electrolysis production.

Keywords: steam reforming, electrolysis, thermal efficiency, HTGR

PENDAHULUAN

Melonjaknya harga minyak bumi dunia (yang mencapai 145 USD per barel), diikuti dengan meningkatnya harga bahan bakar fosil lain. Di sisi lain, isu lingkungan global yang menuntut tingkat kualitas lingkungan yang lebih baik, mendorong berbagai pakar energi untuk mengembangkan energi yang lebih ramah lingkungan dan mendukung keamanan pasokan berkesinambungan. Para pakar energi di negara-negara maju seperti Amerika, Jepang dan Eropa sepakat bahwa hidrogen sangat dimungkinkan menjadi alternatif bahan bakar masa depan. Litbang hidrogen terus dikembangkan dengan sangat intensif untuk menyongsong era energi berbasis hidrogen yang diramalkan akan tercapai pada dasawarsa 2050.

Litbang energi di negara-negara maju sepakat bahwa energi masa depan harus mempunyai karakteristik sebagai berikut^[1]:

1. Teknologi energi masa depan harus bersifat dapat dikembangkan, karena kebutuhan energi akan terus meningkat
2. Sumber energi masa depan harus ramah lingkungan
3. Sistem distribusi yang efektif harus mampu diciptakan, sehingga energi benar-benar dapat terjangkau secara luas dan memperbaiki taraf hidup manusia
4. Harus aman baik dari sisi produksi, transportasi, penyimpanan, maupun penggunaannya
5. Teknologi energi harus ekonomis.
6. Sebagai *energy carrier*, hidrogen cukup menjanjikan dan memenuhi karakteristik energi masa depan.
7. Konsumsi hidrogen dunia terus meningkat pesat, misalnya untuk industri pupuk dan kilang minyak, saat ini permintaannya mencapai 50 juta ton per tahun, dengan laju sekitar 4-10% per tahun dan diperkirakan akan meningkat terus dengan laju yang lebih cepat. Pada kilang minyak, hidrogen dimanfaatkan untuk menghasilkan bahan bakar transportasi dengan kadar hidrogen sekitar 15% sehingga diperoleh bahan bakar transportasi (*gasoline, jetfuel*) yang ramah lingkungan. Hidrogen juga merupakan kandidat bahan bakar transportasi yang paling menjanjikan di masa yang akan datang. Berbagai ujicoba kendaraan *fuel cell*

(yang bersumber dari hidrogen) 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].

Dari sisi produksi, selama ini produksi hidrogen lebih mengandalkan proses berbahan baku gas alam atau bahan bakar fosil lain. Diperkirakan lebih dari 85% kebutuhan hidrogen dunia diproduksi melalui proses *steam reforming* gas alam. Isu lingkungan global dan semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil mendorong berbagai litbang produksi hidrogen dengan bahan baku air. Produksi hidrogen berbahan baku air menguntungkan dari segi lingkungan dan ketersediaan bahan baku yang melimpah. Sampai saat ini, elektrolisis merupakan satu-satunya proses produksi hidrogen dari air yang sudah komersial. Prosesnya sendiri telah mantap dengan efisiensi termal yang tinggi (~85%), tapi karena proses ini hanya bisa berlangsung dengan energi penggerak reaksi dalam bentuk listrik, dan efisiensi konversi listrik relatif rendah (<35%) sehingga total efisiensi termalnya menjadi sangat rendah hanya sekitar 25-30%.

Konsep aplikasi energi nuklir sebagai sumber energi (panas dan listrik) bagi industri telah dikaji lebih dari 50 tahun. Reaktor suhu tinggi berpendingin gas (HTGR) yang beroperasi pada suhu tinggi (~1000C) diperkirakan merupakan jenis reaktor yang sangat potensial menyumbangkan produksi energinya untuk kebutuhan industri. Jika sampai saat ini dari reaktor nuklir komersial hanya menghasilkan listrik, ada suatu prediksi bahwa nantinya reaktor nuklir juga bisa menghasilkan hidrogen sebagai energi alternatif^[3].

Dalam makalah ini akan dibahas perbandingan produksi hidrogen dengan memanfaatkan panas nuklir, antara proses *steam reforming* dan proses elektrolisis. Tujuan studi adalah untuk memahami berbagai aspek terkait keuntungan dan kerugian kedua proses produksi hidrogen yang telah komersial.

PRODUKSI HIDROGEN DAN PERAN ENERGI NUKLIR

Produksi Hidrogen

Hidrogen merupakan unsur paling melimpah di alam semesta, dan nomor tiga terbanyak di permukaan bumi. Tetapi gas hidrogen murni hampir tidak ada di permukaan bumi, karena gas hidrogen bereaksi dengan unsur lain membentuk persenyawaan yang lebih stabil. Kelimpahan persenyawaan hidrogen dalam bentuk air dan bahan bakar fosil, relatif tak terbatas jumlahnya. Karena hidrogen murni hampir tidak ada, maka hidrogen tidak bisa disebut sebagai sumber energi, tetapi sebagai *energy carrier* seperti halnya dengan listrik. *Energy carrier* merupakan media yang praktis untuk menyimpan, mentransfer, maupun menggunakan energi. Sebagai *energy carrier*, hidrogen harus mudah disimpan, mudah digunakan, dan mudah dikonversi menjadi berbagai bentuk energi.

Hidrogen alam tidak ada di permukaan bumi, sehingga hidrogen harus dibuat. Pada prinsipnya, hidrogen bisa diperoleh dengan memecah senyawa yang paling banyak mengandung unsur hidrogen. Sampai saat ini, produksi hidrogen skala komersial yang paling maju adalah produksi hidrogen berbasis bahan bakar fosil dan air. Untuk produksi hidrogen dengan bahan baku bahan bakar fosil, *steam reforming* metana merupakan proses yang paling maju di dunia. Lebih dari 85% kebutuhan hidrogen dunia dipasok dengan sistem produksi *steam reforming* metana. Produksi hidrogen dengan bahan baku air yang sudah komersial adalah proses elektrolisis. Sayangnya, karena proses elektrolisis membutuhkan listrik dalam jumlah besar sebagai pemicu terjadinya reaksi, sehingga proses ini memberikan efisiensi termal total yang relatif rendah. Proses elektrolisis hanya bisa ekonomis jika tersedia listrik dalam jumlah besar dengan harga murah. Meskipun proses *steam reforming* sampai saat ini masih

mendominasi, tetapi dimungkinkan akan tergeser oleh proses berbahan baku air, karena beberapa alasan:

- a. Gas alam bukanlah bahan terbarukan sehingga ada batas keekonomian tertentu yang memungkinkan sebagai bahan baku, sementara air sebagai bahan baku relatif melimpah dan terbarukan
- b. Harga gas alam sebagai komoditi energi juga terus meningkat
- c. Tuntutan lingkungan, mengingat produksi berbasis bahan bakar fosil akan mengemisikan CO₂ dalam jumlah cukup besar.

Peran Energi Nuklir

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^[3]. Jika industri nuklir ingin menjadi sumber energi masa depan, industri nuklir harus mengantisipasi kemungkinan menjadikan hidrogen sebagai salah satu produk utama reaktor nuklir. Konsep aplikasi energi nuklir sebagai sumber energi bagi industri telah dikaji lebih dari 50 tahun.

Panas produk reaksi fisi nuklir yang dihasilkan reaktor daya, dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi panas untuk kebutuhan industri. Berbagai litbang telah dilakukan, dan beberapa diantaranya sudah mencapai tahap komersial terutama untuk aplikasi reaktor nuklir suhu rendah (kurang dari 300°C). Aplikasi suhu rendah yang sudah beroperasi diantaranya adalah proses desalinasi dan *district heating* di negara-negara dengan musim dingin panjang. Aplikasi reaktor nuklir suhu medium (500-600°C) juga terus dikembangkan di negara-negara maju seperti aplikasi panas reaktor pembiak cepat untuk pencairan batubara proses langsung di Rusia. Untuk aplikasi panas nuklir suhu tinggi, reaktor suhu tinggi berpendingin gas (HTGR) yang beroperasi pada suhu tinggi (~1000°C) diperkirakan merupakan jenis reaktor yang sangat potensial menyumbangkan produksi energinya untuk kebutuhan industri. Contoh aplikasi panas nuklir suhu tinggi antara lain: gasifikasi batubara, produksi hidrogen

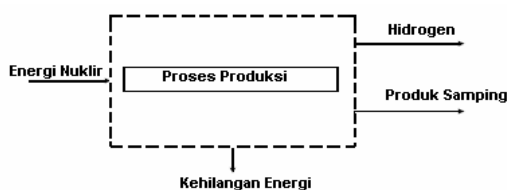
(*steam reforming*, proses termokimia, gasifikasi batubara)^[4].

Dari sisi ketersediaan sebagai sumber energi, bahan bakar nuklir diperkirakan akan mampu memasok energi untuk kebutuhan antara 50-100 tahun, jika diasumsikan daur bahan bakar nuklir sekali pakai (*once through*) yang dipakai. Jika dimanfaatkan model daur dengan olah ulang, atau sistem reaktor pembiak, energi nuklir bisa dipakai untuk masa yang relatif tak terbatas^[1]. Disamping itu, energi nuklir merupakan sumber energi yang tidak mengemisi CO₂ ke lingkungan.

Produksi Hidrogen dengan Energi Nuklir

Produksi hidrogen dengan memanfaatkan energi nuklir sebagai sumber energi akan menguntungkan dari sisi pengurangan penggunaan bahan bakar fosil, yang berimplikasi langsung pada pengurangan laju emisi CO₂ ke lingkungan. Sebagai gambaran, proses *steam reforming* gas alam dengan panas nuklir, akan menghemat pembakaran gas alam sebagai sumber energi panas. Kebutuhan gas alam pada proses sebatas sebagai bahan baku, sedang kebutuhan energi panas yang secara konvensional dilakukan dengan membakar gas alam, dapat dikurangi dalam jumlah yang cukup signifikan.

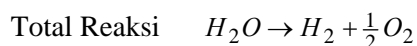
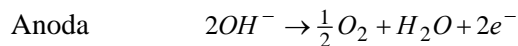
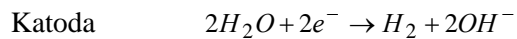
Dalam makalah ini akan dibandingkan 2 proses produksi hidrogen yang sudah komersial yaitu *steam reforming* dan elektrolisis, jika proses tersebut dijalankan dengan energi nuklir sebagai sumber energi. Pada setiap proses, input yang dibutuhkan adalah bahan baku dan energi nuklir, dengan output hidrogen dan produk samping, serta kehilangan energi. Skema proses untuk menentukan efisiensi proses dapat dilihat pada Gambar 1. Efisiensi termal proses produksi didefinisikan sebagai nilai kalor hidrogen yang dihasilkan dibagi dengan total energi yang dibutuhkan untuk memproduksi hidrogen^[1,5]. Energi yang dibutuhkan dalam proses dapat berupa panas, maupun kerja.



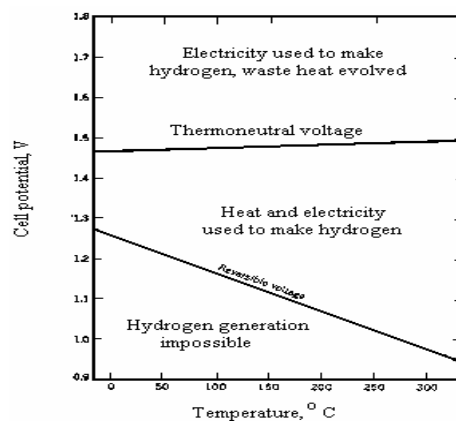
Gambar 1. Skema Proses Produksi^[1,5]

PROSES ELEKTROLISIS

Elektrolisis adalah suatu proses penguraian molekul air (H₂O) menjadi hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) dengan energi pemicu reaksi berupa energi listrik. Proses ini dapat berlangsung ketika 2 buah elektroda ditempatkan dalam air dan arus searah dilewatkan diantara 2 elektroda tersebut. Hidrogen terbentuk pada katoda, sementara oksigen pada anoda. Selama ini elektrolisis dikenal sebagai produksi hidrogen dari air yang paling efektif dengan tingkat kemurnian tinggi, tapi terbatas untuk skala kecil. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut^[6]:

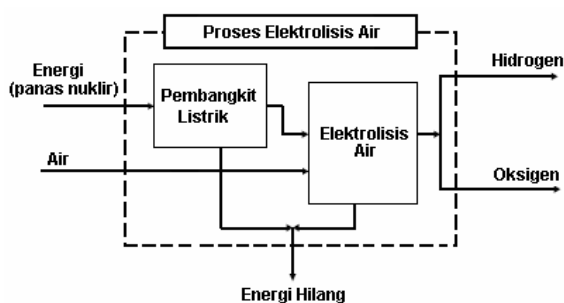


Besarnya energi bebas standar, entalpi, dan entropy masing-masing adalah $\Delta G = 1,23$ V, $\Delta H = 285,85$ kJ/mol, dan $\Delta S = 70,08$ J/kmol. Energi bebas sebesar 1,23 V merupakan tegangan bolak balik yang menyatakan tegangan minimal yang diperlukan untuk dapat berlangsungnya reaksi. Total energi (ΔH) yang diperlukan agar reaksi dapat berlangsung dapat dipasok dengan energi listrik, energi panas, atau gabungan keduanya. Menurut termodinamika, ΔH bisa diperoleh dengan rumus $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, dan karena ΔS positif maka kerja yang diperlukan dari energi listrik (ΔG) dapat diturunkan dengan mengoperasikan proses pada suhu yang lebih tinggi.



Gambar 2. Kondisi Operasi Proses Elektrolisis^[6]

Pada Gambar 2 ditunjukkan hubungan antara suhu operasi proses elektrolisis dengan potensial listrik, semakin tinggi suhu operasi elektrolisis akan semakin kecil energi listrik yang dibutuhkan. Keterbatasan teknologi suhu tinggi menyebabkan proses elektrolisis yang mula-mula dikembangkan beroperasi pada suhu tidak terlalu tinggi (kurang dari 100°C), sehingga proses elektrolisis yang sudah komersial saat ini adalah proses dengan suhu rendah. Efisiensi termal proses elektrolisis biasanya sekitar 75%, tapi karena efisiensi termal konversi panas ke listrik sangat rendah, sehingga total efisiensi proses ini menjadi sangat rendah hanya sekitar 25%. Maksimum efisiensi termal yang dimungkinkan adalah 45% jika digunakan sistem dengan efisiensi sel yang tinggi (90%) dan sumber listrik energi nuklir suhu tinggi yang memanfaatkan turbin gas sebagai perangkat konversi listrik. Dengan tingkat efisiensi termal produksi listrik 50%, maksimum efisiensi termal proses elektrolisis dengan energi nuklir adalah 45%. Skema proses elektrolisis dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Proses Elektrolisis^[1,5]

Keuntungan dan Kerugian

Kerugian utama pada proses elektrolisis adalah karena efisiensi termalnya yang rendah, karena sangat rendahnya konversi listrik yang menjadi pemicu terjadinya reaksi elektrolisis. Jika listrik bisa dihasilkan dengan reaktor nuklir suhu tinggi yang efisiensi termalnya lebih tinggi, efisiensi termal proses dapat ditingkatkan. Disamping itu, jika listrik dapat diperoleh dengan harga murah, proses elektrolisis juga akan cukup ekonomis. Skema kerjasama antara operator pembangkit listrik dan pabrik elektrolisis dapat menurunkan biaya produksi hidrogen dengan memanfaatkan listrik pada kondisi *peak off* untuk mengoperasikan pabrik hidrogen.

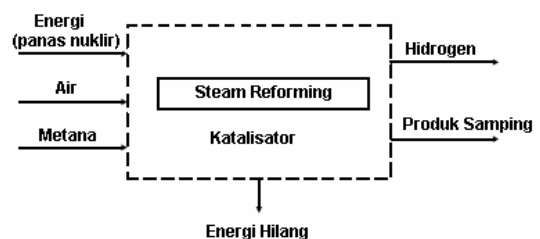
Energi nuklir yang dimanfaatkan oleh proses elektrolisis dalam bentuk listrik, sehingga lokasi pabrik tidak harus berdekatan dengan PLTN, dan hal ini tidak terlalu terkendala dengan permasalahan keselamatan nuklir. Selain itu, air sebagai bahan baku merupakan sumber terbarukan yang relatif melimpah, sehingga proses elektrolisis lebih ramah lingkungan.

Status Teknologi

Meskipun proses elektrolisis telah digunakan secara luas, tapi pemanfaatannya masih terbatas untuk kapasitas kecil, mengingat efisiensi termalnya yang sangat rendah. Meskipun begitu sejumlah litbang telah berhasil meningkatkan efisiensi termal proses elektrolisis. Sel elektrolisis yang bekerja pada suhu dan tekanan tinggi, mampu memisahkan hidrogen dan oksigen dengan tingkat efisiensi sampai 90%. Kombinasi sel elektrolisis efisiensi tinggi, dengan PLTN generasi maju yang efisiensinya juga tinggi, ditambah pemanfaatan listrik pada kondisi *peak off* akan memberi dampak keuntungan ekonomi yang cukup signifikan^[7].

STEAM REFORMING

Steam reforming merupakan proses termokimia yang umum dipakai pada industri yang memproduksi hidrogen. Proses *steam reforming* melibatkan reaksi metana (atau gas alam) dengan kukus pada suhu tinggi. Skema proses dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Proses *Steam Reforming*^[11]

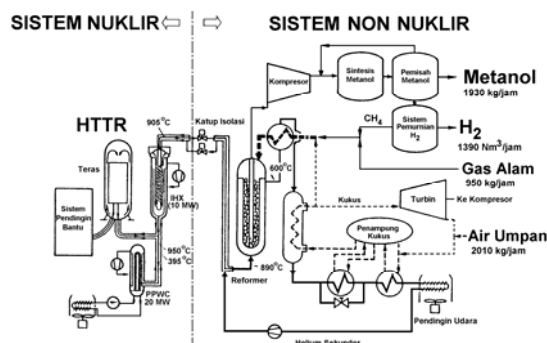
Ada 2 reaksi utama yang terjadi pada proses *steam reforming*. Yang pertama, reaksi *reforming* yang merupakan reaksi sangat endotermis yang terjadi pada suhu tinggi menggunakan katalisator. Reaksi kedua adalah *shift reaction*, merupakan reaksi eksotermis yang bertujuan untuk mengontrol kuantitas produk yang diinginkan. Kemudian dilanjutkan dengan proses penghilangan CO₂ dan

pemurnian hidrogen. Persamaan reaksi dan tahapan proses dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Persamaan Reaksi dan Tahap Proses *Steam Reforming*^[8,9]

Tahap	Persamaan Reaksi	Nama Reaksi	ΔH
1	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	Reforming	-206.20 kJ/mol
2	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	Shift Reaction	41.20 kJ/mol
3	Tahap pemisahan dan pemurnian produk		

Proses konvensional *steam reforming*, terjadi pada reaktor kimia yang disebut *reformer* pada suhu sekitar 800-900°C. Untuk mengoperasikan proses endotermis suhu tinggi, kebutuhan panas dipasok dengan membakar bahan bakar fosil sebagai sumber energi panas. Efisiensi termal proses *steam reforming* bisa mencapai 85%. Ide pemanfaatan panas nuklir adalah menggantikan bahan bakar fosil yang dibakar sebagai sumber panas dengan memanfaatkan panas nuklir suhu tinggi. Penggantian ini menguntungkan ditinjau dari sisi penghematan bahan bakar fosil, yang berimplikasi langsung pada pengurangan laju emisi gas rumah kaca.



Gambar 5. Kopel HTGR dengan *Steam Reforming*^[8,9]

Pada Gambar 5 ditampilkan diagram proses kopel reaktor nuklir suhu tinggi dengan proses *steam reforming* gas alam. Litbang di Jepang merupakan litbang paling maju di dunia. Litbangnya dianggap sudah selesai, dan memasuki tahap implementasi proses. Proses kopel nuklir hidrogen ini diharapkan dapat beroperasi pada awal dasawarsa 2010, dan menjadi proses pertama di dunia kopel nuklir suhu tinggi dengan proses kimia.

Keuntungan dan Kerugian

Kemurnian gas hidrogen hasil proses *steam reforming* perlu ditingkatkan. Kadar CO_2 dapat dihilangkan atau dikurangi dengan proses penyerapan alkalin menggunakan larutan amina atau larutan NaOH , kemudian dilakukan pendinginan untuk proses pemurnian. Proses pemurnian yang dilakukan pada proses *steam reforming*, memerlukan biaya tersendiri. Proses ini tidak dilakukan pada proses elektrolisis.

Meskipun proses *steam reforming* telah sangat maju, dan penguasaan teknologi PLTN juga sudah memadai, namun masalah kopel nuklir suhu tinggi dengan proses kimia memerlukan perlakuan khusus terkait dengan faktor keselamatan. Sebagai antarmuka antara proses nuklir dan kimia, biasanya digunakan penukar panas *intermediate* (IHX) yang memisahkan zona nuklir dengan zona non nuklir. Pada IHX, mengalir gas helium pendingin HTGR pada suhu sekitar 950°C. Panas helium primer ini dipindahkan ke helium sekunder yang relatif bebas kontaminasi radioaktif. Meskipun begitu, hidrogen dapat mendifusi melalui dinding logam, sehingga tercampur dengan gas helium. Sirkulasi hidrogen yang tercampur gas helium ke reaktor nuklir dapat menghasilkan tritium yang dapat mendifusi melalui dinding pipa pemanas helium dan mengkontaminasi produk. Hal lain adalah terkait penggunaan matriks grafit. Kontaminasi hidrogen pada grafit di reaktor nuklir dapat mengakibatkan korosi grafit^[8].

Status Teknologi

Litbang kopel nuklir dengan proses *steam reforming* dilakukan sangat intensif di Amerika, Jepang, China dan Afrika Selatan. Studi di Jepang yang dilakukan oleh JAEA telah dinyatakan selesai dan memasuki tahap implementasi proses^[9]. Pada awal dasawarsa 2010 diharapkan proses kopel nuklir dengan produksi hidrogen dapat dioperasikan. Meskipun begitu, karena belum ada satupun reaktor suhu tinggi yang beroperasi secara komersial, operasi komersial produksi nuklir hidrogen diperkirakan masih membutuhkan waktu yang cukup lama.

PEMBAHASAN

Pada Tabel 2 ditunjukkan rangkuman perbandingan antara proses elektrolisis dengan

proses *steam reforming*. Perbandingan mencakup keuntungan dan kerugian, efisiensi termal, dan perkiraan awal biaya produksi. Tabel 2 menunjukkan bahwa proses *steam reforming* merupakan proses yang paling murah, bahkan jika proses tersebut mengimplementasikan pemanfaatan energi nuklir sebagai sumber energi panas. Dari aspek keselamatan, proses elektrolisis lebih aman dari paparan radioaktif mengingat energi nuklir yang dibutuhkan adalah dalam bentuk listrik. Sedang pada proses *steam reforming*, karena energi yang dibutuhkan dalam bentuk panas nuklir yang dibawa oleh pendingin reaktor suhu tinggi, maka pabrik harus berlokasi di dekat reaktor nuklir. Perlu kajian serius terkait dengan kemungkinan aliran kontaminasi radioaktif dari zona nuklir ke zona proses, dan sebaliknya dari zona kimia ke zona nuklir.

Dari sisi implementasi proses, elektrolisis lebih siap karena yang dibutuhkan hanya listrik untuk menjalankan proses. Sementara untuk proses *steam reforming*, masih dibutuhkan sejumlah kajian mengingat reaktor suhu tinggi HTGR belum ada yang beroperasi secara

komersial. Meskipun begitu, pabrik skala *demonstration plant* akan segera dioperasikan pada awal dasawarsa 2010 di Jepang dengan memanfaatkan reaktor suhu tinggi skala riset.

Jika era energi hidrogen segera masuk, proses elektrolisis dan proses konvensional *steam reforming* (energi panas bahan bakar fosil) diperkirakan menjadi andalan proses yang paling siap. Peran energi nuklir masih sebatas sebagai penyedia listrik yang murah atau kompetitif untuk menjalankan proses elektrolisis. Kolaborasi pabrik hidrogen dengan operator pembangkit listrik, diharapkan dapat memanfaatkan *peak off* beban listrik, sehingga proses elektrolisis dapat diproduksi menggunakan listrik pada harga yang murah. Peran energi nuklir baru akan optimal jika reaktor HTGR telah beroperasi secara komersial sebagai penyedia energi panas untuk proses *steam reforming*. Disamping itu pemanfaatan reaktor nuklir maju HTGR yang efisiensi termalnya tinggi juga akan meningkatkan efisiensi termal proses elektrolisis

Tabel 2. Perbandingan Proses Elektrolisis dan *Steam Reforming*^[1, 9, 10]

No		Proses Elektrolisis	Proses <i>Steam Reforming</i>
1	Keuntungan	Metode paling sederhana, hanya membutuhkan air dan listrik Ramah lingkungan Teknologinya sudah proven Ideal untuk daerah terpencil Tak tergantung bahan bakar fosil Potensial untuk memanfaatkan listrik pada beban <i>peak off</i>	Metoda dengan efisiensi termal paling tinggi Teknologinya sudah proven Suhu operasi sesuai untuk aplikasi panas nuklir suhu tinggi Biaya produksi paling rendah
2	Kerugian	Membutuhkan listrik yang efisiensinya sangat rendah, mahal, dan tidak efisien Biaya produksi mahal	Ketergantungan pada bahan bakar fosil Mengemis CO ₂ Harus dibangun dekat dengan reaktor nuklir
3	Efisiensi Termal	25-45%	70-85%
4	Perkiraan awal biaya produksi	\$1,83/kg - \$2,73/kg hidrogen	\$0,80/kg hidrogen
5	Status Teknologi	Proven dan siap beroperasi Sejumlah pengembangan masih dimungkinkan untuk meningkatkan efisiensi	Operasi skala <i>demonstration plant</i> akan segera beroperasi pada awal 2010. Operasi komersial menunggu komersialisasi HTGR

KESIMPULAN

Dari analisis perbandingan proses elektrolisis dan *steam reforming* dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Efisiensi termal proses *steam reforming* jauh lebih tinggi daripada proses elektrolisis, sehingga perkiraan biaya produksi hidrogen juga jauh lebih murah. Meskipun begitu, komersialisasi proses *steam reforming* dengan panas nuklir masih menunggu komersialisasi reaktor HTGR.
2. Jika era energi hidrogen segera masuk yang ditandai dengan lonjakan permintaan hidrogen dalam jumlah besar, proses elektrolisis dan *steam reforming* konvensional yang akan memainkan peran utama sebagai proses produksi hidrogen.
3. Proses elektrolisis menguntungkan dari sisi ketersediaan bahan baku yang melimpah, dan dari sisi emisi gas CO₂ yang relatif kecil. Proses elektrolisis juga potensial untuk produksi skala kecil pada daerah terpencil, ketika pasokan hidrogen terkendala proses penyimpanan dan atau transportasi.
4. Aplikasi energi nuklir pada proses *steam reforming* menguntungkan dari sisi penghematan pembakaran bahan bakar fosil, yang berimplikasi pada pengurangan laju emisi CO₂.
5. Karena beroperasi pada suhu tinggi, HTGR menjanjikan efisiensi termal produksi listrik yang tinggi. Pemanfaatan listrik HTGR dengan proses elektrolisis akan meningkatkan efisiensi termal proses elektrolisis.

DAFTAR PUSTAKA

1. CROSBIE, L. M., 2003, CHAPIN, D., "Hydrogen Production by Nuclear Heat, GENES4/ ANP2003", Sep. 15-19, 2003 , Kyoto, JAPAN
2. US-DOE, 2002, "National Hydrogen Energy Roadmap", National Hydrogen Energy Roadmap Workshop, Washington DC.
3. CHARLES, W. F., 2002, "Hydrogen, electricity, and nuclear power", Nuclear News, Sept.
4. IAEA-TECDOC 1085, 1999, "Hydrogen as an Energy Carrier and Its Production by Nuclear Power", IAEA Publication, Vienna.
5. SATO, S., 1979, *Thermochemical Hydrogen Production, in Solar-hydrogen Energy system*, (ed.) T. Ohta, Pergamon Press, Oxford.
6. ATTILIO, B., and SHARON, B., 1995, *Encyclopedia of Energy Technology and the Environment*, Volume 3, John Wiley & Sons, Inc., New York.
7. WALTER, L., WADE, S., LEWIS, D., 2002, "Transition to a Nuclear/Hydrogen Energy System", World Nuclear Association Annual Symposium, London.
8. 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.
9. 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", GTHTTR300C for Hydrogen Cogeneration, OECD/NEA 3rd Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen, Oarai.
10. 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.