

ANALISIS KEEKONOMIAN BAHAN BAKAR PRODUK NABATI DAN HIDROGEN NUKLIR

Edwaren Liun

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

Masuk: 16 Februari 2011

Direvisi: 17 Maret 2011

Diterima: 25 Mei 2011

ABSTRAK

ANALISIS KEEKONOMIAN BAHAN BAKAR PRODUK NABATI DAN HIDROGEN NUKLIR. Kenaikan harga minyak selama enam tahun terakhir belum pernah terjadi sebelumnya yang harus dipandang sebagai pendorong untuk peningkatan efisiensi. Lonjakan harga minyak di pasar dunia dewasa ini didorong oleh faktor permintaan yang kuat di tengah menipisnya cadangan minyak dunia. Untuk menggantikan bahan bakar minyak yang berasal dari perut bumi berbagai alternatif harus di pertimbangkan, antara lain dengan tanaman produksi minyak nabati atau biofuel dan hidrogen yang diproduksi dengan reaktor nuklir temperature tinggi. Bahan bakar nabati berupa etanol terbuat dari jagung atau tebu dan biodiesel yang terbuat dari minyak sawit atau jatropha. Dengan harga minyak terbaru dunia, masa depan bahan bakar minyak nabati dan teknologi energi berbasis hidrogen nuklir menjadi diminati di berbagai belahan dunia. Keekonomian biodiesel akan berubah sesuai dengan harga minyak bumi dunia dan regulasi subsidi yang diterapkan terhadap produk BBM. Di sisi lain peran energi nuklir dalam produksi hidrogen yang paling potensial secara tekno-ekonomi adalah berupa elektrolisis uap temperatur tinggi, dengan menggunakan panas dan listrik dari reaktor nuklir. Biaya produksi bahan bakar biodiesel dari jenis ADO pada dasar subsidi adalah 10.49 US\$/MMBTU, sementara biaya produksi hidrogen sebagai energy carrier reaktor temperatur tinggi adalah 15.30 US\$/MMBTU. Dengan demikian kedua jenis ini tampak mempunyai daya saing yang kuat.

Kata kunci: minyak bumi, bahan bakar nabati, nuklir, hidrogen, keekonomian

ABSTRACT

ECONOMICAL ANALYSIS OF BIOFUEL PRODUCTS AND NUCLEAR PLANT HYDROGEN. The increasing in oil prices over the last six years is unprecedented that should be seen as a spur to increased efficiency. The surge in oil prices on the world market today is driven by strong demand factors in the depletion of world oil reserves. To replace the fuel oil from the bowels of the earth the various alternatives should be considered, including other crops or vegetable oil production of bio-fuels and hydrogen are produced by high temperature nuclear reactors. Biofuels in the form of ethanol made from corn or sugar cane and biodiesel made from palm oil or jatropha. With the latest world oil prices, future fuel vegetable oil and nuclear hydrogen-based energy technologies become popular in various parts of the world. Economics of biodiesel will be changed in accordance with world oil prices and subsidy regulations which apply to fuel products. On the other hand the role of nuclear energy in hydrogen production with the most potential in the techno-economics is a form of high temperature steam electrolysis, using heat and electricity from nuclear reactors. The production cost of biodiesel fuel on the basis of ADO type subsidy is 10.49 US\$/MMBTU, while the production cost of hydrogen as an energy carrier of high temperature reactor is 15.30 US\$/MMBTU. Thus, both types seem to have strong competitiveness.

Keywords: petroleum, biofuel, nuclear, hydrogen, economics

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kenaikan harga minyak bumi merupakan faktor yang menentukan dalam meningkatkan daya saing bahan bakar alternatif, termasuk *biofuel*. Kenaikan harga minyak selama enam tahun terakhir belum pernah terjadi sebelumnya yang harus dipandang sebagai pendorong untuk peningkatan efisiensi, konservasi energi, dan meningkatkan pasokan yang dihasilkan dari sumber energi tradisional dan alternatif. Meskipun kemungkinan penyesuaian kembali harga minyak lebih rendah, namun menunjukkan harga riil tetap berada di atas \$70 per barel.

Harga minyak yang melambung demikian pada periode sebelumnya berlangsung dalam waktu singkat. Harga cenderung meningkat sangat tajam, yang biasanya disebabkan oleh konflik militer. Gejolak harga memuncak dalam hitungan minggu atau bulan, kemudian kembali menurun dengan kurva cukup tajam. Mengikuti kenaikan harga, penurunan harga minyak yang cepat membuatnya sulit untuk menjalankan program bahan bakar alternatif dan mengurangi insentif bagi konsumen untuk mengurangi penggunaan produk-produk minyak bumi.

Tidak seperti harga tinggi periode sebelumnya, pasar minyak dewasa ini didorong oleh faktor sisi permintaan yang kuat. Faktor-faktor tersebut mencakup pertumbuhan ekonomi yang tinggi dan meningkatnya permintaan minyak karena pertumbuhan ekonomi yang pesat di kalangan masyarakat berpendapatan sedang, di mana konsumen menuntut standar hidup yang lebih tinggi terhadap energi. Hampir dua pertiga dari pertumbuhan global baru-baru ini berasal dari permintaan minyak datang dari negara-negara golongan ekonomi menengah, seperti Cina, Malaysia, Thailand dan lainnya.

Perkembangan yang pesat dalam produksi *biofuel* telah meningkatkan harapan tentang potensi bahan bakar minyak berbasis tumbuhan pengganti bahan bakar fosil, sekaligus menimbulkan kekhawatiran tentang dampak kenaikan harga komoditas pada sistem pangan global.

1.2. Tujuan

Studi ini bertujuan untuk mendapatkan perbandingan ekonomi bahan bakar berdasarkan kesetaraan nilai kandungan energinya, serta aspek biaya lainnya yang terkait dengan proses produksi dan penggunaan energi. Untuk pabrik hidrogen dengan sumber energi nuklir analisis dilakukan dengan menilai potensi pabrik *High Temperature Electrolysis* (HTE) yang digabungkan dengan sumber panas nuklir temperatur tinggi untuk produksi hidrogen pada skala lebih besar. Penilaian ini berdasarkan pengembangan desain sistem HTE dan mendemonstrasikan peningkatan efisiensi serta potensi efisiensi biaya. Reaktor temperatur tinggi maju dapat menyediakan temperatur tinggi yang diperlukan untuk uap super panas dan energi listrik secara efisien yang dibutuhkan untuk proses elektrolisis.

2. MINYAK BUMI DAN BIOFUEL

2.1. Perkembangan Konsumsi Minyak Bumi

Dalam kehidupan masyarakat modern, minyak bumi adalah bahan kedua terpenting setelah makanan! Minyak bumi di samping memasok energi bagi berbagai kegiatan sehari-hari, juga menyediakan berbagai bahan penting yang amat dibutuhkan manusia di bidang industri seperti bahan-bahan kimia untuk dijadikan berbagai jenis produk. Minyak bumi dalam bahasa asing disebut petroleum yang berasal dari kata "petra" dan "oleum" dalam Bahasa Latin yang secara literasi berarti "minyak batu", yang merujuk pada senyawa-senyawa hidrokarbon yang terbentuk di dalam bebatuan endapan di dalam perut bumi dalam bentuk gas, cair, semi padat dan padat. Dari segi kandungan kimia minyak bumi

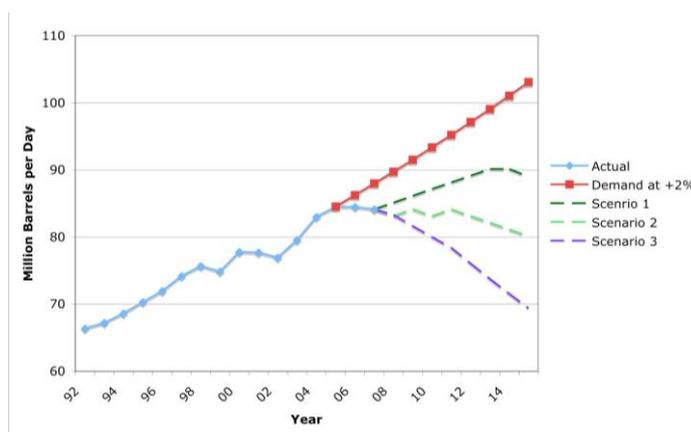
terdiri dari campuran senyawa-senyawa hidrokarbon yang kompleks dengan mengalami sedikit impuritas oleh nitrogen, oksigen, sulfur dan sejumlah kecil larutan logam.

Hingga kini bahan bakar yang berasal dari minyak bumi menyuplai lebih dari setengah kebutuhan energi dunia. Minyak tanah, solar, dan bensin dikonsumsi untuk menggerakkan kendaraan-kendaraan bermotor seperti mobil, sepeda motor, bus, truk, traktor, kapal laut, pesawat terbang, dan sebagainya. Minyak bakar dan gas digunakan untuk pemanas di rumah-rumah penduduk dan gedung-gedung komersial di daerah beriklim dingin dan sebagai sumber tenaga untuk pembangkit listrik. Produk minyak bumi juga merupakan bahan dasar untuk industri serat sintetis untuk menjadi pakaian, cat, plastik, pupuk, insektisida, sabun dan karet sintetis. Saat ini penggunaan minyak bumi merupakan pusat fungsi industri modern.

Menurut teori, umumnya para ahli geologi, minyak bumi terbentuk melalui proses perubahan kimia bahan-bahan yang berasal dari jasad-jasad hayati renik yang tertimbun didalam batu endapan di dalam samudra melalui rentang waktu puluhan hingga ratusan juta tahun. Transformasi dari bahan endapan tersebut menjadi minyak bumi berlangsung setelah jasad hayati renik tersebut mengendap bersama bakteri-bakteri yang memainkan peranan pada tahap awal bersama partikel-partikel tanah liat sebagai katalisator.

Proses terbentuknya minyak bumi dan bahan bakar fosil lainnya tidak seimbang dengan penggunaannya di berbagai sektor. Diperkirakan bahwa total cadangan minyak bumi dunia sekitar 1383,2 milyar barel^[1]. Sebagian besar berada di timur tengah, dan hanya 4,2 milyar barel atau 0,3% tersisa di bumi Indonesia. Saat ini Indonesia berstatus sebagai importir minyak bumi dan telah keluar dari keanggotaan OPEC sejak tahun 2008 yang lalu.

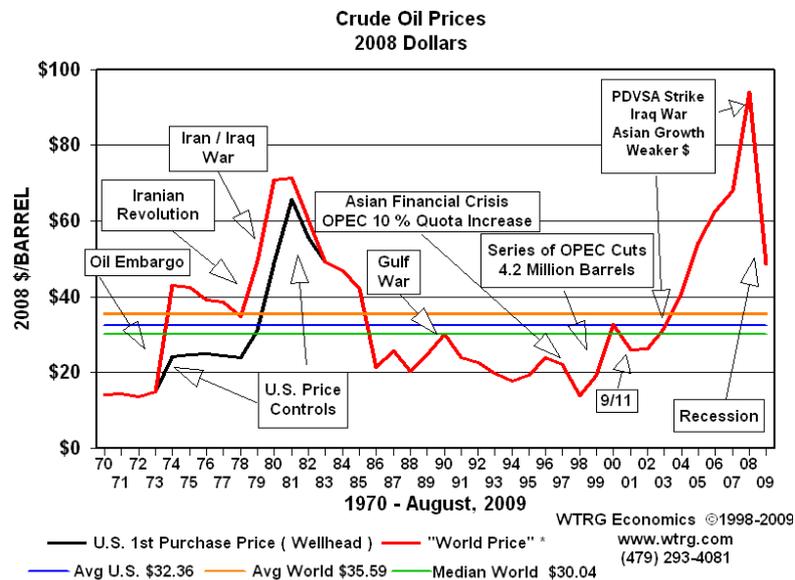
Masa depan produksi minyak dunia diproyeksikan pada tiga skenario yang harus menjadi perhatian, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Jika produksi OPEC sekarang jatuh, maka ada kemungkinan bahwa masa "puncak minyak" telah dilewati. Ketika dunia berada pada puncak produksi minyak, diperkirakan bahwa produksi minyak masa depan mengikuti pola Skenario 3 (garis titik-titik terendah, dengan laju produksi merosot tajam) atau mungkin Skenario 2 (garis titik-titik tengah, dengan produksi jatuh setelah mendatar tinggi) dunia.



Gambar 1. Kemungkinan Skenario Masa Depan Minyak Bumi^[2]

Beberapa orang terkemuka dalam industri energi, termasuk Matt Simmons, bankir investasi energi dan penulis *Twilight in the Desert* dan Samsam Bahktiari, pensiunan eksekutif minyak Iran, percaya bahwa saat ini dunia berada di puncak produksi minyak. Skenario 1 (garis titik-titik atas) menunjukkan di mana puncak minyak masih beberapa tahun lagi. Beberapa ilmuwan percaya bahwa ini adalah skenario yang lebih mungkin.

Asosiasi untuk *Study of Peak Oil and Gas Newsletter* meramalkan bahwa puncak produksi minyak berada pada tahun 2011. Tesis PhD Fredrik Robelius meramalkan bahwa puncak produksi minyak diperkirakan akan terjadi antara tahun 2008 dan 2018, dan Chris Skrebowski, penulis *Megaprojects Analysis* meramalkan puncaknya pada tahun 2011/2012^[2].



Gambar 2. Kurva Fluktuasi Harga Minyak Mentah Dunia dalam Dolar 2008^[5]

Saat ini cadangan minyak bumi semakin menipis dengan laju konsumsi yang semakin tinggi. Ketergantungan yang sangat kuat terhadap komoditas ini begitu berisiko terhadap kelangsungan peradaban umat manusia. Sedangkan proses yang panjang untuk terciptanya minyak bumi tidak dapat mengimbangi laju konsumsi yang begitu cepat. Berbagai alternatif dicoba untuk keluar dari ancaman kelangkaan bahan bakar portabel, fleksibel dan sangat vital ini; antara lain dengan upaya pengembangan *biofuel* dan rekayasa sistem produksi hidrogen dengan reaktor nuklir.

2.2. Perkembangan Biofuel

Saat pertama kali mesin pembakaran internal dijalankan, para visioner teknologi mengimpikan bahwa kelak mesin akan berjalan pada bahan bakar yang terbuat dari tanaman. Percobaan yang dilakukan di abad ke-19 menunjukkan bahwa hal tersebut memungkinkan. Saat ini minat tersebut kembali meningkat, dan bahan bakar ini telah memperoleh sebutan modern sebagai *biofuel*. Setelah transportasi kendaraan bermotor diperkenalkan, bahan bakar yang berasal dari tanaman menghilang dan digantikan oleh bahan bakar olahan dari minyak mentah, yang bisa diperoleh lebih murah di berbagai belahan dunia dengan hanya membuat lubang ke ke perut bumi. Tidak hanya bensin dan solar, bahan bakar termurah untuk beberapa dekade, tetapi juga sebagai energi padat maupun bahan bakar cair, yang membuat bahan bakar fosil ini sebagai pilihan terbaik untuk membawa kendaraan jarak jauh. Untuk menggantikan bahan bakar ini tidak mudah. Perjuangan untuk melakukan upaya tersebut telah menghasilkan berbagai kontroversi yang begitu kuat dari masyarakat modern.

Generasi *biofuel* pertama adalah berupa etanol yang terbuat dari jagung atau tebu atau berupa *biodiesel* yang terbuat dari minyak sawit, sempat memicu reaksi yang kuat. Bahan bakar ini diduga menyebabkan kerusakan lingkungan yang tidak diinginkan. Produksi bahan bakar ini juga mengalihkan produksi tanaman pangan, yang berpotensi menaikkan

harga pangan dunia^[3]. Di tengah serangan ini, momentum politik *biofuel* telah melambat dalam beberapa tahun terakhir. Namun ada pendapat bahwa pada prinsipnya *biofuel* menawarkan keuntungan besar dibandingkan bahan bakar fosil. Tanaman ini menyerap karbon dioksida dari udara saat tumbuh. Namun di saat lain karbon dioksida dilepaskan ketika bahan bakar nabati dibakar.

Adanya harga minyak terbaru dunia, masa depan bahan bakar minyak nabati (*biofuel*) yang global telah tiga kali lipat dari 4,8 milyar galon pada tahun 2000 menjadi sekitar 16,0 miliar di terbuat dari bahan tanaman menjadi diminati masyarakat di seluruh dunia. Produksi *biofuel* tahun 2007, tetapi sumbangannya masih kurang dari 3 persen dari pasokan bahan bakar transportasi global. Tabel 1 menunjukkan ramalan produksi etanol antara tahun 2008 – 2012. Sekitar 90 persen produksi terkonsentrasi di Amerika Serikat, Brasil, dan Uni Eropa (UE)^[4].

Tabel 1. Ramalan Produksi Etanol Dunia (juta galon) 2008 - 2012^[4]

	2008	2009	2010	2011	2012	CAGR (%)*
Brazil	4.988	5.238	5.489	5.739	5.990	2,8
U.S.	6.198	6.858	7.518	8.178	8.838	5,7
China	1.075	1.101	1.128	1.154	1.181	1,4
India	531	551	571	591	611	2,2
France	285	301	317	333	349	3,2
Spain	163	184	206	227	249	6,9
Germany	319	381	444	506	569	9,7
Canada	230	276	322	368	414	9,9
Indonesia	76	84	92	100	108	5,6
Italy	50	53	55	58	60	2,8
World	16.215	17.574	18.934	20.293	21.653	4,6%

*CAGR = Pertumbuhan tahunan gabungan

Meskipun *biofuel* (bahan bakar nabati) menimbulkan pro dan kontra, karena banyak pula yang meragukan efektivitas, keekonomian dan kesinambungan lingkungan sumber energi terbarukan satu ini, namun secara alamiah bahan ini memiliki prospek yang baik untuk pengembangan *biofuel* di kawasan pertanian yang luas. *Biofuel* (terutama *ethanol* dan *biodiesel*) diproyeksikan akan booming di Amerika Latin dan negara yang mempunyai kawasan tanah subur dan tenaga kerja murah. Jenis tanaman utama yang berprospek adalah tebu dan kacang kedelai. Pemerintah Brazil mengembangkan *biofuel* sejak tahun 70-an ketika harga minyak mentah melambung. Langkah tersebut dianggap sebagai terobosan berani menghadapi ketidak-pastian bahan bakar *portable* masa depan.^[6]

2.3. Keekonomian *Biofuel*

Analisis keekonomian *biofuel* khususnya *biodiesel* untuk kasus di Indonesia, didasarkan pada perhitungan hasil biaya – pendapatan yang dilakukan oleh Prajogo U Hadi bersama timnya. Dalam analisisnya tim tersebut menggunakan asumsi bahwa perusahaan menggunakan pola usaha tani monokultur (Pola A, B dan C). Dari hasil analisis untuk kondisi tahun 2006 ditunjukkan bahwa dengan harga minyak mentah dunia US\$70/barel, nilai tukar Rp9.183 dan rendemen biji CJO (*crude jatropha oil*) 25%, harga pokok produksi *biodiesel* lebih rendah dibanding harga solar dalam negeri tanpa subsidi. Harga pokok produksi *biodiesel* berkisar Rp4.416 – Rp4.734 atau rata-rata Rp4.584 per liter, sedangkan harga solar tanpa subsidi Rp5.086 per liter, sehingga berpotensi menghemat biaya bahan bakar minyak sebesar Rp352 – Rp671 atau rata-rata Rp503 per liter.^[7]

Tabel 2. Perkiraan Biaya dan Harga Rata-rata Crude Jatropha Oil^[7]

Rendemen Biji-CJO	Biaya Produksi Biji		Biaya Pengolahan		Biaya Total (Rp/L)	Harga Solar (Rp/L)	Laba (Rp/L)
	Rp/kg	<i>Biodiesel</i> Rp/L	Ekstraksi (Rp/L)	Estrans (Rp/L)			
25%	558	2.010	1.074	1.500	4.584	5.086	503
30%	558	1.675	895	1.500	4.070	5.086	1.017
35%	558	1.675	767	1.500	3.942	5.086	1.145

Tabel 2 menunjukkan bahwa, dengan harga minyak solar dalam negeri Rp5086/liter, petani memperoleh subsidi benih 100%, dan rendemen biji CJO mencapai 30% atau lebih, maka petani memperoleh laba dengan memproduksi minyak sendiri daripada membeli minyak tanah eceran dengan harga subsidi. Keekonomian *biodiesel* akan berubah sesuai dengan harga minyak bumi dunia dan regulasi subsidi yang diterapkan terhadap produk BBM. Jika harga produk BBM tidak disubsidi keekonomian *biodiesel* akan lebih baik.

3. HIDROGEN NUKLIR

3.1. Produksi Hidrogen dengan Reaktor Nuklir

Hidrogen bukan sumber energi, melainkan pembawa energi, sehingga produksinya membutuhkan energi. Ekonomi hidrogen hanya dapat diterima jika hidrogen diproduksi secara berkelanjutan, non-fosil, energi tanpa gas rumah kaca, seperti surya dan nuklir (baik fisi maupun fusi dalam jangka panjang). Hidrogen diproduksi dengan bahan baku dari air dengan cara:

- Menggunakan pembangkit listrik yang disebut sebagai proses elektrolisis. Teknologi ini telah terbukti. Secara keseluruhan efisiensinya ~24% dengan reaktor (LWR), dan ~36% dengan reaktor temperature tinggi. Dalam hal ini efisiensi adalah efisiensi pembangkit listrik x efisiensi elektrolisis.
- Dengan proses panas berupa termokimia pemisahan unsur oksigen dan hidrogen dari air. Dengan cara ini efisiensi netto pembangkit dapat mencapai ~50%. Teknologi ini sedang dikembangkan.
- Siklus hybrid yaitu dengan Listrik + Panas berupa proses elektrolisis pada temperatur tinggi.

Tenaga nuklir sudah menghasilkan listrik sebagai pembawa energi utama. Kenyataan ini juga dapat diterapkan untuk menghasilkan hidrogen sebagai pembawa energi untuk kebutuhan energi portabel. Sedangkan evolusi peran energi nuklir dalam produksi hidrogen selama tiga dekade yang telah terlihat meliputi:

- Siklus termokimia, melalui reaksi kimia untuk memisahkan hydrogen dan oksigen.
- Elektrolisis air, dijalankan di luar kapasitas beban puncak pembangkit listrik.
- Penggunaan panas nuklir untuk membantu reforming gas alam.
- Elektrolisis uap temperature tinggi, dengan menggunakan panas dan listrik dari reaktor nuklir.

3.2. Siklus Termokimia

Siklus termokimia menghasilkan hidrogen dengan serangkaian reaksi kimia di mana hasil bersih adalah dekomposisi atau pemecahan air, $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$, pada temperatur yang lebih rendah daripada yang dapat dilakukan dengan pemanfaatan temperatur tinggi saja (termolisis). Siklus termokimia murni melibatkan serangkaian reaksi kimia yang hanya didorong oleh energi panas. Hasil bersih dari masukan panas dan air adalah hidrogen dan oksigen. Siklus termokimia hibrida mencakup tahap reaksi kimia dan proses elektrolisis dari beberapa senyawa kimia yang bukan air yang biasanya menghasilkan hidrogen. Kedua energi (panas dan listrik) diperlukan untuk melengkapi siklus hibrida. Namun, kebutuhan

energi untuk langkah elektrolisis yang jauh lebih kecil dari persyaratan untuk elektrolisis air. Temperatur yang diperlukan untuk mendorong reaksi termokimia endotermik untuk siklus yang kuat, umumnya 750-1000 °C atau lebih tinggi.

3.3. Elektrolisis Uap Temperatur Tinggi

Elektrolisis adalah pendekatan paling potensial untuk memproduksi hidrogen secara langsung dari air. Elektrolizer konvensional yang sudah ada menggunakan listrik untuk efisiensi konversi sebesar 70%. Jika efisiensi pembangkit listrik adalah 33 sampai 40%, maka efisiensi produksi hidrogen secara keseluruhan adalah antara 23 sampai 28%.

High Temperature Electrolisis (HTE), atau elektrolisis uap memiliki potensi untuk efisiensi yang lebih tinggi. Energi termal digunakan untuk menghasilkan uap temperatur tinggi untuk mengurangi kebutuhan energi listrik dalam proses elektrolisis.

3.4. Keekonomian Hidrogen Nuklir

Dalam evaluasi ekonomi, faktor pengembalian modal (*cost recovery*) proyek dianggap sebagai komponen dominan dari biaya hidrogen nuklir. Efisiensi produksi hidrogen didefinisikan sebagai nilai kalor yang lebih rendah dari hidrogen (~ 123 MJ/kg) dibagi dengan total energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan hidrogen, termasuk energi netto dan energi reaksi yang hilang dalam mekanisme proses.

K.R. Schultz bersama tim studinya telah membuat proyeksi awal tentang keekonomian produksi hidrogen dari energi nuklir. Biaya modal untuk *Gas Turbine Modular Helium-Reaktor (GT-MHR)* diperkirakan sebesar 468 \$/kW(t). Biaya modal yang diestimasi dari komponen reaktor GT-MHR (tidak termasuk biaya-turbo generator dan termasuk penukar panas *intermediate*, sirkulator dan perpipaan) adalah 371 \$/kW(t). Biaya ini mengasumsikan 45 \$/kW(t) premi untuk menyediakan 950°C yang diperlukan untuk proses SI bukan temperatur 850°C outlet GT-MHR. Biaya dari loop helium pendingin reaktor *intermediate* untuk menghubungkan ke pabrik pengolahan hidrogen diperkirakan sebesar 43 \$/kW(t). Tim K.R. Schultz memperkirakan bahwa siklus sulfur-iodium (S-I) pabrik hidrogen akan sebesar 255 \$/kW(t), dengan biaya total modal H₂-MHR sebesar 669 \$/kW(t). Biaya tersebut ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Estimasi Biaya Modal dan Operasi H₂-MHR^[8]

	Pemb.Listrik GT-MHR	Pem.Panas Process MHR	Loop Intermediate	Pemb. Hydrogen S-I	Pemb.H ₂ - MHR Total
Biaya Modal, \$/kW(t)	468	371	43	255	669
Biaya Operasi, \$/MW(t)h	5,0	4,5	0,1	2,2	6,8

Biaya operasi GT-MHR diperkirakan 3,0 \$/MW(e)h untuk O&M plus 7,4 \$/MW(e)h untuk biaya siklus bahan bakar, dengan total 10,4 \$/MW(e)h atau 5,0 \$/MW(t)h untuk semua biaya operasi (bahan bakar, O&M, penyimpanan limbah, dan dekomisioning). Biaya siklus bahan bakar nuklir tidak berubah apakah yang dihasilkan listrik atau hidrogen. Tim K.R. Schultz mengasumsikan biaya O&M dengan skala biaya modal untuk proses panas MHR sebesar \$1,1/MW(t)h, sehingga memberikan biaya operasi total MHR sebesar 4,5 \$/MW(t)h. Loop antara (*intermediate*) menambah biaya sebesar 0,1 \$/MW(t)h. Biaya O&M Siklus S-I diperkirakan ~7% dari biaya modal awal per tahun atau 2,2 \$/MW(t)h dari biaya operasi total pabrik H₂-MHR sehingga menjadi 6,8 \$/MW(t)h. Biaya tersebut ditampilkan pada Tabel 4, dengan asumsi faktor kapasitas 90%.

Bunga selama konstruksi, diasumsikan 3 tahun, menambah biaya modal pabrik sekitar 8%. MHR. Dengan demikian biaya produksi hidrogen tergantung pada tingkat

bunga yang digunakan dalam perhitungan ekonomi. Pada temperatur 900°C, proses berada pada puncak efisiensi panas-ke-hidrogen 51% H₂-MHR, yang mana 1 MW(t)h akan menghasilkan 1836 MJ atau 12,9 kg hidrogen. Dengan membagi biaya \$/MW(t)h pada Tabel 3 sebesar 12,9 memberikan biaya hidrogen sebesar \$1,43/kg dan \$1,74/kg, masing-masing untuk utilitas diatur dan tidak diatur.

Table 4: Estimasi Biaya Produksi Hidrogen^[8]

	Biaya Modal, [\$/MW(t)h]	Biaya Operasi [\$/MW(t)h]	Biaya Total [\$/MW(t)h]	Biaya Hydrogen (\$/kg)
Utilitas diatur	11,5	6,8	18,3	1,42
Utilitas tidak diatur	15,7	6,8	22,5	1,74

Biaya produksi hidrogen dari gas alam dengan *reforming* gas metan sangat bergantung pada harga gas alam yang digunakan untuk bahan baku dan sumber energi. Saat ini harga gas alam adalah sekitar \$6/MMBTU⁹. Dengan harga tersebut *reforming* gas dapat menghasilkan hidrogen dengan biaya sekitar \$1,5/kg. Jika menangkap dan mengkarantina karbon diperlukan, perkiraan biaya H₂ dari gas metan akan bertambah sebesar 20 sen/kg^[10]. Jika H₂-MHR mampu menjual oksigen yang dihasilkan dengan harga saat ini sekitar 5,3 sen/kg, akan mengurangi biaya produksi hidrogen nuklir sebesar 40 sen/kg H₂. Ini berarti bahwa produksi hidrogen nuklir dengan pemisahan air menggunakan gabungan MHR dengan siklus termokimia Sulfur-Iodine, akan kompetitif terhadap hidrogen yang dihasilkan dengan *reforming* gas metan, bahkan untuk harga gas alam dewasa ini. Jika menangkap dan mengkarantina CO₂ tidak diperlukan dan penjualan oksigen tidak memungkinkan, harga gas alam hanya akan meningkat menjadi sekitar \$5,90/kg untuk hidrogen dari MHR-H₂ pada utilitas yang diatur untuk bersaing dengan *reforming* gas metan.

Dari uraian di atas maka produksi bahan *energy carrier* H₂ dari proses pembangkit nuklir dan *reforming* gas alam adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5: Biaya Produksi Hidrogen

Satuan	Reforming gas alam	MHR + termokimia sulfur iodine
US\$/kg	1,15	1,74
US\$/MMBTU	10,11	15,30

3.5. Perbandingan Harga Hidrogen Nuklir

Bila harga rata-rata nilai rendemen 30%, maka biaya produksi 1 liter minyak disel dari jarak pagar (*jatropha*) adalah Rp3252. Bahan bakar diesel dari jenis ADO mengandung 10224 kcal atau 40744 BTU/kg, sehingga harga tersebut di atas menjadi energi 10,49 US\$/MMBTU pada nilai konversi mata uang Rp9000/US\$. Sementara gas hidrogen sebagai *energy carrier* pada biaya produksi 1,74 US\$/kg dan nilai kalor 120 MJ/kg menghasilkan 15,30 US\$/MMBTU.

Selisih keekonomian antara biodiesel dan hidrogen nuklir tampak mempunyai peluang besar bagi hidrogen nuklir untuk bersaing terhadap *biodiesel* pada basis harga ADO subsidi dan masih tersedia cukup saat ini. Beberapa negara maju melihat prospek ini sebagai tumpuan harapan penyediaan energi portable masa depan khususnya untuk kendaraan bermotor sebagai pengganti bahan bakar fosil.

4. KESIMPULAN

- a. Berbagai upaya dalam mengatasi kelangkaan bahan bakar minyak masa mendatang sangat diperlukan, baik dengan usaha berbasis tanaman maupun dengan usaha yang berbasis teknologi industri termasuk produksi hidrogen dengan Reaktor Temperatur Tinggi, yang keduanya memiliki keunggulan dan kekurangan.
- b. Pengembangan *biofuel* bagi wilayah Indonesia yang mempunyai lahan yang luas dan tanah yang subur sangat memungkinkan. Meskipun dari aspek lain kegiatan pengembangan *biofuel* adalah penyitaan lahan yang begitu luas yang dari satu sisi dapat mengganggu produksi tanaman pangan, namun usaha produksi *biofuel* merupakan lapangan ekonomi potensial bagi wilayah yang berpenduduk dengan tenaga kerja murah dan lahan yang luas.
- c. Keekonomian *biodiesel* akan berubah mengikuti perubahan harga minyak bumi dunia dan regulasi subsidi yang diterapkan terhadap produk BBM. Keekonomian *biofuel* akan meningkat jika subsidi produk BBM dikurangi atau dihapus.
- d. Elektrolisis temperatur tinggi (HTE), atau elektrolisis uap, memiliki potensi efisiensi tinggi untuk keseluruhan proses, sehingga energi termal yang digunakan untuk menghasilkan uap temperatur tinggi mengurangi konsumsi energi listrik untuk elektrolisis secara signifikan. Dengan demikian pengurangan energi total yang dibutuhkan untuk pembangkit hidrogen cukup signifikan. HTE dapat dicapai dengan menggunakan bahan dan teknologi yang sama dengan yang digunakan dalam sel bahan bakar oksida padat (SOFCs).
- e. Dari biaya produksi *biodiesel* dan hydrogen nuklir tampak masih dalam batas skala kompetitif. Dengan biaya produksi hydrogen nuklir sekitar 15,3 \$/MMBTU dan produksi *biodiesel* sekitar 10,5 \$/MMBTU pada basis ADO bersubsidi, maka peluang aplikasi hidrogen nuklir mempunyai prospek yang cukup baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. BP, "BP Statistical Review of World Energy, June 2011", BP, 2011.
- [2]. TVERBERG, G., "Peak Oil Overview - June 2007", posted by on June 26, 2007 - <http://www.theoil drum.com/node/2693> atau <http://www.theoil drum.com/files/Peak%20Oil%20Overview.pdf> , diakses 8 Februari 2011 10:46 AM.
- [3]. _____, The New York Times.com Monday, May 31, 2010.
- [4]. MARKET RESEARCH ANALYST, "World's Ethanol Production Forecast 2008 – 2012", <http://www.marketresearchanalyst.com/2008/01/26/world-ethanol-production-forecast-2008-2012/>.
- [5]. WTRG, "History and Analysis -Crude Oil Prices", <http://www.wtrg.com/prices.htm>, Diakses 8 Februari 2011 11:27 AM.
- [6]. _____, "Pro Kontra Biofuels", Blog Energi Terbarukan & Lingkungan Hidup, <http://kunaifi.wordpress.com/2007/12/23/pro-kontra-biofuels/>, diakses 31 Mei 2011, 9:12 PM.
- [7]. HADI, P.U., DJULIN, A., ZAKARIA, A. K., DARWIS, V., SITUMORANG, J., "Prospek Pengembangan Sumber Energi Alternatif (Biofuel): Fokus Pada Jarak Pagar", Makalah Seminar Hasil Penelitian T.A. 2006, Pusat Analisis Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian, 2006, http://adf.ly/411345/http://www.litbang.deptan.go.id/berita/one/403/file/Biofuel_PUH_.pdf, diakses 11 Februari 2011, 07:06 PM.
- [8]. SCHULTZ, K. R., BROWN, L. C., BESENBRUCH, G. E., and HAMILTON, C. J., "Large-Scale Production of Hydrogen By Nuclear Energy For The Hydrogen

- Economy”, work supported by the U.S. Department of Energy under grant No. DE-FG03-99SF21888 GENERAL ATOMICS PROJECT 49009, February 2003.
- [9]. KOROMPOT, M. N., “BP Migas Diminta Tinjau Harga Gas Wajo”, *Bisnis KTI*, 1 July 2011, <http://www.bisnis-kti.com/index.php/2011/07/bp-migas-diminta-tinjau-harga>, diakses 11 Februari 2011 7:27 PM.
- [10]. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, “Current (2009) State-of-the-Art Hydrogen Production Cost Estimate Using Water Electrolysis, Independent Review”, Published for the U.S. Department of Energy Hydrogen Program, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, September 2009, <http://hydrogen.energy.gov/pdfs/46676.pdf>.
- [11]. COYLE, W., “The Future of Biofuels, A Global Perspective”, <http://www.ers.usda.gov/AmberWaves/November07/PDF/Biofuels.pdf>.
- [12]. U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, “World Biofuels Production Potential - Understanding the Challenges to Meeting the U.S. Renewable Fuel Standard”, Office of Policy Analysis, Office of Policy and International Affairs, U. S. Department of Energy, Washington, D.C., 15 September 2008, <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/946833-Glee7C/946833.pdf>.