

## INFRASTRUKTUR HIDROGEN UNTUK APLIKASI *FUEL CELL* DALAM ERA EKONOMI HIDROGEN

---

**Oo Abdul Rosyid, M.A.M. Oktaufik**  
Balai Besar Teknologi Energi (B2TE-BPPT),  
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang 15314  
Telp. 021-7560550; Fax. 021-7560904  
rosyid\_id@yahoo.com

### ABSTRAK

Perkembangan teknologi sel bahan bakar dewasa ini telah mendorong peningkatan penggunaan hidrogen sebagai media penyimpan energi (*energy carrier*) dalam skala besar (*hydrogen economy*). Hidrogen merupakan media penyimpan energi yang ideal bila dibangkitkan dari sumber energi terbarukan, dan penghubung dalam rantai energi yang berkelanjutan dan bebas emisi dari awal hingga akhir. Penggunaan hidrogen sebagai energi dalam skala besar, hanya mungkin, jika tersedia infrastruktur yang meliputi produksi, penyimpanan, transportasi, dan pengguna akhir yang handal, aman, memadai, dan ekonomis. Saat ini produksi hidrogen dengan teknologi reformasi dari energi fosil merupakan solusi terbaik bagi Indonesia yang memiliki potensi gas alam yang melimpah. Hidrogen selanjutnya disimpan dan didistribusikan dalam bentuk gas dalam tabung yang dikompresi dengan memperhatikan standar yang direkomendasikan untuk hidrogen.

**Kata kunci:** Hidrogen, Sel bahan bakar, Energi, Infrastruktur, Lingkungan

### ABSTRACT

The development of fuel cell technology nowadays has improved the use of hydrogen as an energy carrier in high scale (hydrogen economy). Hydrogen is an ideal energy carrier if it comes from renewable energy resources and as connector in sustainable and emission free energy chain from the beginning until the end. The use of hydrogen as an energy in high scale, only possible, if the available infrastructures such as the production, storage, transportation and the end use are good, save, adequate and economical. Now, hydrogen production with reformation technology from fossil energy is the best solution for Indonesia that has huge gas resources. The hydrogen will be stored and distributed in form of gas in a compressed tube according to the recommended standard for hydrogen.

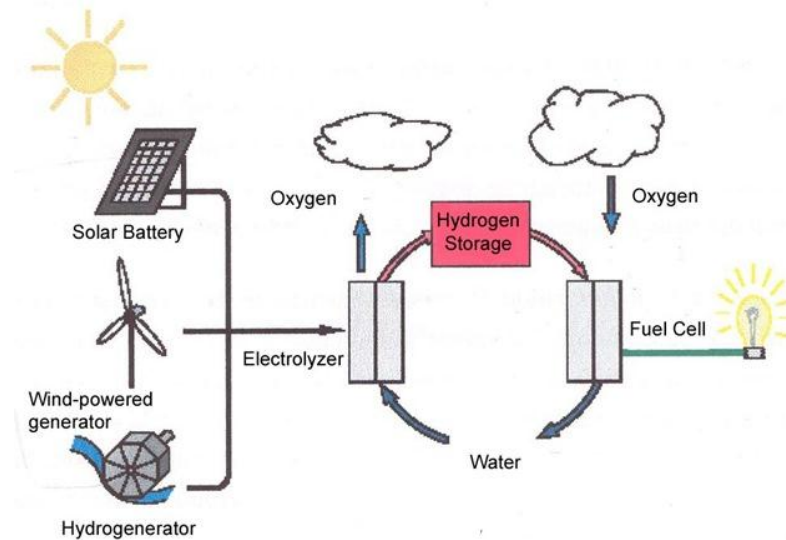
**Keywords:** Hydrogen, Fuel cell, Energy, Infrastructure, Environment

## 1. PENDAHULUAN

Dalam diskusi tentang penyediaan energi masa depan – khususnya berkaitan dengan sumber energi terbarukan – hidrogen dipertimbangkan sebagai media penyimpan energi (*energy carrier*). Hidrogen merupakan media penyimpan energi yang ideal untuk listrik yang dibangkitkan dari sumber energi terbarukan, yang menjadikan penghubung penting dalam rantai energi yang berkelanjutan (*sustainable*) dan bebas emisi dari awal hingga akhir. Tidak seperti halnya energi fosil, hidrogen tidak akan habis, karena hidrogen merupakan unsur yang paling banyak ditemukan di alam. Di samping itu, hidrogen dapat digunakan baik untuk membangkitkan listrik maupun sebagai bahan bakar, yang

membuatnya sangat cocok digunakan baik untuk aplikasi stasioner maupun bergerak (*mobile*).

Salah satu *trend* global saat ini adalah terjadinya suatu pergeseran dalam penggunaan energi fosil ke hidrogen, yang dikenal dengan istilah "ekonomi hidrogen". Sistem ekonomi hidrogen merupakan visi masa depan di mana sistem ekonomi yang didasarkan pada penggunaan hidrogen sebagai media penyimpanan energi dan bahan bakar. Sistem ini sangat penting bagi kemajuan umat manusia karena beberapa alasan. Pertama, penghematan energi fosil yang menghadapi masalah: persediaan terbatas, pemanasan global, dan polusi. Cadangan energi fosil (terutama minyak) yang ada di planet ini terbatas, dan tidak dapat diciptakan kembali tanpa menunggu ratusan ribu tahun lagi. Dengan membakar energi fosil untuk memperoleh energi sejumlah polusi udara dan CO<sub>2</sub> yang dilepaskan. Pelepasan CO<sub>2</sub> ke atmosfer dapat membawa tentang perubahan iklim global yang signifikan. Polusi udara memburuk ke tingkat di mana kota-kota besar di seluruh dunia dipaksa untuk membatasi penggunaan mobil dan memperkenalkan langkah-langkah untuk mendorong kendaraan bersih.



Gbr. 1. Siklus energi hidrogen [1]

Kedua, hidrogen dapat diproduksi dari berbagai sumber baik energi fosil maupun energi terbarukan. Hidrogen dapat diproduksi dari sumber energi fosil seperti metan, gasoline, batubara, dan lain-lain. Tiap sumber ini memiliki perbedaan dalam hal polusi, tantangan teknik, dan kebutuhan energi. Hidrogen dapat diproduksi pada fasilitas produksi hidrogen terpusat dan besar yang mengambil keuntungan dari skala ekonomi dan memenuhi permintaan hidrogen yang meningkat. Lebih dari itu, hidrogen dapat diproduksi *on-site* dimana hidrogen akan digunakan.

Energi terbarukan seperti angin, air, surya, dan tidal juga dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen dari air. Sumber energi terbarukan seringkali terbatas untuk penggunaan komersial dikarenakan keberadaanya tidak konstan. Setiap sumber energi alami bergantung langsung pada fenomena alam yang tidak dapat dikendalikan oleh manusia. Seringkali angin tidak bertiup atau matahari tidak bersinar, sehingga hidrogen dapat digunakan sebagai penghubung yang kritis, sebagai media penyimpan energi untuk mensuplai daya pada perioda tersebut. Hidrogen dapat digunakan sebagai sumber bergerak untuk transportasi dengan menekan dan menyimpan dalam tabung kecil untuk aplikasi seperti gasoline atau propane.

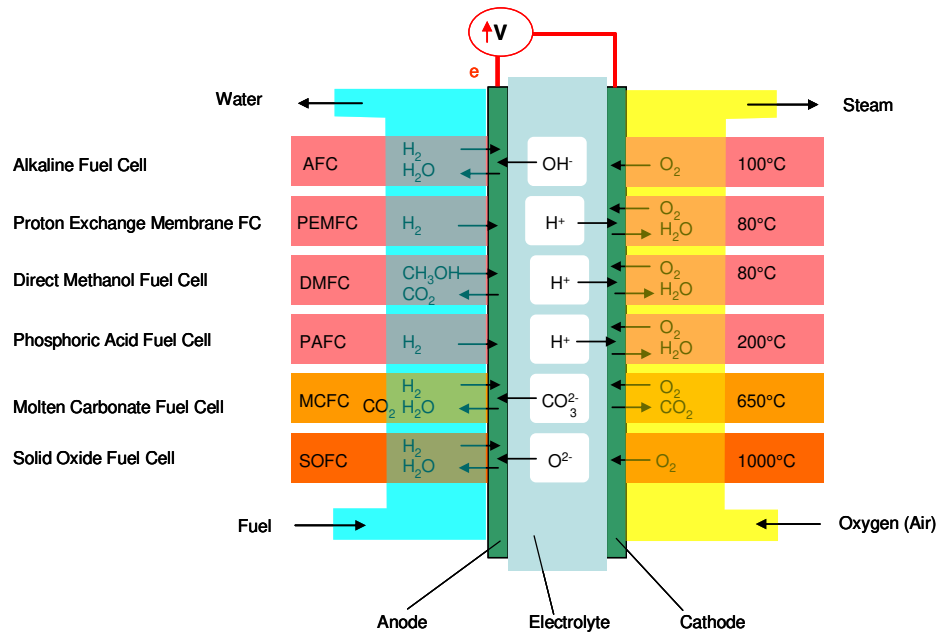
## **2. TEKNOLOGI SEL BAHAN BAKAR DAN APLIKASINYA**

*Fuel cell* (Sel bahan bakar) adalah suatu sel elektrokimia yang mirip dengan baterai, tetapi berbeda, karena reaktan yang dikonsumsi oleh sel bahan bakar untuk dapat diisi secara terus-menerus. Sel bahan bakar menghasilkan energi listrik dari suplai hidrogen dan oksigen dari luar. Hal ini berbeda dengan baterai dimana listrik dihasilkan dari energi internal. Disamping itu, elektroda dalam baterai beraksi dan berubah pada saat baterai diisi (*charged*) atau dibuang energinya (*discharged*), sedangkan elektroda sel bahan bakar adalah katalitik dan relatif stabil.

Reaktan yang digunakan dalam sebuah sel bahan bakar adalah hidrogen pada sisi anode dan oksigen pada sisi katoda. Biasanya, aliran reaktan mengalir masuk dan produk dari reaktan mengalir keluar. Sehingga operasi jangka panjang dapat dijaga kelangsungannya selama aliran dilakukan secara terus menerus.

### **2.1. Tipe dan Operasi Sel Bahan Bakar**

Tipe sel bahan bakar dapat dibedakan oleh jenis bahan bakar yang digunakan, tekanan operasi, temperatur, dan sektor aplikasi. Dalam klasifikasi yang lebih luas, sel bahan bakar dibedakan oleh jenis material elektrolit yang digunakan sebagai suatu media untuk transfer ion internal (proton). Jenis elektrolit menentukan temperatur operasi pada jenis katalis yang digunakan. Pemilihan bahan bakar dan oksidan untuk berbagai jenis sel bahan bakar bergantung pada aktivitas elektrokimianya (yakni, kecepatan reaksi elektroda), biaya, dan kemudahan pelepasan (*delivery*) bahan bakar dan oksidan, dan reaksi pembuangan oleh reaksi produk samping. Sumber utama untuk sel bahan bakar adalah hidrogen, tetapi dapat juga berupa material lain seperti methanol, gas alam, dan lain-lain melalui proses konversi bahan bakar.



Gbr. 2. Tipe sel bahan bakar dan operasinya [2]

- 1) **Alkaline Fuel Cells (AFC).** Elektrolit dalam sel bahan bakar AFC adalah Kalium hidroksida (KOH) terkonsentrasi (85 wt.) dalam sel suhu tinggi (~ 250°C), atau KOH kurang terkonsentrasi (35-50 wt.) untuk operasi pada suhu yang lebih rendah (<120 °C). Pada pertengahan 1960-an sel bahan bakar ini sudah digunakan untuk kendaraan ruang angkasa. Namun, sel bahan bakar ini kurang berhasil dalam aplikasi di bumi, disebabkan tingginya biaya produksi bahan bakar dan oxidiser dengan kemurnian tinggi, ditambah masalah korosi. Efisiensi *fuel cell* ini adalah 60%.
- 2) **Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC).** Elektrolit dalam sel bahan bakar ini adalah membran polimer padat (plastik tipis film), konduktor ion (proton) yang sangat baik. Kerapatan arus tinggi dalam sel ini berarti rendahnya berat, volume, dan biaya. Elektrolit padat membuat proses penyegelan lebih mudah dalam produksi sel bahan bakar, mengurangi korosi, dan menyediakan layanan hidup yang lebih lama. Temperatur operasi yang rendah (di bawah 100°C) memfasilitasi start-up dan reaksi terhadap kebutuhan daya. Sel bahan bakar ini sangat ideal untuk kendaraan transportasi skala kecil dan aplikasi stasioner.
- 3) **Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC).** Elektrolit dalam sel bahan bakar ini adalah asam fosfat dengan konsentrasi 100% dipertahankan dalam sebuah matriks berupa silikon karbida. PAFC merupakan sel bahan bakar jenis pertama yang mencapai tahapan komersialisasi. Aplikasi: stasioner listrik di rumah-rumah, hotel, rumah sakit, bandara. Efisiensi mereka melebihi 40% dan dapat mencapai 85% ketika produk sampingnya adalah uap.

- 4) ***Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)***. Elektrolit dalam sel bahan bakar ini biasanya merupakan kombinasi dari karbonat alkali, seperti Na dan K, yang disimpan dalam matriks keramik  $\text{LiAlO}_2$ . Sel bahan bakar beroperasi di sekitar  $600\text{-}700^\circ\text{C}$ , sehingga memungkinkan untuk menggunakan bahan bakar secara langsung, tanpa pengolahan tambahan, dan Ni dapat digunakan sebagai katalis. Sel bahan bakar ini menawarkan efisiensi listrik lebih tinggi dari pada PAFC sekitar 60% ditambah kemungkinan cogeneration yang membuat efisiensi keseluruhan lebih dari 80%. Reaksi lambat terhadap setiap perubahan dalam kebutuhan daya, menjadikan MCFC cocok untuk aplikasi di mana dibutuhkan daya yang tinggi terus-menerus. Saat ini ada banyak proyek demonstrasi di Amerika Serikat dan Jepang. Salah satu proyek di Amerika memiliki kapasitas sebesar 1,8 MW.
- 5) ***Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)***. Elektrolit dalam sel bahan bakar ini adalah suatu logam, nonporous oksida,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  yang distabilisasi oleh  $\text{ZrO}_2$ . Sel beroperasi pada  $650\text{-}1000^\circ\text{C}$ . Suhu operasi pada SOFC cukup tinggi, sehingga cocok untuk digunakan pada pembangkit listrik stasioner skala besar. Efisiensi keseluruhan adalah sekitar 60%.

**Tabel 1. Kelebihan dan kekurangan sel bahan bakar[2]**

Sel Bahan Bakar	Elektrolit	Suhu Operasi ( $^\circ\text{C}$ )	Aplikasi	Keuntungan	Kekurangan
PEM FC	membran polimer padat (plastik tipis film), konduktor ion (proton)	60 -100	Peralatan listrik, sumber energi portabel, transportasi	<i>Solid electrolyte</i> mereduksi korosi dan masalah manajemen, suhu rendah dan cepat bereaksi ( <i>start up</i> )	Suhu rendah membutuhkan katalis mahal, sensitivitas tinggi terhadap bahan bakar tidak murni atau kotor
AFC	Kalium hidroksida (KOH) terkonsentrasi (85 wt.) dalam sel suhu tinggi ( $\sim 250^\circ\text{C}$ ), atau KOH kurang terkonsentrasi (35-50 wt.)	90-100	Militer	Reaksi katoda lebih cepat dalam elektrolit alkalin – jadi kinerja tinggi	Mahalnya menyisihkan $\text{CO}_2$ dari bahan bakar dan dibutuhkan aliran udara
PAFC	asam fosfat dengan konsentrasi 100% dipertahankan dalam sebuah matriks berupa silikon karbida	175 - 200	Peralatan listrik dan transportasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• efisiensi sampai 85 % dengan listrik dan panas</li> <li>• <math>\text{H}_2</math> tidak murni sebagai bahan bakar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Katalis Pt</li> <li>• Arus dan <i>power</i> rendah</li> <li>• Ukuran dan berat besar</li> </ul>
MCFC	kombinasi dari karbonat alkali, seperti Na dan K, yang disimpan dalam matriks keramik $\text{LiAlO}_2$	600 - 1000	Peralatan listrik	Keuntungan suhu tinggi	Suhu tinggi sangat memungkinkan korosi dan rusaknya komponen sel
SOFC	logam, nonporous oksida, $\text{Y}_2\text{O}_3$ yang distabilisasi oleh $\text{ZrO}_2$	600 - 1000	Peralatan listrik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keuntungan suhu tinggi</li> <li>• Keuntungan <i>Solid electrolyte</i> (lihat PEM)</li> </ul>	Suhu tinggi sangat memungkinkan rusaknya komponen sel

Sistem sel bahan bakar beroperasi tanpa polusi bila dioperasikan dengan hidrogen murni, satu-satunya produk samping (*by-product*) berupa air murni dan panas. Bila menggunakan campuran gas kaya hidrogen, beberapa emisi berbahaya akan dihasilkan, namun demikian jumlahnya lebih sedikit dibandingkan dengan mesin pembakaran internal berbahan bakar fosil. Efisiensi termodinamika dari sel bahan bakar lebih tinggi dari mesin uap (*heat engine*). Karena sel bahan bakar tidak menggunakan pembakaran, efisiensi tidak terhubung dengan suhu operasi maksimumnya. Sebagai hasilnya, efisiensi dari tahapan konversi daya (reaksi elektrokimia aktual sebagai lawan dari reaksi pembakaran yang sebenarnya) dapat lebih tinggi. Tabel 1 menunjukkan kelebihan dan kekurangan sel bahan bakar.

## **2.2. Aplikasi Sel Bahan Bakar**

Secara umum sel bahan bakar bersifat modular, karena itu dalam aplikasinya sel bahan bakar dapat dipergunakan untuk berbagai aplikasi, mulai dari catu daya untuk peralatan elektronik portabel hingga pembangkit listrik stasioner skala besar.

### **Aplikasi pada pembangkit listrik**

Aplikasi sel bahan bakar pada pembangkit listrik stasioner telah dibuktikan dalam sejumlah proyek percontohan menggunakan berbagai teknologi sel bahan bakar selama puluhan tahun. Pembangkit listrik tenaga sel bahan bakar Ballard dengan kapasitas 250 kW menggunakan sel bahan bakar jenis PEM berbahan bakar gas alam, saat ini telah beroperasi di sejumlah lokasi di seluruh dunia. Meskipun kapasitasnya relatif kecil dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik konvensional, tapi cukup untuk mensuplai listrik di daerah terisolasi atau untuk menyediakan cadangan listrik (UPS) untuk fasilitas penting, seperti rumah sakit.

Di Indonesia saat ini sel bahan bakar telah digunakan secara komersial sebagai penyedia listrik cadangan pada beberapa BTS (Hutchison CP Telecom "3" dan AXIS) yang tersebar di wilayah Jabotabek dan Surabaya. Suplai hidrogen pada sistem ini diperoleh dari beberapa suplier gas seperti BOC, Air Liquide, dan lain-lain yang disimpan dalam tabung gas. Di samping itu, beberapa proyek percontohan, seperti pembangkit listrik tenaga hibrida (*PV-Based hydrogen*) berkapasitas 2 kW telah terpasang di daerah Malingping-Banten. Kelebihan daya listrik yang dihasilkan fotovoltaik (PV) digunakan untuk memproduksi hidrogen menggunakan elektrolisa air, dan selanjutnya disimpan dalam tabung gas sebagai penyimpan energi listrik. Bila diperlukan hidrogen ini dikonversi kembali menjadi listrik dengan menggunakan sel bahan bakar. Sistem ini sangat cocok untuk diterapkan di Indonesia, terutama untuk penyediaan listrik di wilayah terpencil yang belum terjangkau listrik PLN.

### **Aplikasi pada transportasi**

Di beberapa kota metropolitan di seluruh dunia, transportasi darat (*road traffic*) merupakan sumber emisi (baik polutan maupun kebisingan) yang pertumbuhannya meningkat secara cepat. Sebagai contoh, Jakarta dengan jumlah kendaraan sebanyak 3,082,679 unit (1999) meningkat secara dramatis dengan tingkat pertumbuhan rata-rata sekitar 15% per tahun [5]. Untuk mengatasi permasalahan ini sistem sel bahan bakar menawarkan solusi yang tepat, karena kendaraan sel bahan bakar memiliki kebisingan yang rendah, juga menghasilkan bebas emisi (*zero emission*), dan hanya uap air sebagai gas buangnya. Saat ini sel bahan bakar telah digunakan pada kendaraan bus (komersial) di beberapa negara maju seperti Amerika dan Eropa. Sebagai contoh, XCELLSiS *Fuel Cell Engines*, Inc, telah berhasil memperkenalkan tiga bus sel bahan bakar masing-masing di Vancouver dan Chicago. Bus ini menggunakan hidrogen murni yang disimpan sebagai gas bertekanan tinggi ( $\text{GH}_2$ ); hidrogen cair ( $\text{LH}_2$ ), dan kendaraan demonstrasi lain menggunakan sistem *reformer on-board*.

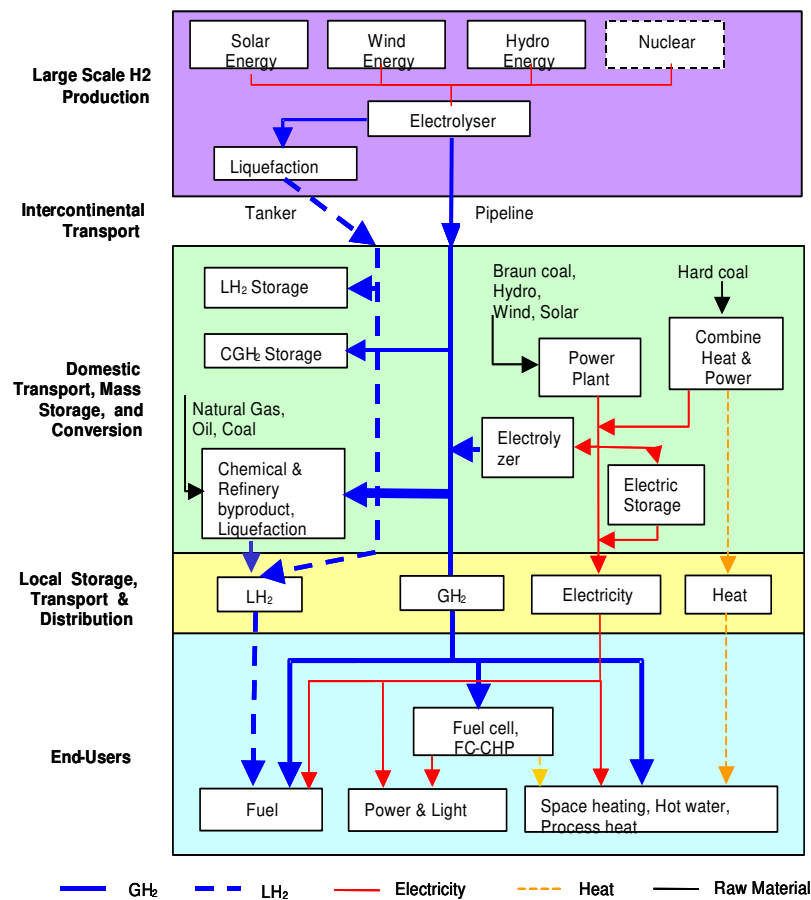
Di Indonesia saat ini aplikasi sel bahan bakar pada kendaraan ini masih dalam taraf penelitian dan pengembangan. Sebagai contoh B2TE-BPPT telah berhasil melakukan uji coba sepeda motor sel bahan bakar dengan kapasitas 500W. Suplai hidrogen disimpan dalam tabung gas tipe hidrida yang aman.

Transportasi darat mewakili pasar utama bagi produsen sel bahan bakar, karena jumlahnya yang besar di seluruh dunia. Beberapa tantangan utama yang dihadapi dalam komersialisasi aplikasi sel bahan bakar pada transportasi darat ini antara lain: ukuran harus relatif kecil, membutuhkan infrastruktur pengisian bahan bakar yang banyak, dan pemeliharaan yang mudah masyarakat luas. Selain itu, sistem ini diharapkan memiliki kinerja dan kehandalan yang tinggi, sementara harapan biaya rendah. Banyak perusahaan-perusahaan mobil utama terlibat dalam program sel bahan bakar pada otomotif di antaranya: Daimler-Chrysler, Ford, General Motors, Nissan, Mazda, Subaru, Toyota, Honda dan Hyundai. Perusahaan-perusahaan ini telah membangun prototipe kendaraan yang menggunakan sel bahan bakar dengan atau tanpa tambahan baterai, dan berbahan bakar hidrogen murni (gas atau cair) atau hibrida.

### **3. INFRASTRUKTUR HIDROGEN**

Secara konseptual, pembangunan sistem ekonomi hidrogen memerlukan infrastruktur yang terdiri dari: 1) produksi, 2) penyimpanan dan distribusi, dan 3) pengguna akhir. Gambar 3 mengilustrasikan contoh suatu infrastruktur suplai energi dengan impor energi "bersih" hidrogen. Dalam sistem ini, hidrogen diumpankan ke dalam sistem suplai dengan cara seperti seperti gas alam saat ini. Dalam kasus Jerman, hidrogen yang diperlukan akan diimpor melalui pipa gas atau  $\text{LH}_2$  *tanker* dari negara-negara tetangga, di mana hidrogen dihasilkan dari energi terbarukan yang murah.

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki potensi sumber energi terbarukan yang tersebar di luar pulau Jawa. Hidrogen dalam jumlah besar dapat diproduksi dari sumber energi terbarukan melalui proses elektrolisa air di luar pulau jawa. Selanjutnya, hidrogen (baik cair dan gas) yang kemudian disimpan dalam skala besar pada terminal penyimpanan stasioner untuk memperoleh keseimbangan musiman. Penyimpanan bawah tanah (seperti *aquifer*) dapat digunakan untuk menyimpan gas hidrogen dalam besar, dan *cryogenic tank* stasioner skala besar untuk penyimpanan hidrogen cair. Sebagian kecil hidrogen dapat diproduksi dari pembangkit listrik regional (pada saat luar beban puncak), konversi gas alam ke hidrogen (*reformer*), elektrolisa air, maupun sebagai produk samping pabrik-pabrik kimia.



Gbr. 3. Control infrastruktur ekonomi hidrogen [7]



### 3.1. Produksi Hidrogen

Karena hidrogen tidak ditemukan secara bebas (seperti gas) di alam, maka kita harus memisahkannya dari unsur-unsur lain. Kita dapat memisahkan atom hidrogen dari air, biomassa, atau molekul gas alam. Hidrogen umumnya dihasilkan oleh ekstraksi dari bahan bakar fosil hidrokarbon melalui proses kimia. Hidrogen juga dapat diekstraksi dari air melalui produksi biologis (misalnya, ganggang dan bakteri melepaskan hidrogen), dengan elektrolisa air, reduksi kimia atau dengan *thermolysis*. Hidrogen dapat diproduksi di fasilitas pusat besar atau di pabrik kecil untuk penggunaan setempat. Setiap wilayah negara (dan dunia) memiliki beberapa sumber daya yang dapat digunakan untuk membuat hidrogen.

- (1) *Steam Methane Reforming* (SMR) yang saat ini metode yang paling murah untuk menghasilkan hidrogen. Produksi hidrogen dengan reformasi adalah proses mapan dengan produksi skala besar (330.000 kg hidrogen/hari) dan fasilitas besar yang menghasilkan hidrogen pada biaya yang mendekati target DOE (USD 2,00 USD 3.00/gge) (gge adalah galon bensin setara pada dasar energi).
- (2) Elektrolisis adalah proses yang memisahkan hidrogen dari air. Hasil produksinya tidak menimbulkan emisi, namun saat ini proses yang sangat mahal. Teknologi baru sedang dikembangkan sepanjang waktu. Elektrolisis air hanya mewakili sebuah segmen pedagang pasar hidrogen. Ada dua proses elektrolisis temperatur ambien untuk menghasilkan hidrogen: 1) elektrolisis alkaline, yang terkonsentrasi menggunakan kalium hidroksida (KOH) sebagai elektrolit, dan 2) elektrolisis PEM, yang menggunakan ionomer Nafion™ sebagai elektrolit. Membran untuk elektrolisis PEM adalah serupa dengan yang digunakan dalam sel bahan bakar PEM. Elektrolisis alkaline berupa tumpukan (*stacks*) monopolar atau bipolar; sedangkan tumpukan elektrolisis PEM adalah bipolar.
- (3) Gasifikasi batubara, memecah batubara menjadi molekul yang berat molekulnya lebih kecil, biasanya dengan mengarahkannya pada suhu dan tekanan tinggi, menggunakan uap dan sejumlah oksigen terukur. Hal ini menyebabkan produksi *syngas*, suatu campuran yang utamanya terdiri dari karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H<sub>2</sub>).

BOC Gas merupakan salah satu produsen gas hidrogen di Indonesia dengan menggunakan *steam methane reforming* 1200 Nm<sup>3</sup>/h (Pulogadung 500 Nm<sup>3</sup>/h, dan Cikarang 700 Nm<sup>3</sup>/h) dan elektrolisa air 285 Nm<sup>3</sup>/h (Pulogadung 85 Nm<sup>3</sup>/h dan Ancol 200 Nm<sup>3</sup>/h). Suplai gas alam pada *plant* SMR ini diperoleh dari PT. PGN melalui pipa gas (2,5 bar). Selain itu, Air Liquide memproduksi hidrogen dengan kapasitas produksi 600 Nm<sup>3</sup>/h, yang berasal dari chlor-alkali *plant* dengan kapasitas 2000 Nm<sup>3</sup>/h (ASAHI), UIC *Plant* (850 Nm<sup>3</sup>/h), dan Pacol *plant* (1350 Nm<sup>3</sup>/h). Distribusi hidrogen pada *plant* ini umumnya menggunakan pipa gas (100 meter, 150 bar), yang dikenal sebagai *Celegon-Bojonegara Network*.

Hingga saat ini sekitar 9 juta ton ( $\approx$  9 milyar kg) hidrogen diproduksi di setiap tahunnya, dimana SMR *plant* menyumbang 80% dari hidrogen yang dihasilkan. Sisanya 20% adalah produk samping (*by-product*) dari proses kimia seperti produksi chlor-alkali. Lebih dari 95% dari perdagangan hidrogen adalah untuk aplikasi industri kimia, logam, elektronik, dan ruang angkasa.

### 3.2. Penyimpanan Hidrogen

Hidrogen memiliki kerapatan (*density*) gas terendah dan terendah kedua titik didih (*boiling point*) dari semua zat yang dikenal, menjadikannya sebuah tantangan untuk menyimpan baik dalam bentuk gas maupun cair. Dalam bentuk gas, hidrogen memerlukan volume penyimpanan yang sangat besar dan tekanan. Satu gram gas hidrogen menempati 11 liter ruangan pada tekanan atmosfer, sehingga untuk menyimpan dalam jumlah besar, gas tersebut harus ditekan hingga beberapa ratus atmosfer dan disimpan dalam suatu vessel bertekanan. Sedangkan dalam bentuk cair, hidrogen memerlukan sebuah sistem penyimpanan kriogenik. Dengan kata lain, volume tertentu mengandung hidrogen lebih sedikit energi daripada volume yang sama untuk bahan bakar lain.

Jumlah hidrogen yang diperlukan untuk sel bahan bakar beberapa fakta menunjukkan bahwa hidrogen digunakan lebih efisien daripada dibakar dalam mesin bakar internal, sehingga lebih sedikit bahan bakar yang dibutuhkan untuk mencapai hasil yang sama. Meskipun volumetrik kepadatan energi yang rendah, hidrogen memiliki rasio energi terhadap berat tertinggi dibandingkan dengan bahan bakar lain. Sayangnya, keuntungan berat ini biasanya dibayangi oleh beban tinggi tangki penyimpanan hidrogen dan peralatan yang terkait. Demikian, sebagian besar sistem penyimpanan hidrogen jauh lebih berat (*bulkier*) daripada yang digunakan untuk bahan bakar bensin atau solar. Untuk semua tujuan praktis, hidrogen dapat disimpan baik sebagai gas bertekanan tinggi ( $\text{GH}_2$ ), cair ( $\text{LH}_2$ ) dalam wadah kriogenik, atau gas terikat secara kimiawi pada logam tertentu (hidrida,  $\text{MH}_2$ ).

**Tabel 2. Klasifikasi tabung gas tekanan tinggi**

<i>Design</i>	<i>Description</i>	<i>% Metal/ Composite</i>	<i>Weight (kg) for 100 L</i>
<i>Type 1</i>	<i>A cylinder made wholly of steel or aluminum</i>	100/0	100
<i>Type 2</i>	<i>A cylinder with a metal line of steel or aluminum and a hoop-wrapped composite overwrap</i>	55/45	-
<i>Type 3</i>	<i>A cylinder with a thin metal liner of steel or aluminum and a fully wound composite overwrap</i>	20/80	65
<i>Type 4</i>	<i>A cylinder with a plastic liner and a fully wound composite overwrap</i>	0/100	30

*Note: % Load taken by metal vs. composite.*

Gas hidrogen bertekanan dapat disimpan dalam silinder gas bertekanan tinggi. Hal ini dikelompokkan berdasarkan komposisi bahan, yaitu logam dan komposit (Tabel 2) [6]. Secara umum, semakin sedikit logam yang digunakan, semakin rendah beratnya. Untuk alasan ini, tabung silinder tipe 3 biasanya digunakan dalam aplikasi hidrogen, dan tabung silinder tipe 4 kemungkinan akan memperoleh keunggulan di masa depan.

Sistem penyimpanan hidrogen cair ( $LH_2$ ) mengatasi masalah berat dan ukuran yang terkait dengan sistem penyimpanan gas bertekanan tinggi, walaupun pada temperatur kriogenik. Hidrogen cair dapat disimpan di bawah titik didih normal  $-253\text{ }^\circ\text{C}$  (20 K) pada atau mendekati tekanan ambien berdingding ganda, tangki super-isolasi (Dewar). Isolasi ini dilakukan dalam bentuk jaket vakum, mirip dalam botol termos. Tangki hidrogen cair tidak perlu sekuat tekanan tinggi tabung gas, tetapi tangki tersebut harus cukup kuat jika digunakan pada otomotif.

Sistem penyimpanan hidrida logam didasarkan pada prinsip bahwa beberapa logam mudah menyerap gas hidrogen dalam kondisi tekanan tinggi dan suhu moderat untuk membentuk hidrida logam. Hidrida logam ini melepaskan gas hidrogen ketika dipanaskan pada tekanan rendah dan suhu relatif tinggi. Pada intinya, logam menyerap dan melepaskan hidrogen seperti spons. Keuntungan dari sistem penyimpanan hidrida logam berkisar pada fakta bahwa hidrogen menjadi bagian dari struktur kimia logam itu sendiri dan karenanya tidak memerlukan tekanan tinggi atau temperatur kriogenik untuk operasi. Dengan demikian, penyimpan tipe ini paling aman dari semua metode untuk menyimpan hidrogen. Kekurangan dari penyimpanan hidrida logam adalah berat.

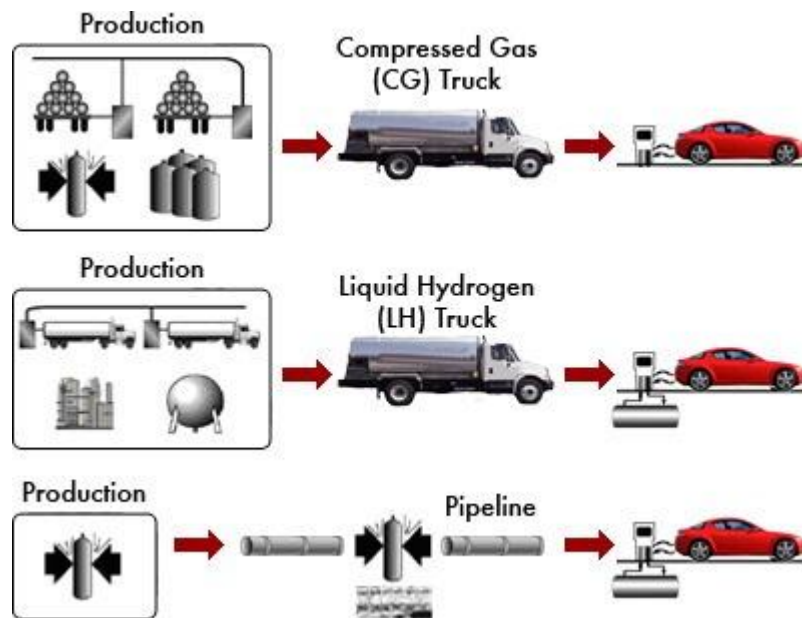
### 3.3. Distribusi Hidrogen

Masalah transportasi hidrogen berhubungan langsung dengan masalah penyimpanan hidrogen. Secara umum, untuk transportasi dan distribusi penyimpanan hidrogen bentuk kompak yang lebih ekonomis daripada bentuk-bentuk difusi. Teknologi untuk pengiriman hidrogen dalam jumlah besar telah dikembangkan dalam industri kimia. Hidrogen cair dikirimkan oleh truk atau kereta api selama jarak hingga beberapa ratus mil. Jaringan pipa gas hidrogen terkompresi (sampai panjang beberapa ratus kilometer) saat ini digunakan secara komersial untuk membawa hidrogen ke pengguna industri besar seperti kilang. Untuk sistem energi hidrogen skala besar, akan lebih murah untuk transportasi sumber energi primer (seperti gas alam atau batubara) ke pabrik hidrogen yang terletak di "gerbang kota", daripada membuat hidrogen di ladang gas atau tambang batubara dan mengirimkannya (pipa) ke pusat kota. Dalam jangka panjang, tampaknya jaringan pipa hidrogen benua tidak mungkin, kecuali ada alasan kuat untuk membuat hidrogen di lokasi tertentu yang jauh dari permintaan.

Saat ini, hidrogen tekanan tinggi dapat dikirimkan dalam *trailer* tabung gas pada tekanan hingga 200 bar. Kekurangan dari metoda ini: harga mahal dan menggunakan tabung 33 kg

untuk penyimpanan 2 kg hidrogen, dan ini tidak mahal untuk jarak lebih dari 200 mil. Peneliti sedang menginvestigasi teknologi-teknologi yang dapat mereduksi berat tabung dan mengijinkan *tube trailers* untuk beroperasi pada tekanan tinggi (hingga 600 bar), yang dapat mereduksi biaya dan pengembangan utilitas dari opsi distribusi ini.

Untuk jarak jauh, hidrogen dapat dikirimkan dalam bentuk hidrogen cair dalam suatu tanki truk kriogenik terinsulasi. Hidrogen gas dicairkan (didinginkan hingga di bawah  $-253^{\circ}\text{C}$ ) dan disimpan pada *plant* pencairan dalam tanki terinsulasi yang besar. Untuk jarak yang panjang, pengiriman via truk dapat menampung sejumlah besar hidrogen dibandingkan dengan *trailer* tabung gas. Tetapi ini mengambil energi untuk mencairkan hidrogen, yang dengan teknologi saat ini, pencairan mengkonsumsi 30% isi energi hidrogen dan ini sangat mahal.



Gbr. 4. Beberapa opsi sistem distribusi hidrogen [3]

### 3.4. Stasiun Pengisian Hidrogen

Perkembangan kendaraan hidrogen (*fuel cell* atau ICE) di masa yang akan datang memerlukan jumlah stasiun pengisian bahan bakar hidrogen (SPBH) yang memadai. Berdasarkan data 2007, jumlah SPBH hidrogen di dunia sebanyak 80 unit (Tabel 3). Data terbaru [8] menunjukkan hingga awal tahun 2009 telah dibangun lebih dari 200 unit SPBH di seluruh dunia, dan masih bertambah lagi karena sudah direncanakan pembangunannya.

**Tabel 3. Daftar SPBH di dunia tahun 2005**

<b>Negara</b>	<b>Jumlah</b>	<b>Perusahaan</b>	<b>Teknologi</b>
US	25	Air Products and Chemical; Stuart	Fasilitas GH <sub>2</sub> dan LH <sub>2</sub> ; H <sub>2</sub> dari NG
Jerman	16	Linde, BMW, Total, BP, Aral	H <sub>2</sub> dari gas alam; electrolisa
Jepang	11	Linde, Senju, Honda, Toyota	Elektrolisa; minyak, reformasi-gas
Kanada	6	Stuart energy, Hydrogenics	Elektrolisa; H <sub>2</sub> dari gas alam
Swedia	2	BP, Stuart Energy	<i>Hydro electrolysis</i>
Spanyol	2	BP, IMET	Elektrolisa, H <sub>2</sub> dari gas alam
Portugis	2	BP, Arliquido	LH <sub>2</sub> dari minyak mentah
Itali	2	AEM, SOL	Elektrolisa, LH <sub>2</sub>
Belgia	2	Messer Griesheim, Nexben	LH <sub>2</sub> dari gas alam
Australi	2	BP	GH <sub>2</sub> dari minyak, gas & solar
Norwegia	1	Norsk Hydro	Elektrolisa
Island	1	Royal Dutch Shell	Geothermal & <i>Hydro electrolysis</i>
Denmark	1	Linde	LH <sub>2</sub>
Luxemburg	1	Shell; Air Liquide	GH <sub>2</sub>
Netherlands	1	IMET; Linde	RE-based electrolysis
UK	1	BP	H <sub>2</sub> from crude oil
China	1	British Oxygen	H <sub>2</sub> from natural gas
Taiwan	1	Ztek Corp.	H <sub>2</sub> from natural gas
South Korea	1	Pressure Product Industries	GH <sub>2</sub>
Singapore	1	Air product	GH <sub>2</sub>
Total	80		

Linde AG (Jerman) mengusulkan untuk menyiapkan 40 stasiun pengisian bahan bakar hidrogen (SPBH) di sepanjang jalan tol (yang dikenal dengan "*Hidrogen Autobahn*") pada "Hari Hidrogen Internasional", di Berlin pada 24 Februari 2005. Ini memungkinkan untuk mengemudi bebas polusi antara semua kota-kota besar di Jerman. SPBH ini membentuk "cincin hidrogen," sepanjang 1800 kilometer menghubungkan Berlin, Munich, Stuttgart dan Cologne, dengan satu SPBH tiap 50 kilometer.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Untuk mendukung aplikasi sel bahan bakar dalam era ekonomi hidrogen diperlukan infrastruktur yang meliputi produksi, penyimpanan, transportasi, dan distribusi. Hidrogen dapat diproduksi dalam skala besar dan terpusat atau di pabrik kecil untuk penggunaan setempat. Dalam skala besar hidrogen dapat diproduksi melalui proses elektrolisa air dengan memanfaatkan kelebihan listrik dari suatu pembangkit listrik, misalnya tenaga air, nuklir, dan sebagainya. Dengan potensi gas alam yang cukup melimpah, Indonesia dapat memproduksi hidrogen yang ekonomis dengan menggunakan teknologi reformasi (*steam methane reforming*) baik secara terpusat dalam skala besar maupun skala kecil untuk penggunaan setempat. Hidrogen selanjutnya dapat disimpan dan didistribusikan dalam tabung gas yang dikompresi (*pressurized tank*). Untuk menjamin keselamatan (*safety*),

maka infrastruktur hidrogen di atas harus mengacu pada standar yang direkomendasikan untuk hidrogen.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bünger, U. *Brennstoffzellen für Die Kraft-Wärme-Kopplung*. L-B-Systemetechnik GmbH, Publications, 1999.
- [2] Gottesfeld. *Fuel Cells – Green Power*. [www.education.lanl.gov/resources/fuelcell](http://www.education.lanl.gov/resources/fuelcell).
- [3] Metz, S. *European Hydrogen Technology*. Linde Technology, Berichte aus Technik und Wissenschaft, July 2005.
- [4] Rosyid, O.A. *System-Analytic Safety Evaluation of the Hydrogen Cycle for Energetic Utilization*, Disertasi, O-v-G- University Magdeburg, Jerman, 2006.
- [5] Rosyid, O.A. and A. Hadianto. *Hydrogen as Alternative Fuel for Future Transportation System*. Proceeding of the 7<sup>th</sup> ISSM, Berlin, 2002.
- [6] Tzimas, E., C. Filiou, S.D. Peteves, J.B.Veyret. *Hydrogen Storage. State-of-The-Art and Future Perspective*, European Commssion, EUR 20995 EN, The Netherland, 2003.
- [7] Winter, C.J. & J. Nitsch. *Wasserstoff als Energieträger*. Spring-verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1989.
- [8] Anon. *Worldwide Hydrogen Fueling Station*, updated on 8/09, <http://www.fuelcell.org/info/charts/h2fuelingstations.pdf>.