

KAJIAN PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ENERGI NUKLIR PROSES TERMOKIMIA SIKLUS IODINE-SULFUR DAN PROSES HIBRIDA SIKLUS BELERANG

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

ABSTRAK

KAJIAN PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ENERGI NUKLIR PROSES TERMOKIMIA SIKLUS IODINE-SULFUR DAN PROSES HIBRIDA SIKLUS BELERANG. Makalah ini membahas perbandingan produksi hidrogen dengan energi nuklir untuk 2 buah teknologi proses produksi hidrogen yaitu proses termokimia siklus iodin-sulfur dan proses hibrida siklus belerang (HyS). Tujuan dari studi ini adalah untuk memahami karakteristik produksi masing-masing proses. Hal yang menarik dari kedua proses adalah dua-duanya mengoperasikan reaksi dekomposisi asam sulfat. Jika proses termokimia siklus I-S mengandalkan proses dekomposisi HI untuk menghasilkan hidrogen, proses HyS mengandalkan proses elektrolisis campuran air dan SO₂ untuk menghasilkan hidrogen. Prediksi keekonomian menunjukkan bahwa biaya produksi hidrogen pada proses I-S sedikit lebih mahal dibandingkan dengan proses HyS, tetapi kedua proses mempunyai efisiensi termal yang relatif sama. Dibandingkan dengan proses konvensional elektrolisis, kedua proses mempunyai efisiensi termal yang jauh lebih tinggi. Meskipun saat ini biaya produksi hidrogen kedua proses masih relatif jauh lebih mahal dibandingkan dengan proses *steam reforming* gas alam, namun di masa depan jika terjadi kelangkaan gas alam (sehingga mahal), kedua proses akan kompetitif. Dari sisi bahan baku, kedua proses lebih menguntungkan dibandingkan dengan proses *steam reforming* gas alam, karena air sebagai bahan baku relatif jauh lebih melimpah.

Kata kunci: Proses termokimia, siklus iodin-sulfur, proses hibrida, siklus belerang, elektrolisis.

ABSTRACT

THE ASSESSMENT OF NUCLEAR HYDROGEN PRODUCTION BY THERMOCHEMICAL SULFUR- IODINE CYCLE AND HYBRIDE PROCESS OF SULFUR CYCLE (HyS). The paper describes nuclear hydrogen production for two water splitting technology processes: thermochemical of sulfur-iodine cycle and hybride sulfur cycle. The goal of the study is to understanding production characteristic of each process. The interesting of two processes are both of them is use the same process of sulfuric acid decomposition. If thermochemical process uses HI decomposition to produce hydrogen, HyS proces uses the process of water-SO₂ mixture electrolysis to produce hydrogen. Preliminary economic prediction showed that hydrogen production cost of thermochemical process is little bit low than for HyS process, but both of two processes have the relatively same value of thermal efficiency. Compared to the conventional process of electrolysis, both the processes have higher thermal efficiency. In spite of recently the production cost of two processes far higher than conventional production of natural gas steam reforming, in the future increasing cost of raw material natural gas will give the positive impact for the two process, especially from the point of production cost. Further, both of the process have raw material (water) that far abundant than natural gas.

Keywords: Thermochemical process, sulfur-iodine cycle, hybride process, sulfur cycle, electrolysis.

PENDAHULUAN

Laju kebutuhan hidrogen dunia terus meningkat pesat. Sebagai contoh untuk industri pupuk dan kilang minyak, saat ini permintaannya mencapai 50 juta ton per tahun, dengan

pertumbuhan sekitar 4-10% per tahun dan diperkirakan akan meningkat terus dengan laju yang lebih cepat. Semakin sempitnya lahan pertanian, akan mendorong intensifikasi pertanian yang berimplikasi meningkatnya permintaan pupuk, yang berarti akan menambah laju permintaan hidrogen.

Semakin langkanya minyak primer dan sekunder mendorong eksplorasi minyak berat (*shell, bitumen*) yang pada pengolahannya membutuhkan hidrogen jauh lebih banyak^[1].

Hidrogen juga merupakan kandidat bahan bakar transportasi yang paling menjanjikan di masa yang akan datang. Jika berbagai uji coba kendaraan *fuel cell* berbasis hidrogen berhasil, diperkirakan 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].

Saat ini diperkirakan lebih dari 85% kebutuhan hidrogen dunia diproduksi melalui proses *steam reforming* gas alam, dan sisanya diproduksi dengan bahan baku bahan bakar fosil lain, dan air^[1]. Isu lingkungan global dan 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%), tetapi karena proses ini hanya dapat berlangsung dengan energi penggerak dalam bentuk listrik, dan efisiensi konversi listrik relatif rendah (<35%) maka total efisiensi termalnya menjadi sangat rendah hanya sekitar 25-30%.

Evolusi litbang produksi hidrogen dari air dilakukan dengan tujuan meningkatkan efisiensi termal proses elektrolisis dari hanya sekitar 25-30% menjadi sekitar 45-50%, atau menemukan proses lain yang mempunyai efisiensi termal lebih tinggi dari proses elektrolisis^[3]. Efisiensi yang tinggi ini dapat dicapai melalui proses elektrolisis termal, proses hibrida, atau proses termokimia. Dari sisi ekonomi, biaya produksi hidrogen juga harus kompetitif mampu bersaing dengan biaya produksi hidrogen proses *steam reforming* gas alam.

Proses termokimia adalah proses penguraian air dengan energi panas sebagai sumber penggerak terjadinya reaksi. Secara teoritis, reaksi tunggal penguraian air menjadi hidrogen dan oksigen hanya mungkin dilakukan pada temperatur di atas 3000°C, mengingat energi bebas penguraian yang sangat besar^[4]. Untuk menjalankan reaksi penguraian air pada temperatur di bawah 1000°C, dilakukan pemecahan reaksi tunggal menjadi reaksi multi step. Inti dari reaksi multi step adalah menurunkan harga energi bebas, karena dengan harga energi bebas yang kecil (atau negatif) reaksi baru mungkin dapat dijalankan. Salah satu proses termokimia produksi hidrogen dari air adalah siklus iodine-sulfur yang mula-mula dikembangkan oleh *General Atomic* di Amerika pada tahun 1970-an, kemudian diadopsi

oleh Jepang pada awal tahun 1990-an, dan Korea Selatan pada tahun 2000-an^[4]. Siklus iodine-sulfur merupakan reaksi tiga langkah untuk menguraikan molekul air menjadi hidrogen dan oksigen pada temperatur di bawah 1000 °C.

Di samping proses termokimia, juga dikembangkan berbagai proses hibrida untuk memecah molekul air menjadi hidrogen dan oksigen. Proses hibrida merupakan proses gabungan antara proses termokimia dan proses elektrolisis. Salah satu proses hibrida yang litbangnya paling maju adalah proses hibrida siklus belerang (proses HyS). Proses hibrida siklus belerang pertama kali dikembangkan oleh Brecher dan Wu pada perusahaan *Westinghouse Electric Corp.*, di Amerika^[5]. Proses yang dikembangkan sangat intensif pada dasawarsa 1970-an ini, juga disebut sebagai proses Westinghouse. Istilah hibrida dalam proses ini mempunyai pengertian bahwa proses ini melibatkan 2 proses utama, yaitu proses termokimia dekomposisi asam sulfat yang memerlukan energi panas temperatur tinggi, serta proses elektrolisis yang memerlukan energi listrik. Proses dekomposisi termal memecah asam sulfat menjadi campuran belerang dioksida (SO₂), air (H₂O), dan oksigen (O₂), sedang proses elektrolisis dilakukan terhadap campuran air (H₂O) dan belerang dioksida (SO₂) menjadi hidrogen (H₂) dan asam sulfat (H₂SO₄). Hidrogen dipungut sebagai produk utama, sedangkan asam sulfat didaur ulang sebagai umpan proses dekomposisi termal.

Konsep aplikasi energi nuklir sebagai sumber energi (panas dan listrik) bagi industri telah dikaji lebih dari 50 tahun. Reaktor temperatur tinggi berpendingin gas (HTGR) yang beroperasi pada temperatur tinggi (~1000°C) diperkirakan merupakan jenis reaktor yang sangat potensial menyumbangkan produk energi panasnya 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^[6]. Versi terbaru dari reaktor HTGR adalah reaktor VHTR (*very high temperature reactor*) yang dikembangkan sebagai salah satu reaktor Generasi 4, yang di samping untuk menghasilkan listrik juga dapat dioperasikan secara kogenerasi sebagai sumber energi panas pada proses industri kimia, yang beroperasi pada temperatur tinggi. Dengan memanfaatkan reaktor nuklir sebagai sumber energi panas, diharapkan dapat dihemat pembakaran bahan bakar fosil yang akan berimplikasi pada pengurangan laju pengurasan cadangan bahan bakar fosil, sekaligus berpotensi menurunkan emisi gas rumah kaca ke lingkungan.

Dalam makalah ini dibahas perbandingan produksi hidrogen dengan memanfaatkan panas nuklir, antara proses termokimia siklus iodine-sulfur dan proses hibrida siklus sulfur. Kedua proses

mempunyai kesamaan pada reaksi dekomposisi asam sulfat pada temperatur tinggi yang memanfaatkan reaktor nuklir temperatur tinggi sebagai sumber energi panas. Tujuan studi adalah untuk memahami berbagai aspek terkait karakteristik proses produksi hidrogen dibandingkan dengan proses konvensional *steam reforming* gas alam dan proses elektrolisis.

Proses Termokimia Siklus Iodin-Sulfur Dan Proses Hibrida Siklus Belerang

Secara termokimia, dekomposisi langsung molekul air menjadi hidrogen dan oksigen hanya dimungkinkan terjadi pada temperatur sangat tinggi (>3000 °C), karena harga energi bebas yang sangat tinggi pada reaksi penguraian air^[4].

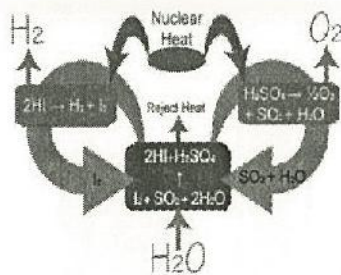
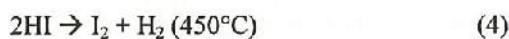
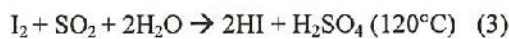
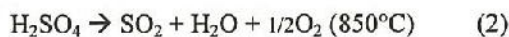


Sebagai contoh, pada temperatur 3000 °C hanya sekitar 10% molekul air yang terdekomposisi menjadi H₂ dan O₂, itupun dengan cepat akan terbentuk lagi menjadi molekul air.

Untuk itu dilakukan beberapa langkah reaksi dan atau menggabungkan reaksi kimia dan reaksi elektrolisis dengan tujuan menurunkan harga total energi bebas dari reaksi. Diantara beberapa proses dekomposisi air menjadi hidrogen dan oksigen yang banyak dipelajari guna memproduksi hidrogen antara lain proses termokimia siklus *iodine-sulfur* dan proses hibrida siklus belerang.

Proses termokimia siklus I-S

Proses termokimia siklus I-S melibatkan 3 reaksi, yaitu: reaksi dekomposisi termal asam sulfat, reaksi pembentukan asam sulfat dan asam iodida (reaksi bunsen), serta reaksi dekomposisi HI menjadi produk hidrogen. Skema proses dapat dilihat pada Gambar 1. Secara umum reaksinya adalah^[7]:

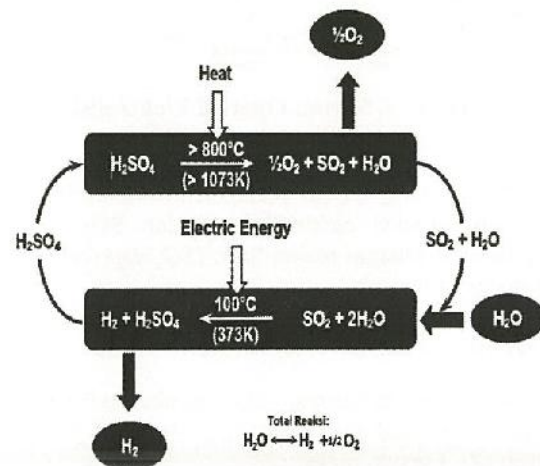
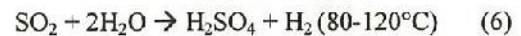
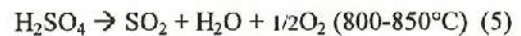


Gambar 1. Skema Proses Termokimia Siklus Iodine-Sulfur^[7]

Berdasarkan persamaan reaksi dan Gambar 1, bahan baku yang dibutuhkan dalam proses ini hanya air dan energi panas yang dapat bersumber dari panas nuklir. Secara teoritis, reaksi kedua (3) dan reaksi ketiga (4) merupakan reaksi eksotermal yang mengeluarkan panas. Sementara reaksi pertama merupakan reaksi endotermal yang membutuhkan panas dalam jumlah besar untuk dapat terjadinya reaksi. Dari persamaan reaksi nampak bahwa total entalpi sekitar -12,5 kJ/mol yang harus dibuang dari sistem mengindikasikan bahwa secara termokimia tidak dibutuhkannya panas dalam jumlah besar^[7]. Tapi pada kenyataannya kebutuhan panas sangat besar terutama untuk proses non kimia, yaitu proses pemisahan dan pemurnian bahan sebelum reaksi kimia dapat dilakukan.

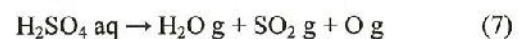
Proses hibrida siklus belerang

Reaksi pemecahan molekul air yang terjadi pada proses hibrida siklus belerang dapat dilihat pada persamaan 5-6 dan Gambar 2. Seperti halnya pada proses termokimia siklus I-S, proses ini hanya membutuhkan air sebagai bahan baku dan energi (panas dan listrik) untuk menggerakkan proses, dengan produk utama hidrogen dan produk samping oksigen^[8].



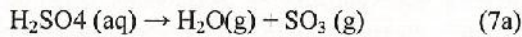
Gambar 2. Skema Reaksi Proses Hibrida Siklus Belerang^[8,9]

Baik proses termokimia siklus I-S maupun proses HyS melibatkan satu reaksi utama yang sangat endotermal dan beroperasi pada temperatur tinggi yaitu reaksi dekomposisi asam sulfat

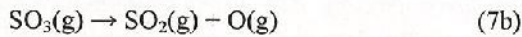


Ketika larutan H₂SO₄ dipanaskan, akan terjadi

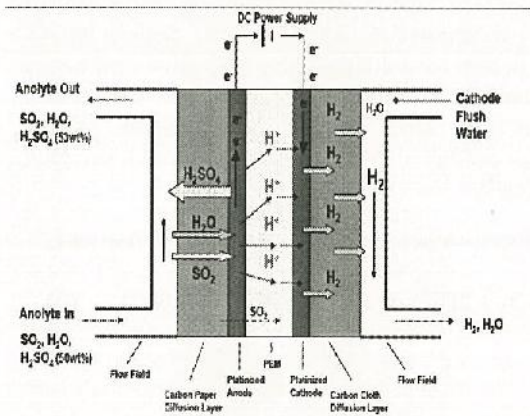
reaksi spontan membentuk gas belerang trioksida (SO₃) dan air (H₂O) mengikuti persamaan:



Pemanasan lebih lanjut pada temperatur sekitar 800°C dengan bantuan katalisator, akan terjadi dekomposisi termal belerang trioksida (SO₃) menjadi gas belerang dioksida (SO₂) dan oksigen (O) sesuai reaksi:

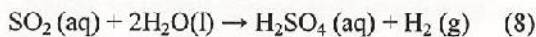


Berbeda dengan proses termokimia siklus I-S yang mengandalkan 2 reaksi pendukung untuk memproduksi hidrogen, pada proses HyS produksi hidrogen dilakukan dengan menjalankan proses elektrokimia dalam lingkungan SO₂. Proses ini merupakan modifikasi proses elektrolisis air konvensional. Skema proses elektrolisis pada proses HyS dapat dilihat pada Gambar 3.

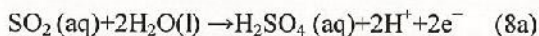


Gambar 3. Skema Operasi Elektrolisis Campuran H₂O dan SO₂^[8,9]

Reaksi yang terjadi pada elektroliser adalah merupakan reaksi elektrolisis air dan SO₂ atau sering disebut sebagai reaksi SDE (*SO₂ depolarized electrolysis of water*).



Secara elektrokimia, SO₂ teroksidasi pada bagian anoda membentuk H₂SO₄, proton (2H⁺), dan elektron (2e⁻) sesuai reaksi:



Proton 2H⁺ menerobos secara difusi melalui pemisah elektrolit menuju katoda dan bereaksi dengan elektron (2e⁻) membentuk hidrogen (H₂):



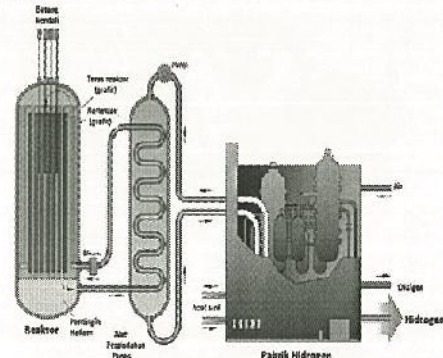
Produk elektrolisis adalah H₂SO₄ terbentuk pada anoda dan H₂ terbentuk pada katoda. Selanjutnya H₂SO₄ didaur-ulang sebagai umpan

pada reaksi dekomposisi asam sulfat untuk menyempurnakan siklus belerang.

Hal yang menarik dari proses reaksi SDE adalah rendahnya beda potensial teoritis pada reaksi^[8], yaitu hanya sekitar 0,158V pada temperatur standar (25°C). Beda potensial akan naik pada kisaran 0,243V untuk campuran larutan 50-wt% H₂SO₄-H₂O. Ini jauh lebih rendah dibandingkan beda potensial pada proses elektrolisis air. Rendahnya beda potensial ini mengindikasikan bahwa proses SDE mengkonsumsi listrik jauh lebih sedikit. Untuk mencapai beda potensial teoritis yang sangat rendah, litbang proses SDE saat ini dikonsentrasikan dengan memanfaatkan proses pada *proton exchange membrane* (PEM) yang sudah sukses dalam pengembangan aplikasi membran untuk *fuel cell*. Sejumlah ahli memprediksi beda potensial pada kisaran 0,45-0,75V dengan densitas arus 100-400 mA/cm², merupakan target yang realistis untuk operasi yang cukup menjanjikan^[7]. Harga beda potensial ini hanya separoh beda potensial operasi komersial elektrolisis air saat ini yaitu sekitar 1,7-2V.

Potensi reaktor nuklir sebagai sumber energi panas

Reaktor nuklir temperatur sangat tinggi (Gambar 3), atau sering disebut sebagai reaktor VHTR (*Very High Temperature Reactor*) merupakan reaktor nuklir Generasi 4 yang dikembangkan dari reaktor nuklir temperatur tinggi berpendingin gas (HTGR, *high temperature gas cooled reactor*). Reaktor yang memanfaatkan blok grafit sebagai moderator dan gas helium sebagai pendingin ini, beroperasi pada temperatur tinggi sampai sekitar 1000 °C. Luaran temperatur yang dibawa gas helium sebagai pendingin pada temperatur sekitar 1000 °C, dapat dimanfaatkan untuk berbagai proses produksi industri kimia. Produksi hidrogen dengan memanfaatkan reaktor Generasi 4 merupakan salah satu tujuan penting munculnya reaktor VHTR. Beberapa proses produksi hidrogen yang dapat memanfaatkan reaktor VHTR antara lain: *steam reforming* gas alam, proses termokimia siklus iodine-sulfur, proses hibrida siklus belerang, dan lain-lain.



Gambar 3. Skema Reaktor VHTR

Produksi Hidrogen^[10]

Versi awal dari VHTR, yaitu HTGR, didesain pertama kali di *The Clinton Laboratories* (sekarang dikenal sebagai *Oak Ridge National Laboratory*) pada tahun 1947 di Amerika Serikat. *Peach Bottom* merupakan reaktor HTGR pertama yang memproduksi listrik secara sukses di Amerika pada kurun waktu 1966 – 1974 pada skala *demonstration plant*. Reaktor HTGR desain Amerika ini merupakan HTGR dengan bahan bakar bentuk *prismatic block*. Saat ini reaktor HTGR jenis *prismatic block* beroperasi di Jepang dengan nama HTTR (*high temperature engineering testing reactor*) yang merupakan reaktor riset dengan daya 30 MWth. Uji coba kopling HTTR dengan proses *steam reforming* gas alam menghasilkan hidrogen dan metanol terus dilakukan sejak akhir tahun 2008. Di Jerman, reaktor HTGR dengan tipe yang sedikit berbeda, yaitu *pebble-bed*, telah dikembangkan sejak tahun 1950. *Demonstration plant* HTGR tipe *pebble bed* di Jerman adalah reaktor AVR dan THTR-300. Sedangkan reaktor skala riset masih dioperasikan di China dengan nama HTR-10 dengan kapasitas daya 10 MWth. Skala komersial pertama reaktor HTGR diharapkan segera terwujud di Cina, karena sejak Nopember 2009 Cina mulai membangun 2 reaktor HTGR dengan kapasitas daya masing-masing 100 dan 195MWe.

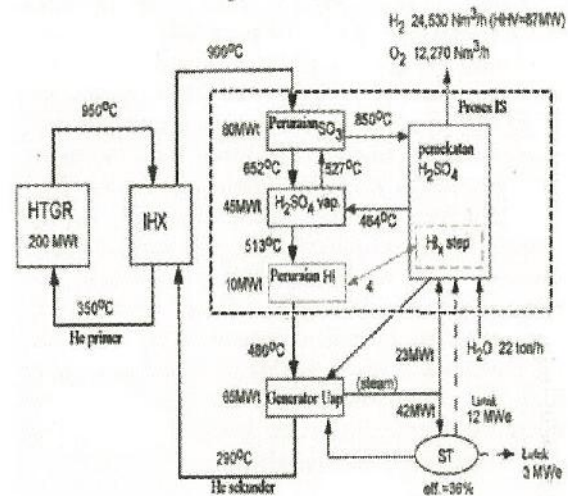
Kopel nuklir dengan proses

Pada Gambar 4 ditampilkan kopel reaktor nuklir temperatur tinggi dengan proses termokimia siklus iodine-sulfur yang dikembangkan di Jepang oleh JAEA bekerja sama dengan Toshiba. Sedangkan pada Gambar 5 ditunjukkan skema kopel reaktor nuklir temperatur tinggi dengan proses hibrida siklus belerang.

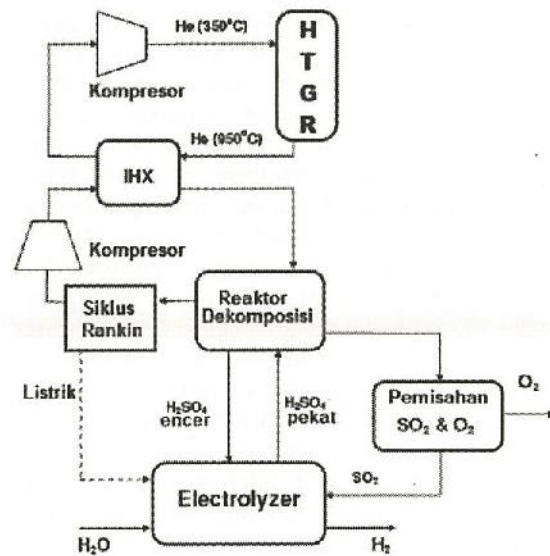
Pada Gambar 4 dan 5 terlihat, luaran panas yang dibawa pendingin primer gas helium memindahkan panasnya ke helium sekunder melalui *intermediate heat exchanger* (IHX). IHX berfungsi sebagai *barrier* yang memisahkan zona nuklir dengan zona kimia. Pemanfaatan helium sekunder, yang kurang menguntungkan karena temperaturnya lebih rendah daripada helium primer, dimaksudkan untuk melindungi zona kimia dari kemungkinan paparan radiasi. Panas yang dibawa oleh helium sekunder dimanfaatkan untuk menjalankan proses dekomposisi asam sulfat yang beroperasi pada temperatur tinggi. Pada proses HyS, luaran helium dari reaktor dekomposisi asam sulfat (~650°C) selanjutnya dimanfaatkan untuk membangkitkan uap yang diperlukan untuk operasi proses yang temperaturnya relatif rendah, dan untuk membangkitkan listrik. Pada proses HyS listrik yang dihasilkan digunakan untuk menjalankan proses elektrolisis, dan sisanya dikirim ke jaringan.

DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Jules Verne adalah seorang penulis novel fiksi ilmiah dari Amerika yang lebih dari seabad yang lalu meramalkan akan masuknya era energi hidrogen pada abad 21 dalam karyanya yang berjudul *Mysterious Island*^[12]. Ramalan penulis novel ini, kemudian diyakini oleh para ilmuwan abad 20. Para ahli hidrogen meyakini pertengahan abad 21 (2050-an) menjadi tonggak penting era energi hidrogen^[12]. Keberhasilan berbagai uji coba mobil hidrogen, menggeser prediksi tersebut. Saat ini para ahli mobil hidrogen yakin era energi hidrogen sudah akan masuk pada dasawarsa 2030^[13].



Gambar 4. Kopel HTGR dengan Proses Termo-Kimia Siklus Iodin-Sulfur^[11,12]



Gambar 5. Skema Aplikasi Reaktor Nuklir Temperatur Tinggi untuk Proses Hibrida Siklus Belerang^[19,13]

Ketika era energi hidrogen masuk, diperkirakan akan terjadi lonjakan permintaan hidrogen dalam skala yang luar biasa. Sebagai contoh di Amerika, konsumsi hidrogen saat ini sekitar 11 MMT/tahun digunakan sebagian besar untuk industri petrokimia dan pupuk. Jika era hidrogen sebagai bahan bakar transportasi masuk pada tahun 2030-an, lonjakan permintaannya akan sangat luar biasa. Diperkirakan untuk bahan bakar transportasi saja dibutuhkan hidrogen sekitar 200 MMT/tahun^[1]. Lonjakan kebutuhan hidrogen yang sangat luar biasa ini tidak diimbangi dengan kemampuan produksi dan ketersediaan bahan baku, karena sampai saat ini produksi komersial hidrogen masih mengandalkan pada proses *steam reforming* gas alam. Hanya sebagian kecil saja produksi hidrogen dilakukan dengan bahan baku air (proses elektrolisis), yang secara teknis memiliki efisiensi termal yang sangat rendah. Lonjakan permintaan hidrogen di masa depan jelas akan mempercepat laju pengurasan cadangan gas alam, yang otomatis berdampak peningkatan laju emisi gas rumah kaca ke lingkungan. Untuk mengantisipasi hal-hal tersebut, litbang produksi hidrogen dari air terus dilakukan sejak dasawarsa 1960-an. Tujuan dari litbang produksi hidrogen adalah menemukan proses produksi hidrogen dengan bahan baku air yang mempunyai efisiensi termal jauh lebih tinggi dibanding proses elektrolisis, dan secara ekonomi dengan biaya produksi yang kompetitif dibanding proses *steam reforming* gas alam.

Tinjauan Aspek Teknologi

Proses termokimia siklus I-S dan proses HyS keduanya mengoperasikan proses dekomposisi asam sulfat pada temperatur tinggi dan sangat endotermal yang berimplikasi dibutuhkannya energi panas dalam jumlah besar pada temperatur tinggi. Kebutuhan energi panas ini sangat dimungkinkan dipasok dari reaktor nuklir temperatur tinggi. Kesamaan proses mendorong kerjasama yang intensif antara institusi yang mengembangkan kedua proses. Didukung oleh *Nuclear Hydrogen Society* yang telah terbentuk di Jepang pada tahun 2001, di Amerika *General Atomic* yang mengembangkan litbang proses termokimia siklus I-S, bekerjasama dengan *Westinghouse* yang mengembangkan proses HyS. Kerjasama dilakukan dalam melakukan desain reaktor dekomposisi asam sulfat dengan sumber panas helium sekunder. Di Jepang kerjasama yang mirip juga dilakukan antara JAEA dan Toshiba.

Secara teori, entalpi total dari 3 reaksi yang terlibat pada proses termokimia siklus I-S, tidak begitu besar yaitu sekitar -12,5 kJ/mol. Ini menunjukkan bahwa energi panas yang dibutuhkan untuk menjalankan reaksi tidak terlalu besar. Kebutuhan energi panas yang besar diperlukan terutama untuk proses pemisahan dan pemurnian

bahan untuk mendorong agar reaksi yang diinginkan dapat tercapai dengan optimal.

Pada proses termokimia siklus I-S, hidrogen dihasilkan dari reaksi dekomposisi asam iodida (HI) menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) dengan konversi reaksi yang relatif rendah (<50%)^[14]. Tingkat konversi yang rendah ini diperburuk lagi dengan rendahnya kemurnian asam iodida. Asam iodida yang diperoleh dari reaksi bunsen, tercampur dengan iodine (I_2), dan air (H_2O) membentuk larutan azeotrope pada kadar kemurnian HI sebesar 55,9%^[13]. Proses pemisahan konvensional seperti destilasi tidak mungkin dapat meningkatkan kadar HI. Untuk mengatasi hal ini, JAEA di Jepang mengembangkan aplikasi membran untuk memperbaiki proses termokimia siklus I-S. Dalam proses, membran dimanfaatkan untuk 2 hal, pertama untuk meningkatkan kemurnian HI melalui pemisahan menggunakan membran *perm-selective*. Penelitian mengindikasikan proses *electro-electro dialysis* dan atau proses pervaporasi menggunakan membran *perm-selective* mampu meningkatkan kadar HI di atas titik azeotropenya^[15,16,17]. Di samping itu juga dikembangkan reaktor membran untuk reaksi dekomposisi HI menjadi produk H_2 dan I_2 .

Pada proses hibrida siklus belerang (proses HyS) produksi hidrogen dilakukan dengan mengandalkan proses elektrolisis campuran air dan SO_2 . Penelitian skala laboratorium menunjukkan proses ini dapat dijalankan dengan efisiensi yang jauh lebih tinggi daripada proses elektrolisis air. Kendala pengembangan proses adalah bagaimana menemukan membran yang sesuai, tahan untuk operasi jangka panjang, dan skala besar. Tuntutan keekonomian pabrik yang memanfaatkan energi nuklir adalah pabrik harus dalam skala besar, mengingat energi nuklir baru dapat kompetitif jika beroperasi pada skala besar.

Prediksi Keekonomian

Meskipun analisis ekonomi masih terlalu dini untuk dikembangkan, tetapi sejumlah institusi di negara maju telah melakukan sejumlah prediksi keekonomian antara proses termokimia siklus I-S dan proses HyS. Sebagai contoh, peneliti di *Savannah River National Laboratory* (SRNL), Amerika melakukan prediksi keekonomian produksi hidrogen dengan panas nuklir^[17]. Dengan skala produksi hidrogen pada kisaran 600 ton per hari, dibutuhkan 4 unit reaktor temperatur tinggi yang masing-masing berkapasitas 600 MWh. Hasil analisis menunjukkan bahwa kedua proses memiliki efisiensi termal yang tidak jauh berbeda (~50%) dan biaya produksi hidrogen untuk proses termokimia siklus I-S adalah sekitar \$1,65-1,98 per kg jika tidak memperhitungkan produk samping oksigen. Jika oksigen diperhitungkan, biaya produksi menjadi

lebih murah sekitar \$1,36-1,69 per kg. Sedangkan untuk proses HyS biaya produksi hidrogen adalah \$1,6 per kg jika tidak memperhitungkan produk samping oksigen, dan jika oksigen diperhitungkan, biaya produksinya menjadi lebih murah sekitar \$1,31 per kg. Harga kedua proses masih lebih mahal dibandingkan pada proses *steam reforming* gas alam (\$0,95 per kg) tapi jauh lebih murah dibandingkan proses elektrolisis konvensional (\$2,7 – 4,8 per kg)^[18,19].

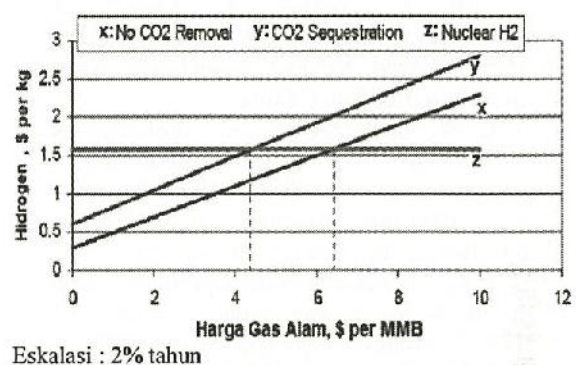
Parameter pengembangan proses produksi hidrogen dari air adalah proses harus mempunyai efisiensi termal yang lebih baik dibanding proses elektrolisis. Sedang dari sisi keekonomian, proses harus cukup kompetitif dibanding proses *steam reforming* gas alam. Jika proses elektrolisis mempunyai efisiensi termal hanya sekitar 25%, berbagai studi proses pemecahan air baik dengan proses termokimia siklus I-S maupun proses HyS mengindikasikan dimungkinkannya efisiensi termal yang jauh lebih tinggi mendekati ~50%^[18]. Meskipun prediksi keekonomian menunjukkan bahwa biaya produksi kedua proses masih jauh lebih mahal dibandingkan proses *steam reforming* gas alam, tetapi patut dicermati bahwa murahnya biaya produksi hidrogen pada proses *steam reforming* sangat dipengaruhi oleh murahnya harga bahan baku gas alam serta ada tidaknya proses penanganan emisi CO₂ (Tabel 1). Pada Gambar 6 ditunjukkan semakin tinggi harga gas alam, akan mengakibatkan biaya produksi hidrogen dengan proses *steam reforming* menjadi lebih mahal dibanding biaya produksi hidrogen dengan proses HyS maupun proses termokimia.

Tabel 1. Prediksi Keekonomian Proses I-S dan HyS^[18]

	I-S	HyS
Kapasitas Termal, MWth	2400	2400
Efisiensi Termal, %	52-42	48,8
Produksi Hidrogen, ton/hari	760-614	580
Produksi Listrik, MWe	0	216
Biaya Sistem Reaktor, \$M	1150	1198
Biaya Electrolyzer, \$ per m ²	0	2000
Total Biaya Produksi Hidrogen, \$M	819	516
Harga Jual Listrik @3 sen/kwh, \$M/th	0	51
Total Biaya Tahunan, \$M/th	413-399	306
Biaya Produksi Hidrogen, \$/kg	1,65-1,98	1,6
Biaya Produksi Hidrogen (dengan memperhitungkan produk samping O ₂), \$/kg	1,36-1,69	1,31

Meskipun sampai sejauh ini PLTN di Indonesia belum terwujud, tetapi dapat diperkirakan bahwa 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 memasak kebutuhan panas industri. Untuk itu, 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^[20].



Gambar 6. Perbandingan Biaya Produksi Hidrogen Proses *Steam Reforming* Gas Alam dengan Proses I-S dan HyS^[18]

KESIMPULAN

Dari kajian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dari sisi proses, masalah utama pada proses termokimia siklus I-S adalah rendahnya konversi dekomposisi HI menjadi H₂ dan I₂. Hal ini masih diperburuk dengan rendahnya kemurnian HI yang diperoleh dari reaksi Bunsen. Untuk mengatasi hal tersebut, litbang dikonsentrasikan pada pengembangan membran *perm-selective* untuk pemurnian bahan
2. Pada proses HyS, pengembangan membran yang mampu untuk operasi kontinyu dalam skala besar terus dikembangkan.
3. Kedua proses memberikan efisiensi termal (~50%) yang jauh lebih baik dibanding produksi hidrogen dengan proses elektrolisis air (~27%).
4. Kedua proses memberikan biaya produksi hidrogen sekitar \$1,3 per kg, jauh lebih baik dibanding proses elektrolisis (\$2,7 – 4,8 per kg). Meskipun begitu, masih lebih mahal dibanding proses *steam reforming* gas alam (\$0,95 per kg).
5. Meskipun biaya produksi masih lebih mahal

dibanding proses *steam reforming* gas alam, di masa depan kelangkaan gas alam dan atau kuatnya tekanan lingkungan akan mendorong daya saing kedua proses.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Kementerian Riset dan Teknologi melalui program insentif riset (RT-2011-0599) tahun 2011.

DAFTAR PUSTAKA

1. US-DOE, "National Hydrogen Energy Roadmap", National Hydrogen Energy Roadmap Workshop, Washington DC, (2002).
2. WALTER, L., WADE, S., LEWIS, D., "Transition to a Nuclear/Hydrogen Energy System", World Nuclear Association Annual Symposium, London, (2002).
3. 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).
4. SATO, S., "Thermochemical Hydrogen Production, in *Solar-hydrogen energy system*, (ed) OHTA, T., Oxford, Pergamon Press, (1979).
5. SUMMERS, W. A., STEIMKE, J. L., "Development of The Hybrid Sulfur Thermochemical Cycle", Report to the U. S. Department of Energy, United States Government, (2004).
6. 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, (2002).
7. MATHIAS, P. M., BROWN, L. C., "Thermodynamics of the Sulfur-Iodine Cycle for Thermochemical Hydrogen Production", The 68th Annual Meeting of the Society of Chemical Engineers, Japan, (2003).
8. SUMMERS, W. A., BUCKNER, M. R., "Hybrid Sulfur Thermochemical Process Development", 2005 DOE-NE Nuclear Hydrogen Initiative, (2005).
9. CONRADIE, F.H., "Utilizing the By-Product Oxygen of the Hybrid Sulfur Process for Synthesis Gas Production", Dissertation for the Degree Master of Science, North-West University, (2009).
10. _____, Very High Temperature Reactor, http://en.wikipedia.org/wiki/Very_high_temperature_reactor. Diunduh pada 12 April 2011.
11. ONUKI, K., Komunikasi Pribadi, (2001)
12. MIYAMOTO, Y., SHIOZAWA, S., OGAWA, M., INAGAKI, Y., NISHIHARA, T., SHIMIZU, S., "Research and Development Program on Hydrogen Production System with High Temperature Gas Cooled Reactor", Proc. of Int. Hydrogen Energy Forum 2000, Munich, Germany, September 2000, (2000).
13. GORENSEK, M.B., SUMMERS, W.A., BOLTHRUNIS, C.O., LAHODA, E. J., ALLEN, D.T., GREYVENSTEIN, R., "Hybrid Sulfur Process Reference Design and Cost Analysis", Final Report to the U. S. Department of Energy, United States Government, (2009).
14. ONUKI, K., NAKAJIMA, H., IOKA, I., FUTAKAWA, M., SHIMIZU, S., IS "Process for Thermochemical Hydrogen Production", *JAERI-Review 94-006*, (1994).
15. ONUKI, K., HWANG, G.J., ARIFAL, SHIMIZU, S., "Electro-electrodialysis of Hydriodic Acid in the Presence of Iodine at Elevated Temperature", *J. Membr. Sci.*, 192 (2001).
16. ARIFAL, HWANG, G.J., ONUKI, K., "Electro-electrodialysis of hydriodic acid using the cation exchange membrane cross-linked by accelerated electron radiation", *J. Membr. Sci.*, 210 (2002).
17. SALIMY, D. H., ONUKI, K., "Pervaporasi Larutan HI dan HIx dengan Membran Nafion-117 untuk mempelajari Kemungkinan Peningkatan Kadar HI", *Jurnal Ketenagalistrikan dan Energi Terbaru*, Vol. 6 No. 2 Desember 2007, (2007).
18. SUMMERS, W. A., "Process Design and Economics for the Hybrid Sulfur Process", Proceeding of AIChE 2007 Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, (2007).
19. CROSBIE, L. M., CHAPIN, D., "Hydrogen Production by Nuclear Heat", GENES4/ANP 2003, Sep. 15-19, 2003, Kyoto, JAPAN, (2003).
20. 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, (2006).