

HIDROGEN

BAHAN BAKAR ALTERNATIF TRANSPORTASI MASA DEPAN

Penulis:

Betty Ariani

Frengki Mohamad Felayati

Moh. Arif Batutah

Kuntang Winangun



HIDROGEN

BAHAN BAKAR ALTERNATIF TRANSPORTASI MASA DEPAN

Penulis:

Betty Ariani
Frengki Mohamad Felayati
Moh. Arif Batutah
Kuntang Winangun

HIDROGEN

BAHAN BAKAR ALTERNATIF TRANSPORTASI MASA DEPAN

Penulis:

Betty Ariani

Frengki Mohamad Felayati

Moh. Arif Batutah

Kuntang Winangun

Desain Sampul & Layout:

Adimas Setiawan, S.Pd.

Halaman & Ukuran:

x + 155, 15,5 x 23 cm

ISBN:

978-623-433-221-6

Cetakan 1, April 2025

Penerbit :



KATA PENGANTAR



Hari ini, kita hidup di era yang ditandai oleh dua tantangan global yang saling berkaitan: perubahan iklim dan ketergantungan dunia terhadap energi fosil. Krisis energi, polusi udara, serta ancaman pemanasan global telah menjadi panggilan nyata bagi umat manusia untuk meninjau ulang sistem energi yang selama ini kita andalkan. Di tengah kompleksitas permasalahan ini, hidrogen muncul sebagai salah satu solusi kunci untuk mempercepat transisi menuju sistem energi

bersih dan berkelanjutan. Hidrogen bukanlah sumber energi baru. Ia telah lama dikenal dalam dunia sains dan teknologi. Namun, baru dalam beberapa dekade terakhir potensi pentingnya mulai diakui sebagai bagian dari strategi global untuk dekarbonisasi. Kemampuannya untuk menghasilkan energi tanpa emisi karbon, fleksibilitasnya dalam berbagai sektor (mulai dari transportasi, industri, hingga penyimpanan energi), serta kemungkinan produksinya dari sumber daya terbarukan menjadikan hidrogen sebagai elemen strategis dalam peta jalan energi masa depan. Di sinilah letak pentingnya buku ini.

Buku ini hadir sebagai kontribusi berharga dalam membumikan pemahaman tentang hidrogen, tidak hanya dari sisi teoritis dan teknis, tetapi juga dari sudut pandang strategis dan kebijakan. Penulis menyajikan pembahasan yang komprehensif, mulai dari prinsip dasar hidrogen, teknologi produksi dan penyimpanannya, hingga potensi pemanfaatannya dalam konteks lokal dan global. Bahasa yang digunakan tetap ilmiah namun komunikatif, memungkinkan buku ini dibaca oleh berbagai kalangan, baik akademisi, mahasiswa, profesional energi, maupun pembuat kebijakan. Apa yang membuat buku ini istimewa adalah kemampuannya menjembatani antara sains dan realitas. Penulis tidak hanya mengulas teknologi, tetapi juga memperhatikan tantangan implementasi, kesiapan infrastruktur, serta aspek lingkungan dan ekonomi dari hidrogen. Di tengah wacana transisi energi

yang terus berkembang, pendekatan semacam ini sangat dibutuhkan agar pengembangan energi baru tidak terjebak dalam euforia teknologi semata, melainkan tetap berpijak pada konteks dan kebutuhan nyata.

Saya percaya bahwa buku ini tidak hanya menjadi bahan bacaan yang informatif, tetapi juga dapat menjadi inspirasi bagi siapa saja yang bertekad mengambil bagian dalam membangun masa depan energi yang lebih bersih, aman, dan berkeadilan. Semoga buku ini membuka cakrawala baru, memperkaya diskursus energi di Indonesia, dan mendorong kolaborasi lintas sektor demi mewujudkan transformasi energi yang menyeluruh. Akhir kata, saya menyampaikan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada penulis atas dedikasi dan kerja kerasnya dalam menyusun buku ini. Semoga kehadiran buku ini menjadi langkah yang bermakna menuju perubahan besar yang kita harapkan bersama.

Selamat membaca!

Muji Setiyo

Universitas Muhammadiyah Magelang

**TERIMA KASIH KEPADA
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL (BRIN) DAN
LEMBAGA PENGELOLA DANA PENDIDIKAN (LPDP)
ATAS DUKUNGAN
MELALUI RISET INOVASI UNTUK INDONESIA MAJU (RIIM)
Batch 3
2023 – 2025**

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	viii
BAB 1 MENGENAL SIFAT FISIS DAN KIMIAWI HIDROGEN..	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Sifat Fisik dan Kimia Hidrogen	2
1.3 Tingkatan energi elektron Atom Hidrogen	3
1.4 Fase Hidrogen	5
1.5 Senyawa Hidrogen	10
1.6 Reaksi Asam Basa Hidrogen	11
1.7 Penemuan dan Penggunaan Hidrogen	12
BAB 2 TEKNOLOGI PRODUKSI HIDROGEN	17
2.1 Pendahuluan	17
2.2 Tentang Produksi Hydrogen.....	18
2.3 Metode Eksperimen Pada Produksi Hydrogen	29
2.4 Metode Industri Pada Produksi Hydrogen	34
2.5 Metode Termokimia Pada Produksi Hydrogen	37
2.6 Metode Laboratorium Pada Produksi Hidrogen	41
BAB 3 METODE PENYIMPANAN HIDROGEN.....	45
3.1 Pendahuluan	45
3.2 Penyimpanan Sistem Kompresi Gas	46
3.3 Penyimpanan Bentuk Cryogenic.....	49
3.4 Penyimpanan Bentuk Padat Logam Hidrida.....	52
3.5 Penyimpanan Metode Kimiawi.....	53
3.6 Penyimpanan Dengan Bahan Penyerap	55
3.7 Penyimpanan Dalam Gas Hidrat.....	56

BAB 4 TEKNOLOGI TRANSPORTASI HIDROGEN	59
4.1 Pendahuluan	59
4.2 Transportasi Dalam Bentuk Gas	62
4.3 Transportasi Dalam Bentuk Cair	66
4.4 Faktor Utama Dalam Transportasi Hidrogen	69
4.5 Teknologi Dan Inovasi Masa Depan	74
4.6 Studi Kasus Proyek Hidrogen	79
BAB 5 HIDROGEN SEBAGAI BAHAN BAKAR	
PEMBAKARAN DALAM.....	83
5.1 Pendahuluan.....	83
5.2 Properti Hidrogen.....	83
5.3 Hidrogen Sebagai Bahan Bakar Pilot.....	85
5.4 Penelitian Terkait Diesel Dual Fuel	87
5.5 Diesel Dual Fuel Bahan Bakar Hidrogen	91
5.6 Implementasi Hidrogen Sebagai Bahan Bakar	94
BAB 6 HIDROGEN SEBAGAI FUEL CELL	99
6.1 Pendahuluan	99
6.2 Tentang Fuel Cell	99
6.3 Jenis - Jenis Fuel Cell.....	101
6.4 Cara Kerja Fuel Cell	108
6.5 Cara Pembuatan Fuel Cell.....	111
6.6 Implementasi Full Cell Pada Kendaraan.....	113
6.7 Keuntungan & Tantangan Hidrogen sebagi Full Cell	116
6.8 Kendaraan Berbahan Bakar Full Cell	117
BAB 7 APLIKASI HIDROGEN DALAM TRANSPORTASI	121
7.1 Pendahuluan	121
7.2 Aplikasi Hidrogen Pada Transportasi Darat	122
7.3 Aplikasi Hidrogen Pada Transportasi Laut	133
7.4 Aplikasi Hidrogen Pada Transportasi Udara	135

BAB 8 HIDROGEN PERSPEKTIF SOSIAL EKONOMI	139
8.1 Pendahuluan	139
8.2 Dampak Pengembangan Hidrogen	141
8.3 Perspektif Sosial & Ekonomi Hidrogen Di Masa Depan	144
DAFTAR PUSTAKA.....	146
GLOSARIUM	150
BIOGRAFI PENULIS	155

BAB 1

MENGENAL SIFAT FISIK DAN KIMIAWI HIDROGEN

1.1 Pendahuluan

Hidrogen merupakan unsur kimia yang paling melimpah di alam semesta, menyusun sekitar 75% dari seluruh materi yang ada. Di bumi, hidrogen dapat ditemukan dalam bentuk air, senyawa organik, serta molekul lainnya, namun biasanya ia terikat dengan unsur lain seperti oksigen untuk membentuk air. Isotop hidrogen yang paling umum (simbol H) terdiri dari satu proton, satu elektron, dan tidak memiliki neutron, menjadikannya unsur yang paling ringan. Dalam kondisi standar, hidrogen berbentuk gas molekul diatomik dengan rumus H_2 . Meskipun kadang-kadang disebut dihidrogen, istilah yang lebih sering digunakan adalah gas hidrogen, hidrogen molekuler, atau cukup dengan sebutan hidrogen. Sifat fisik hidrogen adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, tidak beracun, dan sangat mudah terbakar.

Pembentukan proton hidrogen di alam semesta dimulai pada detik-detik pertama setelah Big Bang, sementara atom hidrogen netral hanya terbentuk sekitar 370.000 tahun kemudian pada masa rekombinasi, ketika alam semesta mulai mendingin dan plasma sudah cukup dingin agar elektron dapat terikat pada proton. Hidrogen, yang umumnya bukan logam kecuali di bawah tekanan ekstrem, memiliki kemampuan yang tinggi untuk membentuk ikatan kovalen dengan sebagian besar nonlogam, berkontribusi pada pembentukan berbagai senyawa seperti air dan memainkan peran penting lainnya dalam reaksi asam-basa. Reaksi ini sebagian besar melibatkan pertukaran proton di antara molekul terlarut, di mana senyawa ionik hidrogen bisa muncul sebagai anion bermuatan negatif yang disebut hidrida, atau sebagai kation bermuatan positif yang dilambangkan dengan simbol H^+ . Kation tersebut, yang terdiri dari hanya proton (simbol p), menunjukkan perilaku spesifik dalam larutan berair dan dalam senyawa ionik yang

melibatkan penyaringan muatan listriknya oleh molekul polar atau anion di sekitarnya. Posisi unik hidrogen sebagai satu-satunya atom netral dalam persamaan Schrodinger telah memungkinkan untuk diselesaikan secara langsung dan memberikan kontribusi signifikan terhadap prinsip-prinsip dasar mekanika kuantum melalui eksplorasi energi dan ikatan kimianya.

Secara historis, gas hidrogen pertama kali diproduksi secara artifisial pada awal abad ke-16 melalui reaksi asam dengan logam. Henry Cavendish, antara tahun 1766 dan 1781, mengidentifikasi gas hidrogen sebagai zat yang berbeda dan menemukan sifatnya menghasilkan air ketika dibakar, oleh karena itu namanya berasal dari bahasa Yunani "pembentuk air". Saat ini, sebagian besar produksi hidrogen terjadi melalui reformasi uap gas alam, dengan porsi yang lebih kecil berasal dari metode intensif energi seperti elektrolisis air. Penggunaan industri utamanya meliputi pemrosesan bahan bakar fosil, seperti hydrocracking, dan produksi amonia, dengan aplikasi yang muncul dalam sel bahan bakar untuk pembangkit listrik dan sebagai sumber panas. Ketika digunakan dalam sel bahan bakar, satu-satunya emisi hidrogen pada titik penggunaan adalah uap air meskipun terbakar.

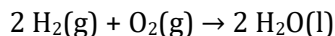
1.2 Sifat Fisik dan Kimia Hidrogen

Secara alami, hidrogen berada dalam bentuk gas. Dalam kondisi tekanan dan suhu standar, hidrogen muncul sebagai gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak memiliki rasa. Namun, ketika suhu diturunkan dan tekanan ditingkatkan, hidrogen dapat bertransformasi menjadi cairan atau padatan. Titik didih hidrogen sangat rendah, mencapai sekitar -252,8 derajat Celsius, sedangkan titik bekunya berada pada -259,16 derajat Celsius. Dengan demikian, hidrogen sering dimanfaatkan sebagai bahan pendingin dalam berbagai aplikasi yang memerlukan suhu yang sangat rendah.

Sifat kimia hidrogen atau reaktivitas hidrogen sangat tinggi dan mudah bereaksi dengan unsur lain, terutama oksigen. Reaksi antara hidrogen dan oksigen menghasilkan air, yang membutuhkan banyak energi dan digunakan sebagai sumber daya pada sel bahan bakar. H_2 tidak reaktif dibandingkan dengan unsur diatomik seperti halogen atau oksigen. Dasar termodinamika dari reaktivitas rendah ini adalah ikatan H-H yang sangat kuat, dengan energi disosiasi ikatan 435,7 kJ/mol. Dasar

kinetik dari reaktivitas rendah adalah sifat nonpolar H₂ dan polarisasinya yang lemah sehingga secara spontan bereaksi dengan klorin dan fluor untuk membentuk hidrogen klorida dan hidrogen fluorida. Reaktivitas H₂ sangat dipengaruhi oleh keberadaan katalis logam, campuran H₂ dengan O₂ atau udara mudah terbakar ketika dipanaskan hingga setidaknya 500°C oleh percikan api atau nyala api, H₂ tidak bereaksi pada suhu kamar tanpa adanya katalis.

Gas hidrogen sangat mudah terbakar:



Entalpi pembakaran adalah -286 kJ/mol.

Gas hidrogen membentuk campuran eksplosif dengan udara dalam konsentrasi 4–74% dan dengan klorin pada 5–95%. Suhu autoignition hidrogen, suhu pengapian spontan di udara adalah 500 °C.

Nyala api hidrogen-oksigen murni memancarkan sinar ultraviolet dan dengan campuran oksigen tinggi hampir tidak terlihat oleh mata telanjang, seperti yang ditunjukkan oleh gumpalan samar dari Mesin Utama Pesawat Ulang Alik, jika dibandingkan dengan gumpalan yang sangat terlihat dari Space Shuttle Solid Rocket Booster, yang menggunakan komposit amonium perklorat. Untuk mendeteksi kebocoran hidrogen yang terbakar, mungkin diperlukan detektor api, mengingat kebocoran semacam itu sangat berbahaya. Dalam kondisi lain, api hidrogen memiliki warna biru, yang mengingatkan pada api gas alam biru. Tragedi pesawat Hindenburg adalah contoh terkenal dari pembakaran hidrogen, dan penyebabnya masih menjadi bahan perdebatan. Api yang dapat dilihat dalam foto-foto tersebut adalah hasil dari senyawa karbon dalam pembakaran kulit pesawat.

1.3 Tingkatan Energi Elektron Atom Hidrogen

Tingkat energi dasar elektron dalam atom hidrogen adalah -13,6 eV, yang setara dengan foton ultraviolet dengan panjang gelombang sekitar 91 nm. Tingkat energi hidrogen dapat dihitung cukup akurat menggunakan model atom Bohr yang mengkonseptualisasikan elektron sebagai "mengorbit" proton dalam analogi dengan orbit Bumi Matahari. Namun, elektron atom dan proton disatukan oleh gaya elektromagnetik, sedangkan planet dan benda langit dipegang oleh gravitasi. Karena diskritisasi momentum sudut yang didalilkan dalam mekanika kuantum

awal oleh Bohr, elektron dalam model Bohr hanya dapat menempati jarak tertentu yang diizinkan dari proton, dan oleh karena itu hanya energi tertentu yang diizinkan.

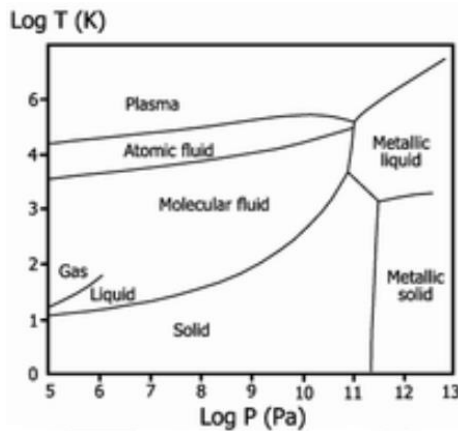
Deskripsi yang lebih akurat tentang atom hidrogen berasal dari penerapan mekanika kuantum murni, yang menggunakan persamaan Schrödinger, persamaan Dirac, atau formulasi integral jalur Feynman untuk menghitung kepadatan probabilitas elektron di sekitar proton. Pendekatan yang lebih rumit ini memungkinkan untuk mempertimbangkan efek relativitas khusus yang kecil dan polarisasi vakum. Dalam kerangka mekanika kuantum, elektron dalam atom hidrogen pada keadaan dasar tidak memiliki momentum sudut sama sekali — hal ini menggambarkan perbedaan antara "orbit planet" dan gerakan elektron.

Isomer spin hidrogen, molekul H_2 , ada dalam dua isomer spin, yaitu senyawa yang hanya berbeda dalam keadaan spin inti mereka. Dalam bentuk ortohidrogen, spin dari kedua inti sejajar, membentuk keadaan triplet spin yang memiliki total spin molekul. Sedangkan dalam bentuk parahidrogen, spin bersifat antiparalel dan membentuk keadaan singlet spin yang memiliki spin. Rasio kesetimbangan orto terhadap parahidrogen sangat bergantung pada suhu. Pada suhu kamar atau lebih tinggi, kesetimbangan gas hidrogen terdiri dari sekitar 25% bentuk para dan 75% bentuk orto. Bentuk orto adalah keadaan tereksitasi, memiliki energi yang lebih tinggi daripada bentuk para sebesar 1,455 kJ/mol, dan akan bertransisi menjadi bentuk para dalam waktu beberapa menit saat didinginkan ke suhu rendah. Sifat termal dari kedua bentuk ini berbeda karena perbedaan dalam keadaan kuantum rotasi yang diizinkan, menghasilkan karakteristik termal yang berbeda, seperti kapasitas panas.

Rasio orto-para dalam H_2 adalah faktor penting yang perlu diperhatikan dalam proses pencairan dan penyimpanan hidrogen cair. Proses konversi dari bentuk orto ke bentuk para bersifat eksotermik dan dapat menghasilkan cukup panas untuk menguapkan sebagian besar cairan, kecuali jika terlebih dahulu diubah menjadi parahidrogen selama proses pendinginan. Untuk mencegah hilangnya hidrogen cair ini, katalis yang digunakan untuk interkonversi orto-para, seperti oksida besi dan senyawa karbon aktif, diterapkan selama proses pendinginan hidrogen.

1.4 Fase Hidrogen

Fase hidrogen adalah tahap, tingkatan, masa hidrogen, semua perubahan yang terjadi berturut-turut dari sebuah proses, wujud atau rupa sebuah material. Kondisi ini bisa pula disebut fase, berikut ini adalah fase dari gas hidrogen : Gas hidrogen, hidrogen cair, slush/lumpur hidrogen, hidrogen padat, hidrogen metalik dan hidrogen plasma.



Gambar 1. Diagram Fase Hidrogen

Sumber : *Dincer, dkk (2015)*.

Kondisi suhu pada logaritmik temperatur kelvin dan logaritmik tekanan pascal, sehingga satu unit sesuai dengan perubahan $10\times$. Tepi kiri sesuai dengan 10^5 Pa, yaitu tentang tekanan atmosfer.

Fase hidrogen gas

Gas adalah salah satu dari empat keadaan dasar materi. Yang lainnya adalah padat, cair, dan plasma. Gas murni dapat terdiri dari atom individu (misalnya gas mulia seperti neon), molekul unsur yang terbuat dari satu jenis atom (misalnya oksigen), atau molekul senyawa yang terbuat dari berbagai atom (misalnya karbon dioksida). Campuran gas, seperti udara, mengandung berbagai gas murni, yang membedakan gas dari cairan dan padatan adalah pemisahan besar partikel gas individu. Keadaan materi gas terjadi antara keadaan cair dan plasma, yang terakhir memberikan batas suhu atas untuk gas. Membatasi ujung bawah skala suhu terletak gas kuantum degeneratif yang semakin mendapat perhatian. Gas atom densitas tinggi yang didinginkan hingga suhu sangat rendah diklasifikasikan berdasarkan perilaku statistiknya sebagai gas Bose atau gas Fermi.

Fase Hidrogen cair

Hidrogen cair (H_2 (l)) adalah keadaan cair dari unsur hidrogen. Hidrogen ditemukan secara alami dalam bentuk molekul H_2 . Untuk eksis sebagai cairan, H_2 harus didinginkan di bawah titik kritisnya 33 K. Namun, agar berada dalam keadaan cair sepenuhnya pada tekanan atmosfer, H_2 perlu didinginkan hingga 20,28 K (-252,87 °C; -423,17 °F). Metode umum untuk memperoleh hidrogen cair melibatkan kompresor yang menyerupai mesin jet baik dalam penampilan maupun prinsipnya. Hidrogen cair biasanya digunakan sebagai bentuk penyimpanan hidrogen terkonsentrasi. Menyimpannya sebagai cairan membutuhkan lebih sedikit ruang daripada menyimpannya sebagai gas pada suhu dan tekanan normal. Namun, kepadatan cairan sangat rendah dibandingkan dengan bahan bakar umum lainnya. Setelah dicairkan, dapat dipertahankan sebagai cairan untuk beberapa waktu dalam wadah terisolasi termal. Ada dua isomer spin hidrogen; hidrogen suhu kamar sebagian besar ortohidrogen, hidrogen cair terdiri dari 99,79% parahidrogen dan 0,21% ortohidrogen. Hidrogen membutuhkan minimum teoritis 3,3 kWh / kg untuk mencairkan, dan 3,9 kWh / kg termasuk mengubah hidrogen menjadi isomer para, tetapi praktis umumnya membutuhkan 10-13 kWh / kg dibandingkan dengan nilai kalor hidrogen 33 kWh / kg.

Fase Slush/Lumpur hidrogen

Hidrogen lumpur adalah kombinasi hidrogen cair dan hidrogen padat pada titik tripel dengan suhu yang lebih rendah dan kepadatan yang lebih tinggi daripada hidrogen cair. Hal ini biasanya dibentuk dengan mengulangi proses pembekuan-pencairan, paling mudah dilakukan dengan membawa hidrogen cair mendekati titik didihnya dan kemudian mengurangi tekanan menggunakan pompa vakum. Penurunan tekanan menyebabkan hidrogen cair menguap / mendidih - yang menghilangkan panas laten, dan akhirnya menurunkan suhu hidrogen cair. Hidrogen padat terbentuk pada permukaan cairan mendidih (antara antarmuka gas / cair) saat cairan didinginkan dan mencapai titik tripelnya. Pompa vakum dihentikan, menyebabkan peningkatan tekanan, hidrogen padat yang terbentuk di permukaan sebagian meleleh dan mulai tenggelam. Hidrogen padat diaduk dalam cairan dan prosesnya diulang. Lumpur hidrogen yang dihasilkan memiliki peningkatan kepadatan 16-20% jika dibandingkan dengan hidrogen cair. Diusulkan

sebagai bahan bakar roket sebagai pengganti hidrogen cair untuk menggunakan tangki bahan bakar yang lebih kecil dan dengan demikian mengurangi berat kering kendaraan.

Fase Hidrogen padat

Hidrogen padat adalah keadaan padat unsur hidrogen, dicapai dengan menurunkan suhu di bawah titik leleh hidrogen 14,01 K (-259,14 °C; -434,45 °F). Ini dikumpulkan untuk pertama kalinya oleh James Dewar pada tahun 1899 dan diterbitkan dengan judul "Sur la solidification de l'hydrogène" (bahasa Inggris: On the freezing of hydrogen) dalam *Annales de Chimie et de Physique*, seri ke-7, vol. 18, Oktober 1899. Hidrogen padat memiliki massa jenis 0,086 g/cm³ menjadikannya salah satu padatan dengan densitas terendah.

Molecular hidrogen padat

Pada suhu rendah dan pada tekanan hingga sekitar 400 GPa (3.900.000 atm), hidrogen membentuk serangkaian fase padat yang terbentuk dari molekul H₂ diskrit. Fase I terjadi pada suhu dan tekanan rendah, dan terdiri dari susunan heksagonal molekul H₂ yang berputar bebas. Setelah meningkatkan tekanan pada suhu rendah, transisi ke Tahap II terjadi hingga 110 GPa. Tahap II adalah struktur simetri rusak di mana molekul H₂ tidak lagi dapat berputar bebas. Jika tekanan lebih meningkat pada suhu rendah, Tahap III ditemui pada sekitar 160 GPa. Setelah meningkatkan suhu, transisi ke Fase IV terjadi pada suhu beberapa ratus kelvin pada kisaran tekanan di atas 220 GPa. Mengidentifikasi struktur atom dari fase yang berbeda dari molekul hidrogen padat sangat menantang, karena atom hidrogen berinteraksi dengan sinar-X sangat lemah dan hanya sampel kecil hidrogen padat yang dapat dicapai dalam sel landasan berlian, sehingga difraksi sinar-X memberikan informasi yang sangat terbatas tentang struktur. Namun demikian, transisi fase dapat dideteksi dengan mencari perubahan mendadak dalam spektrum sampel Raman. Selanjutnya, struktur atom dapat disimpulkan dari kombinasi spektrum Raman eksperimental dan pemodelan prinsip pertama. Perhitungan teori fungsional densitas telah digunakan untuk mencari kandidat struktur atom untuk setiap fase. Struktur kandidat ini memiliki energi bebas rendah dan spektrum Raman sesuai dengan spektrum eksperimental. Metode Quantum Monte Carlo bersama dengan perlakuan prinsip pertama efek getaran anharmonik kemudian telah digunakan untuk mendapatkan energi bebas Gibbs relatif

dari struktur ini dan karenanya untuk mendapatkan diagram fase tekanan-suhu teoretis yang sesuai dengan eksperimen. Atas dasar ini, Tahap II diyakini sebagai struktur molekul simetri $P2_1/c$; Fase III adalah (atau mirip dengan) struktur simetri $C2/c$ yang terdiri dari lapisan datar molekul dalam susunan heksagonal yang terdistorsi; dan Fase IV adalah (atau mirip dengan) struktur simetri Pc , yang terdiri dari lapisan alternatif molekul yang terikat kuat dan lembaran seperti graphene yang terikat lemah.

Fase Hidrogen metalik

Hidrogen metalik adalah fase hidrogen di mana ia berperilaku seperti konduktor listrik. Fase ini diprediksi pada tahun 1935 atas dasar teoritis oleh Eugene Wigner dan Hillard Bell Huntington.

Pada tekanan dan suhu tinggi, hidrogen metalik dapat eksis sebagai cairan parsial daripada padatan, dan para peneliti berpikir itu mungkin hadir dalam jumlah besar di interior Jupiter dan Saturnus yang panas dan terkompresi secara gravitasi, serta di beberapa planet ekstrasurya.

Pengamatan hidrogen metalik padat

Ranga Dias dan Isaac F. Silvera dari Universitas Harvard pada tahun 2016 merilis klaim bukti eksperimental bahwa hidrogen metalik padat telah disintesis di laboratorium pada tekanan sekitar 4.890.000 atm menggunakan sel landasan berlian. Naskah ini tersedia pada Oktober 2016, dan revisi diterbitkan dalam jurnal Science pada Januari 2017.

Dias dan Silvera menulis : Dengan meningkatnya tekanan, mengamati perubahan dalam sampel, berubah dari transparan, menjadi hitam, menjadi logam reflektif, yang terakhir dipelajari pada tekanan 495 Gpa, reflektansi menggunakan model elektron bebas Drude untuk menentukan frekuensi plasma 30,1 eV pada $T = 5,5$ K, dengan kerapatan pembawa elektron yang sesuai $6,7 \times 10^{23}$ partikel/cm³, konsisten dengan perkiraan teoritis. The properties are those of a metal. Solid metallic hydrogen has been produced in the laboratory. *Dias & Silvera (2016)*. Pada bulan Februari 2017, dilaporkan bahwa sampel hidrogen logam yang diklaim hilang, setelah tabung berlian yang mngenadung hidrogen logam pecah. Pada bulan Agustus 2017, Silvera dan Dias mengeluarkan erratum untuk artikel Science, mengenai nilai reflektansi yang dikoreksi karena variasi antara kerapatan optik berlian alami yang tertekan dan berlian sintetis yang digunakan dalam sel landasan berlian pra-kompresi.

Fase Hidrogen Plasma

Plasma atau zat yang dapat dibentuk adalah salah satu dari empat keadaan dasar materi (tiga lainnya adalah padat, cair, dan gas) yang ditandai dengan adanya sebagian besar partikel bermuatan dalam kombinasi ion atau elektron. Ini adalah bentuk materi biasa yang paling melimpah di alam semesta, sebagian besar di bintang-bintang (termasuk Matahari), tetapi juga mendominasi medium intrakluster dan medium intergalaksi yang dijernihkan. Plasma dapat dihasilkan secara artifisial, misalnya, dengan memanaskan gas netral atau menundukkannya ke medan elektromagnetik yang kuat.

Kehadiran partikel bermuatan menjadikan plasma memiliki sifat konduktif secara elektrik, di mana dinamika individu partikel dan gerakan plasma secara makroskopik dipengaruhi oleh medan elektromagnetik kolektif yang sangat sensitif terhadap medan yang diterapkan secara eksternal. Respons plasma terhadap medan elektromagnetik diaplikasikan dalam berbagai perangkat dan teknologi modern, seperti televisi plasma atau etsa plasma. Tergantung pada suhu dan kepadatan, sejumlah partikel netral juga dapat terdapat dalam plasma, dalam kondisi ini plasma disebut terionisasi parsial. Contoh plasma terionisasi parsial termasuk tanda-tanda neon dan kilat. Berbeda dengan transisi fase yang jelas antara tiga keadaan materi lainnya, transisi menuju plasma tidak terdefinisi secara baik dan menjadi persoalan interpretasi dan konteks. Apakah tingkat ionisasi tertentu sudah cukup untuk mengklasifikasikan suatu zat sebagai "plasma" bergantung pada fenomena spesifik yang sedang dibahas.

Plasma hidrogen merupakan keadaan materi di mana atom hidrogen terionisasi, berarti mereka mengalami kehilangan atau penambahan elektron dan menjadi partikel bermuatan. Plasma hidrogen terdiri dari elektron dan proton (inti hidrogen). Plasma hidrogen sangat reaktif dan dapat digunakan untuk proses reduksi serta penghilangan lapisan oksida dalam berbagai aplikasi teknik.

1.5 Senyawa Hidrogen

Senyawa kovalen dan organik, hidrogen (H_2) cenderung tidak reaktif pada kondisi standar dan mampu membentuk senyawa dengan sebagian besar unsur. Hidrogen dapat membentuk senyawa dengan unsur-unsur yang memiliki elektronegativitas lebih tinggi, seperti halogen (F, Cl, Br, I) atau oksigen; dalam senyawa ini, hidrogen memiliki muatan positif parsial. Ketika terikat pada unsur yang lebih elektronegatif, terutama fluor, oksigen, atau nitrogen, hidrogen juga bisa terlibat dalam pembentukan ikatan nonkovalen yang memiliki kekuatan menengah dengan unsur elektronegatif lainnya yang memiliki pasangan elektron bebas, suatu fenomena yang dikenal sebagai ikatan hidrogen yang sangat penting bagi stabilitas banyak molekul biologis. Selain itu, hidrogen juga dapat membentuk senyawa dengan unsur-unsur yang memiliki elektronegativitas lebih rendah, seperti logam dan metaloid, di mana ia mengambil muatan negatif parsial. Senyawa ini seringkali disebut sebagai hidrida.

Hidrogen membentuk berbagai senyawa dengan karbon yang dikenal sebagai hidrokarbon, dan bahkan ada rangkaian yang lebih luas dengan heteroatom yang, karena hubungan umum mereka dengan kehidupan, disebut sebagai senyawa organik. Penelitian mengenai sifat-sifat mereka disebut sebagai kimia organik, sedangkan studi yang dilakukan dalam konteks organisme hidup dikenal sebagai biokimia. Beberapa definisi menyebutkan bahwa senyawa "organik" hanya perlu mengandung karbon. Namun, mayoritas dari senyawa ini juga mengandung hidrogen, dan mengingat ikatan karbon-hidrogen yang memberikan karakteristik kimia khusus pada kelas senyawa ini, ikatan karbon-hidrogen diperlukan dalam beberapa definisi mengenai istilah "organik" dalam dunia kimia. Terdapat jutaan hidrokarbon yang diketahui, dan umumnya terbentuk melalui jalur yang kompleks dan jarang melibatkan unsur hidrogen. Hidrogen larut dengan sangat baik dalam banyak logam tanah, namun jarang larut dalam logam nanokristalin dan amorf. Tingkat kelarutan hidrogen di dalam logam dipengaruhi oleh distorsi lokal atau keberadaan pengotor dalam kisi kristal.

Sifat-sifat ini dapat berguna ketika hidrogen dimurnikan melalui jalur cakram paladium yang dipanaskan, namun tingginya kelarutan gas menjadi masalah dalam bidang metalurgi, yang berkontribusi pada perapuhan banyak logam, serta mempersulit desain sistem pipa dan tangki penyimpanan.

Senyawa hidrogen sering disebut hidrida, istilah yang digunakan cukup longgar. Istilah "hidrida" menunjukkan bahwa atom H telah memperoleh karakter negatif atau anionik, dilambangkan H^- , dan digunakan ketika hidrogen membentuk senyawa dengan unsur yang lebih elektropositif. Keberadaan anion hidrida, yang disarankan oleh Gilbert N. Lewis pada tahun 1916 untuk hidrida mirip garam golongan 1 dan 2, ditunjukkan oleh Moers pada tahun 1920 dengan elektrolisis litium hidrida cair (LiH), menghasilkan jumlah hidrogen stoikiometri di anoda. Untuk hidrida selain logam golongan 1 dan 2, istilah ini cukup menyesatkan, mengingat elektronegativitas hidrogen yang rendah. Pengecualian dalam hidrida golongan 2 adalah BeH_2 , yang bersifat polimer. Dalam litium aluminium hidrida, anion $[AlH_4]^-$ membawa pusat hidridik yang melekat erat pada $Al(III)$.

Hidrida dapat terbentuk dari hampir semua unsur golongan utama, dan variasi dalam jumlah serta kombinasi senyawa yang mungkin sangatlah besar. Contohnya, terdapat lebih dari 100 hidrida borana biner yang diketahui, sementara hanya satu hidrida aluminium biner yang teridentifikasi. Meskipun terdapat kompleks yang lebih besar, hidrida indium biner belum berhasil ditemukan. Dalam dunia kimia anorganik, hidrida juga berperan sebagai ligan penghubung yang mengaitkan dua pusat logam dalam kompleks koordinasi. Peran ini sangat umum ditemukan pada unsur golongan 13, terutama pada boran (boron hidrida) dan kompleks aluminium, serta pada karboran yang berkerumun.

1.6 Reaksi Asam Basa Hidrogen

Oksidasi hidrogen menghilangkan elektronnya dan menghasilkan H^+ , yang tidak mengandung elektron dan inti yang biasanya terdiri dari satu proton. Itulah sebabnya H^+ sering disebut proton, spesies ini sangat penting untuk diskusi asam. Pada teori asam-basa Brønsted-Lowry, asam adalah donor proton, sedangkan basa adalah akseptor proton.

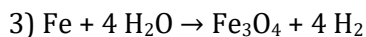
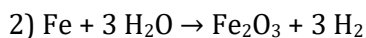
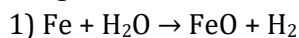
Sebuah proton yang bebas, H^+ , tidak dapat ada dalam larutan atau dalam kristal ionik karena ketertarikan yang sangat kuat terhadap atom atau molekul lain yang memiliki elektron. Kecuali pada suhu tinggi yang berkaitan dengan plasma, proton tersebut tidak dapat dipisahkan dari awan elektron pada atom dan molekul, dan akan tetap terikat padanya. Meski demikian, istilah 'proton' kadang-kadang digunakan dengan sembarangan dan secara kiasan untuk menggambarkan hidrogen bermuatan positif atau kation yang terikat pada spesies lain dengan cara tersebut, sehingga dilambangkan " H^+ " tanpa menyiratkan bahwa proton tunggal ada secara bebas sebagai spesies. Untuk menghindari kesan dari "proton terlarut" dalam larutan, larutan asam kadang-kadang dianggap mengandung spesies fiktif yang disebut "ion hidronium" ($[H_3O]^+$). Namun, bahkan dalam keadaan ini, kation hidrogen terlarut sekaligus lebih realistis dipahami sebagai terorganisir dalam kelompok yang membentuk spesies yang lebih mendekati $[H_9O_4]^+$. Ion oksonium lainnya juga ditemukan ketika air berada dalam larutan asam bersama pelarut lain. Salah satu ion yang paling umum di alam semesta adalah ion H^{+3} , yang dikenal sebagai hidrogen molekuler terprotonasi atau kation trihidrogen.

1.7 Penemuan dan Penggunaan Hidrogen

Pada tahun 1671, ilmuwan Irlandia Robert Boyle menemukan dan mendeskripsikan reaksi antara besi yang terkorosi dan asam encer, menghasilkan gas hidrogen. Namun, setiap kali gas berbau busuk ini muncul, ia sangat mudah terbakar. Ketika lilin menyala mendekatinya, gas tersebut dapat terbakar dengan mudah, menghasilkan nyala api yang suram dan sedikit kehijauan di mulut biola untuk beberapa saat. Meskipun cahaya yang dihasilkan sangat minim, kekuatannya ternyata lebih dari yang bisa dibayangkan. *Robert Boyle, Tracts written by the Honourable Robert Boyle containing new experiments, touching the relation betwixt flame and air.* Kata "belerang" mungkin agak membingungkan, terutama karena Boyle melakukan percobaan serupa dengan zat besi dan asam sulfat. Namun, kemungkinan besar, "belerang" di sini harus dipahami sebagai mudah terbakar.

Pada tahun 1766, Henry Cavendish adalah orang pertama yang mengenali gas hidrogen sebagai zat yang terpisah, dan menamakan gas tersebut "udara yang mudah terbakar" yang berasal dari reaksi logam dengan asam. Ia berspekulasi bahwa "udara yang mudah terbakar" adalah identik dengan zat hipotetis yang dikenal sebagai "phlogiston", dan kemudian pada tahun 1781, ia menemukan bahwa gas tersebut menghasilkan air ketika dibakar. Cavendish umumnya diakui sebagai penemu hidrogen sebagai unsur.

Di tahun 1783, Antoine Lavoisier mengidentifikasi unsur yang kemudian dikenal sebagai hidrogen, ketika ia dan Laplace mengulangi penemuan Cavendish mengenai produksi air dari pembakaran hidrogen. Lavoisier menghasilkan hidrogen untuk eksperimennya tentang konservasi massa dengan mereaksikan fluks uap dengan besi logam menggunakan tabung besi pijar yang dipanaskan di dalam api. Proses oksidasi anaerob besi oleh proton air pada suhu tinggi dapat secara skematis digambarkan melalui rangkaian reaksi berikut:



Banyak logam seperti zirkonium mengalami reaksi serupa dengan air yang mengarah ke produksi hidrogen.

Pada abad 19 François Isaac de Rivaz membangun mesin de Rivaz pertama, mesin pembakaran internal yang ditenagai oleh campuran hidrogen dan oksigen pada tahun 1806. Edward Daniel Clarke menemukan blowpipe gas hidrogen pada tahun 1819. Lampu dan pusat perhatian Döbereiner ditemukan pada tahun 1823. Hidrogen dicairkan untuk pertama kalinya oleh James Dewar pada tahun 1898 dengan menggunakan pendinginan regeneratif dan penemuannya, labu vakum. Ia memproduksi hidrogen padat pada tahun berikutnya.

Pada tahun 1783 Balon yang berisi hidrogen pertama kali ditemukan oleh Jacques Charles. Hidrogen memberikan daya angkat untuk perjalanan udara yang dapat diandalkan setelah penemuan pesawat pengangkat hidrogen pertama oleh Henri Giffard pada tahun 1852. Pangeran Jerman Ferdinand von Zeppelin mempromosikan ide kapal udara kaku yang digerakkan oleh hidrogen, yang kemudian dikenal sebagai Zeppelin; yang pertama kali melakukan penerbangan perdananya pada tahun 1900. Penerbangan terjadwal reguler dimulai

pada tahun 1910, dan dengan pecahnya Perang Dunia I pada bulan Agustus 1914, telah membawa 35.000 penumpang tanpa insiden serius. Kapal udara yang digerakkan hidrogen digunakan sebagai platform observasi dan pembom selama perang. Penyeberangan transatlantik non-stop pertama dilakukan oleh pesawat Inggris R34 pada tahun 1919. Layanan penumpang reguler dilanjutkan pada tahun 1920-an, dan penemuan cadangan helium di Amerika Serikat menjanjikan peningkatan keamanan; namun, pemerintah AS menolak untuk menjual gas itu untuk keperluan ini. Oleh karena itu, H₂ digunakan dalam pesawat Hindenburg, yang mengalami kebakaran di atas New Jersey pada 6 Mei 1937. Insiden ini disiarkan langsung di radio dan difilmkan. Kebocoran hidrogen yang terbakar secara luas dianggap sebagai penyebab insiden, tetapi penyelidikan menunjukkan bahwa penyalan terjadi akibat lapisan kain aluminized yang terpengaruh oleh listrik statis. Namun, kerusakan reputasi hidrogen sebagai gas pengangkat telah terjadi, dan perjalanan pesawat hidrogen komersial pun dihentikan. Meskipun demikian, hidrogen masih digunakan, lebih disukai meskipun lebih berbahaya, sebagai gas pengangkat untuk balon cuaca.

Kemudian pada tahun 1937 Turbogenerator berpendingin hidrogen pertama mulai beroperasi dengan gas hidrogen sebagai pendingin di rotor dan stator di Dayton, Ohio, oleh Dayton Power & Light Co.; [82] karena konduktivitas termal dan viskositas gas hidrogen yang sangat rendah, sehingga hambatan lebih rendah daripada udara, ini adalah jenis yang paling umum di bidangnya saat ini untuk generator besar (biasanya 60 MW dan lebih besar; generator yang lebih kecil biasanya berpendingin udara).

Pada tahun 1977 Baterai nikel-hidrogen pertama kali digunakan di satelit teknologi Navigasi Angkatan Laut AS-2 (NTS-2). Selain itu, Stasiun Luar Angkasa Internasional, Mars Odyssey, dan Mars Global Surveyor juga dilengkapi dengan baterai nikel-hidrogen. Di bagian gelap orbitnya, Teleskop Luar Angkasa Hubble mendapatkan dukungan dari baterai nikel-hidrogen, yang akhirnya diganti pada Mei 2009, setelah lebih dari 19 tahun sejak peluncuran dan 13 tahun melewati masa desainnya.

Karena struktur atomnya yang sederhana, hanya terdiri dari proton dan elektron, atom hidrogen, bersama dengan spektrum cahaya yang dihasilkan darinya atau diserap olehnya, telah menjadi pusat

pengembangan teori struktur atom. Selanjutnya, studi tentang kesederhanaan yang sesuai dari molekul hidrogen dan kation yang sesuai H^{+2} membawa pemahaman tentang sifat ikatan kimia, yang diikuti tak lama setelah perlakuan mekanika kuantum atom hidrogen telah dikembangkan pada pertengahan 1920-an. Salah satu efek kuantum pertama yang diamati secara eksplisit, meskipun belum dipahami pada saat itu, adalah pengamatan yang dilakukan oleh Maxwell terkait hidrogen, setengah abad sebelum teori mekanika kuantum yang sepenuhnya dikembangkan muncul. Maxwell mencatat bahwa kapasitas panas spesifik H_2 secara aneh menyimpang dari perilaku gas diatomik pada suhu kamar, dan seiring penurunan suhu menuju suhu kriogenik, ia mulai semakin menyerupai gas monatomik. Berdasarkan teori kuantum, fenomena ini disebabkan oleh jarak tingkat energi rotasi (yang terkuantisasi), yang memiliki rentang luas dalam H_2 akibat massa atomnya yang rendah. Rentang energi yang luas ini membatasi kemampuan untuk membagi energi panas secara merata menjadi gerakan rotasi hidrogen pada suhu rendah. Gas diatomik yang terdiri dari atom yang lebih berat tidak memiliki rentang energi yang sama dan tidak menunjukkan efek serupa. Antihidrogen ($\bar{H}$) merupakan pasangan antimateri untuk hidrogen, terdiri dari antiproton dan positron. Antihidrogen adalah satu-satunya jenis atom antimateri yang telah berhasil diproduksi pada tahun 2015.

Hidrogen, sebagai atom H, adalah unsur kimia paling melimpah di alam semesta, membentuk 75 persen materi normal berdasarkan massa dan lebih dari 90 persen jumlah atom. (Sebagian besar massa alam semesta, bagaimanapun, tidak dalam bentuk materi jenis unsur kimia, melainkan didalilkan terjadi sebagai bentuk massa yang belum terdeteksi seperti materi gelap dan energi gelap). Di seluruh alam semesta, hidrogen sebagian besar berada dalam bentuk atom dan plasma, yang memiliki sifat yang sangat berbeda dibandingkan dengan hidrogen molekuler. Dalam bentuk plasma, elektron dan proton hidrogen tidak terikat satu sama lain, menghasilkan konduktivitas listrik yang sangat tinggi serta emisivitas yang tinggi (yang menghasilkan cahaya dari Matahari dan bintang-bintang lainnya). Partikel bermuatan ini sangat dipengaruhi oleh medan magnet dan listrik. Sebagai contoh, dalam angin matahari, mereka berinteraksi dengan magnetosfer Bumi yang mengakibatkan terbentuknya arus Birkeland dan aurora. Hidrogen juga dapat ditemukan

dalam keadaan atom netral di lingkungan antarbintang, karena jaranganya tabrakan dan penggabungan antaratom. Keberadaan atom-atom ini merupakan sumber dari garis hidrogen 21 cm pada frekuensi 1420 MHz yang terdeteksi untuk menyelidiki hidrogen primordial. Diperkirakan, jumlah besar hidrogen netral yang ada dalam sistem Lyman-alpha yang teredam mendominasi kepadatan barionik kosmologis alam semesta hingga pergeseran merah $z = 4$. Dalam kondisi biasa di Bumi, unsur hidrogen terdapat sebagai gas diatomik, H_2 . Gas hidrogen sangat langka di atmosfer Bumi (sekitar 0,53 ppm secara molar) karena bobotnya yang ringan, yang memungkinkan ia keluar dari atmosfer dengan lebih cepat dibandingkan gas yang lebih berat. Namun, hidrogen merupakan unsur yang paling melimpah ketiga di permukaan Bumi, sebagian besar terdapat dalam bentuk senyawa kimia seperti hidrokarbon dan air.

Bentuk molekul yang disebut hidrogen molekuler terprotonasi (H^+3) ditemukan di medium antarbintang, di mana ia dihasilkan oleh ionisasi hidrogen molekuler dari sinar kosmik. Ion ini juga telah diamati di atmosfer atas planet Jupiter. Ion ini relatif stabil di lingkungan luar angkasa karena suhu dan kepadatannya yang rendah. H^+3 adalah salah satu ion paling melimpah di alam semesta, dan memainkan peran penting dalam kimia medium antarbintang. Hidrogen triatomik netral H_3 hanya dapat eksis dalam bentuk tereksitasi dan tidak stabil. Sebaliknya, ion molekul hidrogen positif (H^+2) adalah molekul langka di alam semesta.

BAB 2

TEKNOLOGI PRODUKSI HIDROGEN

2.1 Pendahuluan

Pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah menegaskan bahwa hidrogen merupakan pembawa energi yang sangat fleksibel dan unggul. Protokol Kyoto merekomendasikan peningkatan penggunaan hidrogen sebagai sumber energi bersih dan terbarukan. Gas hidrogen dihasilkan melalui berbagai metode di industri, dengan kurang dari 1% produksinya berasal dari sumber rendah karbon. Bahan bakar fosil menjadi sumber utama hidrogen, contohnya melalui proses reformasi uap gas alam. Metode lain dalam produksi hidrogen meliputi gasifikasi biomassa dan pirolisis metana. Pirolisis metana dan elektrolisis air dapat memanfaatkan sumber listrik apapun, termasuk energi terbarukan. Sementara itu, hidrogen bawah tanah diekstraksi. Produksi hidrogen memiliki peran penting dalam masyarakat industri, karena hidrogen dibutuhkan dalam banyak proses kimia. Pada tahun 2020, sekitar 87 juta ton hidrogen diproduksi di seluruh dunia untuk berbagai keperluan, seperti dalam penyulingan minyak, proses produksi amonia melalui metode Haber, dan produksi metanol melalui penurunan karbon monoksida.

Molekul hidrogen ditemukan di Kola Superdeep Borehole. Meskipun tidak jelas berapa banyak hidrogen molekuler yang tersedia di reservoir alami, setidaknya ada satu perusahaan yang mengkhususkan diri dalam pengeboran sumur untuk mengekstrak hidrogen. Sebagian besar hidrogen yang terdapat di litosfer terikat pada oksigen dalam air. Untuk memproduksi unsur hidrogen, dibutuhkan pembawa hidrogen seperti bahan bakar fosil atau air.

Pembawa metana mengkonsumsi sumber daya fosil dan menghasilkan gas rumah kaca karbon dioksida melalui proses steam methane reforming (SMR). Namun, dalam proses pirolisis metana yang lebih baru, tidak ada karbon dioksida yang dihasilkan. Proses ini umumnya tidak memerlukan input energi tambahan di luar penggunaan bahan bakar fosil.

2.2 Tentang Produksi Hidrogen

Hidrogen dihasilkan melalui proses elektrolisis air dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti tenaga angin dan tenaga surya, yang dikenal sebagai hidrogen hijau. Apabila hidrogen itu berasal dari gas alam melalui metode pirolisis metana tanpa emisi rumah kaca, maka disebut sebagai hidrogen pirus. Sementara itu, jika hidrogen dihasilkan dari bahan bakar fosil dengan emisi gas rumah kaca, umumnya ia disebut sebagai hidrogen abu-abu. Hidrogen yang diperoleh dengan menangkap sebagian besar emisi karbon dioksida dikenal sebagai hidrogen biru. Sementara itu, hidrogen yang dihasilkan dari batubara dapat disebut sebagai hidrogen coklat atau hitam. Pada tahun 2020, langkah penyerapan karbon belum digunakan secara komersial. Hidrogen sering kali dirujuk dengan berbagai warna untuk mencerminkan asal usulnya, yang mungkin disebabkan oleh warna abu-abu yang melambangkan "hidrogen kotor".

Tabel 2.1 Warna yang mengacu pada metode produksi

Warna		Sumber Produksi	Keterangan
Hijau		Sebagian besar definisi, listrik terbarukan melalui elektrolisis air. Definisi hidrogen hijau termasuk hidrogen yang dihasilkan dari sumber emisi yang rendah seperti biomassa.	
Pirus		Pemisahan termal metana	Melalui pyrolysis metana
Biru		Hidrokarbon dengan penangkapan dan penyimpanan karbon	Diperlukan jaringan CCS
Abu		Hidrokarbon fosil, terutama reformasi uap gas alam	
Coklat atau hitam		Hidrokarbon Fosil: Coklat (lignit) atau batubara hitam	Melalui gasifikasi batubara atau dalam reaktor yang sesuai; membutuhkan pengurangan

Merah, pink atau ungu	Tenaga nuklir	Melalui pemisahan air termokimia, eletrolisis air, atau mensubstitusi uap untuk reformasi gas alam
Kuning	Kadang-kadang dipahami sebagai fotovoltaiik surya	Melalui photovoltaic
<u>Emas</u> <u>atau</u> <u>putih</u>	Hidrogen yang terjadi secara alami jauh di dalam kerak bumi	Diperoleh dengan menambangan; juga disebut sebagai putih

Sumber : Langins, Janis (1983)., Heremans, et al. (2017).

Beberapa metode untuk memproduksi hidrogen yaitu : *Steam reforming* – abu-abu atau biru, pemidahan air, Elektrolisis air – hijau, pink atau kuning, Hidrogen produk sampingan dari proses kimia

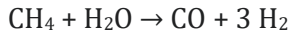
Metode *steam reforming* – abu-abu atau biru

Hidrogen diproduksi secara industri melalui proses steam reforming (SMR), yang memanfaatkan gas alam sebagai bahan baku utama. Energi yang terkandung dalam hidrogen yang dihasilkan adalah sekitar 74% dari energi yang terdapat dalam bahan bakar asli, karena terdapat kehilangan energi dalam bentuk kelebihan panas selama proses produksi. Secara umum, steam reforming menghasilkan emisi karbon dioksida, yang merupakan gas rumah kaca, dan oleh karena itu hidrogen yang dihasilkan dikenal sebagai hidrogen abu-abu. Namun, jika karbon dioksida tersebut ditangkap dan disimpan, produk hidrogen yang dihasilkan akan disebut hidrogen biru.

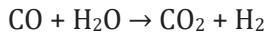
Steam methane reforming (SMR) menghasilkan hidrogen dari gas alam, yang sebagian besar terdiri dari metana (CH_4) dan air. Proses ini merupakan sumber hidrogen industri yang paling ekonomis, menyuplai hampir 50% kebutuhan hidrogen di seluruh dunia. Proses tersebut melibatkan pemanasan gas antara suhu 700 hingga 1100 °C dalam keadaan uap dengan menggunakan katalis nikel. Reaksi endotermik yang terjadi menghasilkan karbon monoksida dan hidrogen molekuler (H_2). Dalam reaksi pergeseran air-gas, karbon monoksida bereaksi dengan uap untuk mendapatkan jumlah H_2 lebih lanjut. WGSR juga membutuhkan katalis, biasanya di atas oksida besi atau oksida lainnya. Produk sampingannya adalah CO_2 . Tergantung pada kualitas bahan baku (gas

alam, nafta, dll.), Satu ton hidrogen yang dihasilkan juga akan menghasilkan 9 hingga 12 ton CO₂, gas rumah kaca yang dapat ditangkap.

Untuk proses ini, uap suhu tinggi (H₂O) bereaksi dengan metana (CH₄) dalam reaksi endotermik untuk menghasilkan syngas.



Pada tahap kedua, hidrogen tambahan dihasilkan melalui suhu rendah, eksotermik, reaksi pergeseran air-gas, dilakukan pada sekitar 360 ° C:



Pada dasarnya, atom oksigen (O) dilucuti dari air tambahan (uap) untuk mengoksidasi CO menjadi CO₂. Oksidasi ini juga menyediakan energi untuk mempertahankan reaksi. Panas tambahan yang diperlukan untuk mendorong proses umumnya dipasok dengan membakar beberapa bagian dari metana.

Metode elektrolisis air – hijau, pink atau kuning

Metode untuk menghasilkan hidrogen tanpa menggunakan bahan bakar fosil melibatkan proses pemisahan air, atau pemisahan molekul air (H₂O) menjadi komponen oksigen dan hidrogen. Ketika sumber energi untuk pemisahan air terbarukan atau rendah karbon, hidrogen yang dihasilkan kadang-kadang disebut sebagai hidrogen hijau. Konversi dapat dicapai dengan beberapa cara, tetapi semua metode saat ini dianggap lebih mahal daripada metode produksi berbasis bahan bakar fosil. Hidrogen dapat dibuat melalui elektrolisis tekanan tinggi, elektrolisis tekanan rendah air, atau berbagai proses elektrokimia lain yang muncul seperti elektrolisis suhu tinggi atau elektrolisis berbantuan karbon. Namun, proses terbaik saat ini untuk elektrolisis air memiliki efisiensi listrik yang efektif sebesar 70-80%, sehingga menghasilkan 1 kg hidrogen (yang memiliki energi spesifik 143 MJ/kg atau sekitar 40 kWh/kg). Ini membuat proses elektrolisis cukup kompetitif. Hanya sekitar 2% dari total produksi hidrogen berasal dari elektrolisis, dengan konsumsi 50 hingga 55 kilowatt-jam listrik per kilogram hidrogen.

Elektrolisis air memanfaatkan listrik untuk memisahkan air menjadi hidrogen dan oksigen. Pada tahun 2020, kurang dari 0,1% dari total produksi hidrogen dihasilkan melalui proses elektrolisis air. Proses ini memiliki efisiensi antara 70-80% (dengan kehilangan konversi 20-30%), sedangkan reformasi uap gas alam memiliki efisiensi termal yang bervariasi antara 70 hingga 85%. Diperkirakan bahwa efisiensi listrik

dari elektrolisis akan mencapai 82-86% sebelum tahun 2030, sambil tetap mempertahankan daya tahan karena perkembangan yang terus terjadi dalam bidang ini.

Elektrolisis air beroperasi pada rentang suhu 50 - 80 °C, sementara reformasi metana uap memerlukan suhu antara 700 - 1100 °C. Perbedaan mendasar antara kedua metode ini terletak pada jenis energi primer yang digunakan; listrik untuk elektrolisis dan gas alam untuk reformasi metana uap. Dengan memperhatikan penggunaan air, sumber daya yang tersedia, elektrolisis dan metode pemisahan air lainnya kini menarik perhatian komunitas ilmiah. Dalam upaya menurunkan biaya produksi hidrogen, sumber energi terbarukan menjadi target untuk mendukung proses elektrolisis. Ada tiga jenis utama sel elektrolitik, yaitu sel elektroliser oksida padat (SOEC), sel membran elektrolit polimer (PEM), dan sel elektrolisis alkali (AEC). Secara tradisional, elektroliser alkali memiliki biaya investasi yang lebih rendah (umumnya menggunakan katalis nikel), tetapi kurang efisien; sementara elektroliser PEM, di sisi lain, memerlukan biaya yang lebih tinggi (umumnya menggunakan katalis logam golongan platinum yang mahal) tetapi lebih efisien dan mampu beroperasi pada kepadatan arus yang lebih tinggi, sehingga mungkin lebih ekonomis jika produksi hidrogen dilakukan dalam skala besar.

Sel elektrolisis PEM biasanya beroperasi di bawah 100 °C. Sel-sel ini memiliki keuntungan karena relatif sederhana dan dapat dirancang untuk menerima input tegangan yang sangat bervariasi, yang membuatnya ideal untuk digunakan dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya fotovoltaik. AEC beroperasi secara optimal pada konsentrasi elektrolit tinggi (KOH atau kalium karbonat) dan pada suhu tinggi, seringkali mendekati 200 °C.

Metode Hasil Produk Sampingan industri dan efficiency

Efisiensi generator hidrogen modern diukur berdasarkan energi yang dikonsumsi per volume standar hidrogen (MJ/m³), dengan mempertimbangkan suhu dan tekanan standar H₂. Semakin rendah energi yang digunakan oleh generator, semakin tinggi tingkat efisiensinya; elektroliser yang memiliki efisiensi 100% akan menghabiskan 39,4 kilowatt-jam per kilogram (142 MJ/kg) hidrogen, atau 12749 joule per liter (12,75 MJ/m³). Dalam praktiknya, elektrolisis biasanya menggunakan elektroliser berputar, di mana gaya sentrifugal

membantu dalam memisahkan gelembung gas dari air. Elektroliser tersebut, pada tekanan 15 bar, dapat mengkonsumsi 50 kilowatt-jam per kilogram (180 MJ/kg), ditambah lagi 15 kilowatt-jam (54 MJ) jika hidrogen tersebut dikompresi untuk digunakan dalam kendaraan hidrogen.

Konvensionalya, elektrolisis alkali memiliki efisiensi sekitar 70%, tetapi tersedia elektroliser air alkali canggih dengan efisiensi hingga 82%. Menghitung penggunaan nilai panas yang lebih tinggi (karena inefisiensi melalui panas dapat dialihkan kembali ke sistem untuk menciptakan uap yang diperlukan oleh katalis), efisiensi kerja rata-rata untuk elektrolisis PEM berkisar sekitar 80%, atau 82% dengan menggunakan elektroliser alkali modern paling mutakhir. Diperkirakan bahwa efisiensi PEM akan meningkat menjadi sekitar 86% sebelum tahun 2030, sementara efisiensi teoritis untuk elektroliser PEM diprediksi mencapai hingga 94%.

Dalam konteks produksi hidrogen industri, dan dengan menggunakan proses terbaik saat ini untuk elektrolisis air (PEM atau elektrolisis alkali) yang memiliki efisiensi listrik efektif antara 70-82%, untuk memproduksi 1 kg hidrogen (yang memiliki energi spesifik 143 MJ/kg atau sekitar 40 kWh/kg) membutuhkan sekitar 50-55 kWh listrik.

Energi termodinamika yang diperlukan untuk mendapatkan hidrogen melalui elektrolisis diterjemahkan menjadi 33 kWh/kg, angka yang lebih tinggi dibandingkan dengan reformasi uap yang mengandalkan penangkapan karbon dan juga lebih tinggi dari pirolisis metana. Salah satu keuntungan dari elektrolisis dibandingkan dengan produksi hidrogen melalui reformasi metana uap (SMR) adalah bahwa hidrogen dapat diproduksi secara lokal, sehingga proses pengiriman yang mahal melalui truk atau pipa dapat dihindari.

Metode Elektrolisis melalui proses kimia

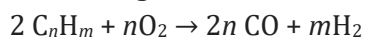
Selain mengurangi tegangan yang diperlukan untuk elektrolisis dengan meningkatkan suhu sel elektrolisis, juga memungkinkan untuk mengkonsumsi oksigen yang dihasilkan dalam elektroliser secara elektrokimia dengan menambahkan bahan bakar (seperti karbon/batubara, metanol, etanol, asam format, gliserol, dll.) ke sisi oksigen reaktor. Hal ini mengurangi kebutuhan energi listrik dan berpotensi menurunkan biaya hidrogen hingga kurang dari 40 ~ 60% dengan sisa energi yang disediakan dengan cara ini. Elektrolisis air

berbantuan karbon/hidrokarbon (CAWE) berpotensi menawarkan metode yang kurang intensif energi, lebih bersih dalam memanfaatkan energi kimia dari berbagai sumber karbon, seperti batubara dengan kandungan belerang rendah dan tinggi, biomassa, alkohol, dan metana (Gas Alam), di mana CO₂ murni yang dihasilkan dapat dengan mudah diasingkan tanpa memerlukan proses pemisahan.

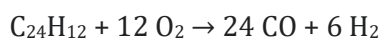
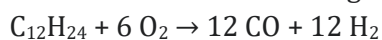
Metode Hidrogen by produk dari proses kimia

Produksi industri klorin dan soda kaustik melalui elektrolisis menghasilkan sejumlah besar hidrogen sebagai byproduk. Di pelabuhan Antwerpen, pembangkit listrik sel bahan bakar demonstrasi 1MW dioperasikan menggunakan produk sampingan tersebut. Unit ini telah berfungsi sejak akhir tahun 2011. Kelebihan hidrogen sering dikelola dengan metode analisis cubitan hidrogen. Gas yang dihasilkan dari oven kokas dalam proses produksi baja mirip dengan Syngas, dengan volume hidrogen mencapai 60%. Hidrogen dapat diekstraksi secara ekonomis dari gas oven kokas. Untuk memproduksi hidrogen dari gas alam dan hidrokarbon yang lebih berat, dilakukan dengan oksidasi parsial. Dalam proses ini, campuran bahan bakar-udara atau bahan bakar-oksigen dibakar sebagian, sehingga menghasilkan syngas yang kaya akan hidrogen dan karbon monoksida. Selanjutnya, lebih banyak hidrogen dan karbon dioksida dapat diperoleh dari karbon monoksida (dan air) melalui reaksi pergeseran air-gas.

Reaksi oksidasi parsial terjadi ketika campuran bahan bakar-udara substoikiometri atau bahan bakar-oksigen sebagian dibakar dalam reaktor oksidasi reformator atau parsial. Perbedaan dibuat antara oksidasi parsial termal (TPOX) dan oksidasi parsial katalitik (CPOX). Reaksi kimia mengambil bentuk umum:



Contoh ideal untuk memanaskan minyak dan batubara, dengan asumsi komposisi C₁₂H₂₄ dan C₂₄H₁₂ masing-masing, adalah sebagai berikut:



Hidrogen yang dihasilkan dari produk sampingan dari proses kimia diantaranya seperti *plasma pyrolysis*, *batubara*, *petroleum coke*, *depleted oil wells*, *radiolysis* dan *thermolysis*, *pyrolysis on biomass*, *nuclear-assisted thermolysis*, *pyrolysis on biomass*, *nuclear-assisted thermolysis*, *thermochemical cycle*, *photobiological water splitting*, *photocatalytic*

water splitting, biohydrogen routes, dan fermentative hydrogen production.

Adapun penjelasan dari masing – masing proses kimia tersebut adalah sebagai berikut :

Plasma pirolisis

Proses Kavaener atau Kvaerner karbon hitam dan proses hidrogen (CB&H) adalah metode pirolisis plasma, yang dikembangkan pada 1980-an oleh perusahaan Norwegia dengan nama yang sama, untuk produksi hidrogen dan karbon hitam dari hidrokarbon cair (C_nH_m). Dari energi pakan yang tersedia, sekitar 48% terkandung dalam hidrogen, 40% terkandung dalam karbon aktif dan 10% dalam uap super panas. CO_2 tidak diproduksi dalam proses. Variasi dari proses ini disajikan pada tahun 2009 menggunakan teknologi pembuangan limbah busur plasma untuk produksi hidrogen, panas dan karbon dari metana dan gas alam dalam konverter plasma.

Batubara

Produksi hidrogen dari batubara dilaksanakan melalui proses gasifikasi batubara. Proses ini memanfaatkan uap dan oksigen untuk memecah ikatan molekul dalam batubara sehingga membentuk campuran gas yang terdiri dari hidrogen dan karbon monoksida. Sebagai tambahan, karbon dioksida serta polutan lainnya dapat lebih mudah dihilangkan dari gas yang dihasilkan melalui gasifikasi batubara dibandingkan dengan metode pembakaran batubara. Selain itu, terdapat metode lain untuk konversi, yaitu karbonisasi batubara yang dilakukan pada suhu rendah dan suhu tinggi. Gas oven kokas yang dihasilkan dari pirolisis, yaitu pemanasan batubara tanpa adanya oksigen, mengandung sekitar 60% hidrogen, sementara sisanya terdiri dari metana, karbon monoksida, karbon dioksida, amonia, nitrogen molekuler, dan hidrogen sulfida (H_2S). Untuk memisahkan hidrogen dari kontaminan lainnya, dapat digunakan proses adsorpsi ayunan tekanan. Beberapa perusahaan baja di Jepang telah menerapkan metode ini untuk memproduksi hidrogen.

Petroleum coke

Kokas minyak bumi juga dapat dikonversi menjadi syngas kaya hidrogen melalui gasifikasi batubara. Syngas yang dihasilkan terutama terdiri dari hidrogen, karbon monoksida dan H₂S dari sulfur dalam umpan kokas. Gasifikasi adalah pilihan untuk memproduksi hidrogen dari hampir semua sumber karbon.

Depleted oil wells

Menyuntikkan mikroba yang tepat ke dalam sumur minyak yang sudah habis memberikan kesempatan untuk mengekstrak hidrogen dari minyak yang masih tersisa dan tidak dapat dipulihkan. Dengan mikroba sebagai satu-satunya input, biaya produksi menjadi rendah. Selain itu, metode ini juga menghasilkan gas CO yang terkonsentrasi, yang pada dasarnya dapat ditangkap.

Radiolysis dan Thermolysis

Radiasi nuklir mampu memutus ikatan air melalui proses radiolisis. Di tambang emas Mponeng di Afrika Selatan, peneliti menemukan keberadaan bakteri di area dengan tingkat radiasi tinggi yang terjadi secara alami. Komunitas bakteri ini didominasi oleh filotipe baru *Desulfotomaculum*, yang mengonsumsi hidrogen yang dihasilkan secara radiolitik. Air dapat terdisosiasi secara spontan pada suhu sekitar 2500 °C, namun proses termolisis ini tidak dapat dilakukan pada suhu tinggi tersebut dengan menggunakan perpipaan dan peralatan proses biasa, sehingga potensi komersialisasinya menjadi cenderung rendah.

Pyrolysis on biomass

Pirolisis Dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori berdasarkan suhu pirolisis, yakni pirolisis lambat pada suhu rendah, pirolisis cepat pada suhu sedang, dan pirolisis flash pada suhu tinggi. Energi utama berasal dari energi matahari, didukung oleh mikroorganisme fotosintesis yang berfungsi menguraikan air atau biomassa untuk menghasilkan hidrogen. Meskipun demikian, proses ini menghasilkan hidrogen dalam jumlah yang relatif rendah dan memiliki biaya operasional yang tinggi. Oleh karena itu, metode ini tidak dianggap sebagai solusi yang viable untuk industri.

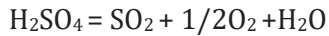
Nuclear-assisted thermolysis

Reaktor berpendingin gas suhu tinggi (HTGR) adalah salah satu teknik nuklir bebas CO₂ yang paling menjanjikan untuk menghasilkan hidrogen dengan memisahkan air dalam skala besar. Dalam metode ini,

siklus termo-kimia yodium-sulfur (IS) untuk memisahkan air dan elektrolisis uap suhu tinggi (HTSE- high-temperature steam electrolysis) dipilih sebagai proses utama untuk produksi hidrogen nuklir. Siklus S-I mengikuti tiga reaksi kimia:



Sulfuric acid decomposition:



Tingkat produksi hidrogen HTGR dengan siklus IS sekitar 0,68 kg/s.

Siklus termokimia

Siklus Termokimia menggabungkan sumber panas (termo) dengan reaksi kimia untuk memisahkan air menjadi komponen hidrogen dan oksigennya. Istilah "siklus" digunakan karena, selain air, hidrogen, dan oksigen, senyawa kimia yang terlibat dalam proses ini terus didaur ulang. Jika sebagian listrik digunakan sebagai input, siklus termokimia yang terbentuk didefinisikan sebagai siklus hibrida. Siklus sulfur-yodium (siklus S-I) merupakan proses siklus termokimia yang menghasilkan hidrogen dari air dengan efisiensi sekitar 50%. Sulfur dan yodium yang digunakan dalam proses ini dapat dipulihkan dan digunakan kembali, sehingga tidak dikonsumsi dalam proses. Siklus ini dapat dilakukan dengan sumber suhu yang sangat tinggi, sekitar 950 °C, seperti melalui sistem tenaga surya terkonsentrasi (CSP) dan dianggap sangat cocok untuk produksi hidrogen oleh reaktor nuklir suhu tinggi, yang sedang dipelajari di reaktor uji teknik suhu tinggi di Jepang. Ada siklus hibrida lain yang memanfaatkan suhu tinggi dan sejumlah listrik, seperti siklus Tembaga-klorin, yang diklasifikasikan sebagai siklus termokimia hibrida karena menggunakan reaksi elektrokimia dalam salah satu langkah reaksi, beroperasi pada suhu 530 °C dan memiliki efisiensi 43 persen.

Photobiological dan photocatalytic melalui pemisahan air

Hidrogen biologis dapat dihasilkan melalui bioreaktor alga. Penemuan ini menunjukkan bahwa ketika ganggang mengalami kekurangan belerang, ia akan beralih dari proses fotosintesis normal yang menghasilkan oksigen menjadi produksi hidrogen. Saat ini, proses produksi ini tampaknya sudah layak secara ekonomi dengan melampaui batas efisiensi energi sebesar 7-10 persen dalam konversi sinar matahari menjadi hidrogen, dengan tingkat produksi hidrogen mencapai 10-12 ml

per liter kultur per jam. iologis dapat diproduksi dalam bioreaktor alga. Pada akhir 1990-an ditemukan bahwa jika ganggang kekurangan belerang, ia akan beralih dari produksi oksigen, yaitu fotosintesis normal, ke produksi hidrogen. Tampaknya produksi sekarang layak secara ekonomi dengan melampaui penghalang efisiensi energi 7-10 persen (konversi sinar matahari menjadi hidrogen). dengan tingkat produksi hidrogen 10-12 ml per liter kultur per jam. Konversi Energi matahari dapat diubah menjadi hidrogen melalui proses pemisahan air, yang merupakan salah satu cara paling menarik untuk mencapai sistem energi bersih dan terbarukan. Apabila proses ini dibantu oleh fotokatalis yang secara langsung tersuspensi dalam air, bukan menggunakan fotovoltaiik dan sistem elektrolitik, maka reaksinya bisa berlangsung dalam satu langkah, sehingga dapat meningkatkan efisiensinya. Namun, sistem yang ada saat ini masih memiliki kinerja yang rendah untuk digunakan secara komersial.

Biohydrogen routes

Biomassa dan aliran limbah pada prinsipnya dapat diubah menjadi biohidrogen dengan gasifikasi biomassa, reformasi uap, atau konversi biologis seperti elektrolisis biokatalisis atau produksi hidrogen fermentatif. Di antara berbagai metode produksi hidrogen, pendekatan biologis menunjukkan potensi yang lebih rendah dalam hal kebutuhan energi. Selain itu, limbah beragam dan bahan bernilai rendah, seperti biomassa pertanian, dapat dimanfaatkan sebagai sumber terbarukan untuk menghasilkan hidrogen melalui proses biokimia atau termokimia. Namun, saat ini sebagian besar hidrogen masih diproduksi dari sumber bahan bakar fosil, terutama gas alam yang merupakan sumber daya yang tidak terbarukan. Hidrogen tidak hanya merupakan bahan bakar yang sangat bersih, tetapi juga digunakan secara luas dalam berbagai industri, termasuk pupuk, petrokimia, dan makanan. Proses biokimia dalam produksi hidrogen dibedakan menjadi dua jenis, yaitu fermentasi gelap dan fermentasi foto. Dalam fermentasi gelap, karbohidrat diubah menjadi hidrogen oleh mikroorganisme penghasil fermentasi, termasuk bakteri anaerob dan anaerob fakultatif yang ketat. Secara teoritis, proses ini dapat menghasilkan maksimum 4 mol H₂ per mol glukosa. Selama proses tersebut, gula juga dapat diubah menjadi asam lemak volatil (VFA) dan alkohol sebagai produk sampingan. Sementara itu, bakteri yang melakukan fermentasi foto memiliki kemampuan untuk menghasilkan

hidrogen dari VFA. Oleh karena itu, metabolit yang terbentuk dalam fermentasi gelap dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam proses fermentasi foto, sehingga meningkatkan total hasil produksi hidrogen.

Fermentative hydrogen production

Produksi Proses fermentasi hidrogenik mengubah substrat organik menjadi hidrogen, didorong oleh berbagai kelompok bakteri. Berbeda dengan fermentasi gelap, fotofermentasi hanya dapat terjadi di hadapan cahaya. Misalnya, *Rhodobacter sphaeroides* SH_2C dapat digunakan dalam fotofermentasi untuk mengubah beberapa asam lemak menjadi hidrogen. Produksi hidrogen melalui fermentasi dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti biofotolisis langsung oleh alga hijau, biofotolisis tidak langsung oleh sianobakteri, fotofermentasi oleh bakteri fotosintetik anaerob, dan fermentasi gelap oleh bakteri fermentasi anaerob. Sebagai contoh, penelitian mengenai produksi hidrogen menggunakan *H. salinarium*, sebuah bakteri fotosintetik anaerob, yang dipadukan dengan donor hidrogenase seperti *E.*, telah dilaporkan dalam literatur. Selain itu, *Enterobacter aerogenes* juga dikenal sebagai produsen hidrogen lainnya.

Metode hidrogen generasi enzimatik

Metode ini terdiri atas beberapa proses antara lain :

Elektrolisis biokatalisis

Selain fermentasi gelap, elektrohidrogenesis—yang merupakan proses elektrolisis menggunakan mikroba—merupakan salah satu alternatif yang menarik. Dalam teknologi sel bahan bakar mikroba, air limbah atau tanaman dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik. Penting untuk tidak mengonfusikan elektrolisis biokatalitik dengan produksi hidrogen biologis; yang terakhir hanya melibatkan penggunaan ganggang, di mana ganggang tersebut langsung memproduksi hidrogen. Sebaliknya, dalam proses elektrolisis biokatalitik, hidrogen dihasilkan setelah melewati sel bahan bakar mikroba, di mana berbagai jenis tanaman air dapat dimanfaatkan, termasuk buluh sweetgrass, cordgrass, beras, tomat, lupin, dan ganggang.

Catalytic Carbon – Hydrogen On Demand

CC-HOD (*Catalytic Carbon – Hydrogen On Demand*) adalah proses ini melibatkan suhu rendah di mana karbon dan aluminium direndam dan dipanaskan hingga sekitar 80 °C, yang memicu reaksi kimia dan menghasilkan hidrogen. Hidrogen juga ditemukan secara alami di bawah

tanah. Sumber hidrogen alami ini, yang sering disebut sebagai hidrogen putih atau hidrogen emas, dapat diekstraksi dari sumur dengan metode yang serupa dengan pengambilan bahan bakar fosil seperti minyak dan gas alam. Hidrogen putih dapat ditemukan atau diproduksi dalam jumlah besar di *Mid-continental Rift System*, menjadikannya sumber yang potensial untuk ekonomi hidrogen terbarukan. Selain itu, air dapat dipompa ke dalam batuan kaya besi yang panas untuk menghasilkan hidrogen, yang kemudian dapat diekstraksi.

2.3 Metode Eksperimen Pada Produksi Hidrogen

Methane pyrolysis – turquoise

Pirolisis metana (gas alam) melalui proses satu langkah, yang melibatkan pengaliran metana melalui katalis logam cair, merupakan pendekatan yang ramah lingkungan untuk menghasilkan hidrogen tanpa emisi gas rumah kaca. Metode ini telah diuji dalam kondisi laboratorium sejak tahun 2017 dan kini sedang diujicobakan pada skala yang lebih besar. Proses ini berlangsung pada suhu tinggi, yakni sekitar 1065 °C, dan untuk memproduksi 1 kg hidrogen diperlukan sekitar 18 kWh listrik untuk pemanasan. Pirolisis metana dapat dinyatakan dengan persamaan reaksi berikut.



Karbon padat kualitas industri dapat dijual sebagai bahan baku manufaktur atau ditimbun (tidak ada polusi).

Biological produksi

Produksi hidrogen fermentatif merujuk pada proses konversi substrat organik menjadi biohidrogen melalui fermentasi, yang dilakukan oleh berbagai kelompok bakteri dengan sistem enzim multipel. Proses ini terdiri dari tiga langkah yang serupa dengan konversi anaerob. Keunikan dari reaksi fermentasi gelap adalah bahwa ia tidak memerlukan cahaya, memungkinkan produksi hidrogen secara terus-menerus dari senyawa organik, baik siang maupun malam.

Di sisi lain, fotofermentasi memerlukan keberadaan cahaya untuk berlangsung. Sebagai contoh, *Rhodobacter sphaeroides* SH₂C dapat digunakan dalam fotofermentasi untuk mengubah asam lemak kecil menjadi hidrogen. Sementara itu, elektrohidrogenesis dilakukan dalam sel bahan bakar mikroba, di mana hidrogen dihasilkan dari bahan organik

(seperti limbah atau bahan padat) dengan penerapan tegangan antara 0,2 hingga 0,8 V.

Produksi hidrogen biologis juga dapat dilakukan dalam bioreaktor yang menggunakan alga. Dalam kondisi kekurangan belerang, alga akan beralih dari produksi oksigen melalui fotosintesis normal ke produksi hidrogen. Selain alga, bahan baku lain yang umum digunakan dalam bioreaktor adalah aliran limbah. Proses ini melibatkan bakteri yang mengurai hidrokarbon dan menghasilkan hidrogen serta CO₂. Metode pemisahan CO₂ dapat diterapkan untuk memperoleh gas hidrogen dengan sukses. Pada tahun 2006-2007 telah di demonstrasikan prototipe bioreaktor hidrogen yang memanfaatkan limbah sebagai bahan baku di pabrik jus anggur Welch di North East, Pennsylvania, AS. Selain kemungkinan produksi hidrogen biologis yang menjanjikan, banyak tantangan menjadi ciri teknologi ini. Tantangan pertama termasuk yang intrinsik untuk H₂, seperti penyimpanan dan transportasi gas nonkondensasi eksplosif. Selain itu, organisme penghasil hidrogen diracuni oleh O₂ dan hasil H₂ seringkali rendah.



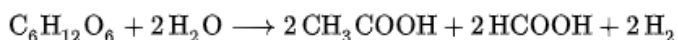
Gambar 2.1 Proses produksi hidrogen mikroba.

Reaksi utama yang mendorong pembentukan hidrogen melibatkan oksidasi substrat untuk mendapatkan elektron. Kemudian, elektron ini ditransfer ke proton bebas untuk membentuk molekul hidrogen. Reaksi reduksi proton ini biasanya dilakukan oleh keluarga enzim yang dikenal sebagai hidrogenase. Pada organisme heterotrofik, elektron diproduksi selama fermentasi gula. Gas hidrogen diproduksi dalam berbagai jenis fermentasi sebagai cara untuk meregenerasi NAD⁺ dari NADH. Elektron ditransfer ke ferredoxin, atau dapat langsung diterima dari NADH oleh

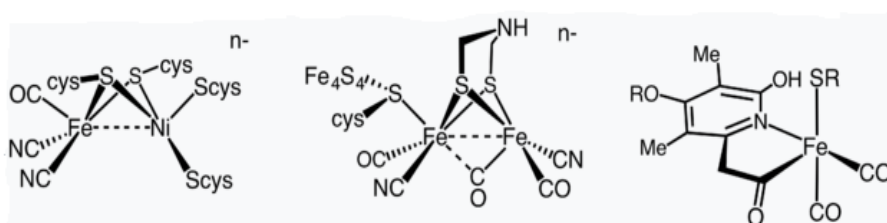
hydrogenase, menghasilkan H₂. Karena ini sebagian besar reaksi dimulai dengan glukosa, yang diubah menjadi asam asetat.



Reaksi terkait menghasilkan format, bukan karbon dioksida :



Reaksi-reaksi ini adalah eksergonik oleh 216 dan 209 kkal / mol, masing-masing, diperkirakan bahwa 99% dari semua organisme memanfaatkan atau menghasilkan dihidrogen (H₂). Sebagian besar spesies ini adalah mikroba dan kemampuan mereka untuk menggunakan atau menghasilkan H₂ sebagai metabolit muncul dari ekspresi metaloenzim H₂ yang dikenal sebagai hydrogenase. Enzim dalam keluarga yang sangat beragam ini umumnya diklasifikasikan menjadi tiga jenis yang berbeda berdasarkan kandungan logam situs aktif: [FeFe]-hidrogenase (besi-besi), hydrogenase [NiFe]-hidrogenase (nikel-besi), dan [Fe]-hidrogenase (hanya besi). Banyak organisme mengekspresikan enzim ini. Contoh penting adalah anggota genera Clostridium, Desulfovibrio, Ralstonia atau patogen Helicobacter, yang sebagian besar dari mereka ketat-anaerob atau mikroorganisme fakultatif. Mikroorganisme lain seperti ganggang hijau juga mengekspresikan hydrogenase yang sangat aktif, seperti halnya anggota genera Chlamydomonas.



Gambar 2.2 Struktur situs aktif dari tiga jenis enzim hydrogenase.

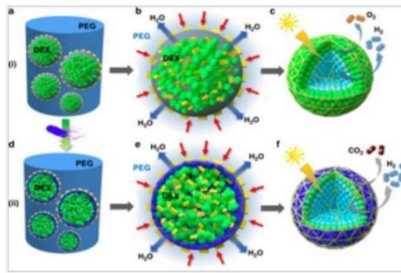
Sumber :

Karena keragaman enzim hydrogenase yang ekstrem, upaya yang sedang berlangsung difokuskan pada skrining enzim baru dengan fitur yang ditingkatkan, serta rekayasa hydrogenase yang sudah dikarakterisasi untuk memberi mereka karakteristik yang lebih diinginkan.

Produksi oleh algae

Produksi pemisahan air fotobiologis yang berbasis pada penggunaan hidrogen biologis dari alga dilakukan dalam fotobioreaktor tertutup, dengan fokus pada produksi hidrogen sebagai bahan bakar matahari. Alga, dalam kondisi tertentu, mampu menghasilkan hidrogen. Penelitian yang dilakukan pada tahun 2000 menunjukkan bahwa ketika alga *C. reinhardtii* kekurangan belerang, proses produksinya beralih dari menghasilkan oksigen, seperti yang terjadi dalam fotosintesis normal, menjadi memproduksi hidrogen.

Ganggang hijau memiliki kemampuan untuk mengekspresikan enzim hidrogenase [FeFe], yang dianggap sebagai salah satu hidrogenase paling efisien, dengan tingkat turnover yang mencapai lebih dari 10000 per detik. Meski kinerja katalitiknya sangat mengesankan, efisiensinya dapat terhambat oleh sensitivitasnya yang tinggi terhadap oksigen, yang mampu menonaktifkan enzim tersebut secara ireversibel. Ketika sel-sel kekurangan belerang, evolusi oksigen terhenti akibat kerusakan pada fotosistem II. Dalam kondisi ini, sel-sel mulai mengonsumsi O_2 , menciptakan lingkungan anaerob yang ideal bagi hidrogenase [FeFe] untuk mengkatalisis produksi hidrogen. Fotosintesis yang dilakukan oleh cyanobacteria dan ganggang hijau, air dipecah menjadi ion hidrogen dan elektron. Elektron ini kemudian diangkut melalui feridoksin. Enzim Fe-Fe-hidrogenase bertugas menggabungkan elektron tersebut menjadi gas hidrogen. Pada *Chlamydomonas reinhardtii*, fotosistem II berkontribusi pada konversi langsung sinar matahari, menghasilkan sekitar 80% elektron yang akhirnya diubah menjadi gas hidrogen. Pada tahun 2020, para ilmuwan melaporkan pengembangan mikro-emulsi berbasis sel alga untuk reaktor mikroba sferoid multiseluler yang mampu menghasilkan hidrogen bersama oksigen atau CO_2 melalui fotosintesis di siang hari di bawah udara. Melampirkan mikroreaktor dengan bakteri sinergis terbukti meningkatkan tingkat produksi hidrogen melalui pengurangan konsentrasi O_2 . Laporan terkini untuk biohidrogen berbasis ganggang, dibutuhkan sekitar 25.000 kilometer persegi pertanian alga untuk menghasilkan biohidrogen setara dengan energi yang disediakan oleh bensin di AS saja. Area ini mewakili sekitar 10% dari area yang dikhususkan untuk menanam kedelai di AS



Gambar 2.3 Bioreaktor berbasis sel alga yang dapat menghasilkan hidrogen

Beberapa hal terkait Bioreactor antara lain :

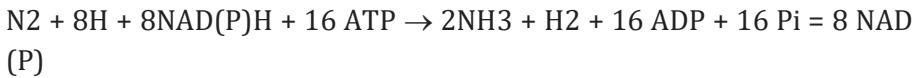
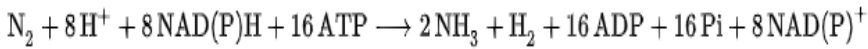
- Pembatasan produksi hidrogen fotosintesis dengan akumulasi gradien proton.
- Penghambatan kompetitif produksi hidrogen fotosintesis oleh karbon dioksida.
- Persyaratan untuk pengikatan bikarbonat pada fotosistem II (PSII) untuk aktivitas fotosintesis yang efisien.
- Drainase elektron yang kompetitif oleh oksigen dalam produksi hidrogen alga.
- Ekonomi harus mencapai harga yang kompetitif untuk sumber energi lain dan ekonomi tergantung pada beberapa parameter.
- Kendala teknis utama adalah efisiensi dalam mengubah energi matahari menjadi energi kimia yang tersimpan dalam molekul hidrogen.

Upaya sedang berlangsung untuk memecahkan masalah ini melalui bioteknologi.

Produksi dengan cyanobacteria

Produksi hidrogen secara biologis juga terjadi pada cyanobacteria pengikat nitrogen. Mikroorganisme ini mampu tumbuh membentuk filamen. Dalam kondisi dengan ketersediaan nitrogen terbatas, beberapa sel dalam koloni tersebut dapat beradaptasi dan mengkhususkan diri menjadi heterokista. Struktur ini menciptakan ruang intraseluler anaerob, yang memfasilitasi proses fiksasi N_2 oleh enzim nitrogenase yang juga diekspresikan di dalamnya. Dalam kondisi fiksasi nitrogen, enzim nitrogenase menerima elektron dan mengkonsumsi ATP untuk memutus ikatan triple dinitrogen dan

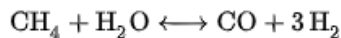
mengurangnya menjadi amonia. Selama siklus katalitik enzim nitrogenase, hidrogen molekuler juga diproduksi.



Namun, karena produksi H_2 dapat menyebabkan kehilangan energi yang signifikan bagi sel, sebagian besar cyanobacteria pengikat nitrogen memiliki setidaknya satu jenis hidrogenase serapan. Hidrogenase ini memiliki preferensi katalitik terhadap oksidasi oksigen, yang memungkinkan mereka untuk mengasimilasi H_2 yang dihasilkan. Dengan cara ini, cyanobacteria dapat memulihkan sebagian energi yang telah diinvestasikan selama proses fiksasi nitrogen.

2.4 Metode Industri Pada Produksi Hidrogen

Beberapa persaingan untuk biohidrogen, setidaknya untuk aplikasi komersial, banyak proses industri yang matang. Steam reforming gas alam - kadang-kadang disebut sebagai steam methane reforming (SMR) - adalah metode yang paling umum untuk menghasilkan hidrogen massal sekitar 95% dari produksi dunia.



Selain elektrolisis biasa, elektrolisis menggunakan mikroba adalah kemungkinan lain. Dengan elektrolisis biokatalisis, hidrogen dihasilkan setelah berjalan melalui sel bahan bakar mikroba dan berbagai tanaman air dapat digunakan. Ini termasuk buluh sweetgrass, cordgrass, beras, tomat, lupin, dan ganggang

Electrolysis tekanan tinggi

Elektrolisis tekanan tinggi merupakan proses di mana air (H_2O) terurai menjadi oksigen (O_2) dan gas hidrogen (H_2) melalui arus listrik yang dialirkan ke dalamnya. Berbeda dengan elektrolyzer konvensional, hasil dari proses ini adalah hidrogen yang terkompresi dalam rentang tekanan sekitar 120-200 bar. Dengan menerapkan proses kompresi kimia dalam elektroliser, kebutuhan akan kompresor hidrogen eksternal dapat dihilangkan. Rata-rata, konsumsi energi untuk kompresi internal hanya sekitar 3%. Salah satu pabrik produksi hidrogen terbesar di Eropa,

yang memproduksi sekitar 1.400.000 kg per tahun menggunakan teknologi elektrolisis air tekanan tinggi dan metode alkali, berlokasi di Kokkola, Finlandia.

Electrolysis suhu tinggi

Energi Hidrogen dapat dihasilkan melalui elektrolisis suhu tinggi (HTE), di mana energi disuplai dalam bentuk panas dan listrik. Dengan sebagian energi dalam proses HTE berupa panas, jumlah energi yang perlu diubah menjadi lebih sedikit, yakni hanya melalui dua tahap (dari panas ke listrik, dan kemudian ke bentuk kimia). Hal ini berpotensi mengurangi total energi yang diperlukan per kilogram hidrogen yang dihasilkan.

Selain itu, listrik dari energi nuklir dapat dimanfaatkan untuk proses elektrolisis, sementara panas yang dihasilkan oleh reaktor nuklir bisa langsung digunakan untuk memisahkan hidrogen dari air. Reaktor nuklir yang beroperasi pada suhu tinggi (950-1000 °C) dan menggunakan gas sebagai pendingin mampu memisahkan hidrogen dari air melalui metode termokimia dengan memanfaatkan energi panas nuklir. Penelitian lebih lanjut mengenai reaktor nuklir suhu tinggi dapat membuka peluang untuk menghasilkan hidrogen dengan biaya yang lebih kompetitif dibandingkan dengan reformasi uap gas alam.

General Atomics memperkirakan bahwa hidrogen yang dihasilkan di High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) menunjukkan potensi yang menjanjikan. Meskipun elektrolisis suhu tinggi telah dibuktikan di laboratorium dengan penggunaan energi thermal sebesar 108 MJ per kilogram hidrogen yang dihasilkan, proses ini belum diterapkan pada skala komersial. Selain itu, produknya adalah hidrogen berkualitas rendah yang tidak sesuai untuk digunakan dalam sel bahan bakar.

Photoelectro kimia melalui pemisahan air

Menggunakan listrik yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik merupakan salah satu metode terbersih untuk memproduksi hidrogen. Proses ini melibatkan elektrolisis, di mana air dipecah menjadi hidrogen dan oksigen, dalam apa yang dikenal sebagai proses sel fotoelektrokimia (PEC), atau lebih populer sebagai fotosintesis buatan. Pada tahun 1983, William Ayers dari *Energy Conversion Devices* berhasil mendemonstrasikan dan mematenkan sistem fotoelektrokimia generasi

pertama dengan efisiensi tinggi yang dapat memisahkan air secara langsung.

Sistem yang diperkenalkan oleh Ayers ini dikenal sebagai "daun buatan" atau "pemisahan air surya nirkabel," menggunakan lembaran multijunction silikon amorf tipis dan biaya rendah yang direndam langsung dalam air. Dalam proses ini, hidrogen terbentuk di permukaan silikon amorf yang dilapisi dengan berbagai katalis, sementara oksigen dihasilkan dari substrat logam di belakangnya. Untuk memfasilitasi transportasi ion, digunakan membran Nafion di atas sel multi-junction. Paten tersebut juga mencakup berbagai bahan semikonduktor multijunction lainnya untuk pemisahan air langsung, selain paduan silikon dan silikon germanium amorf. Penelitian terus dilakukan di universitas serta industri fotovoltaik untuk mengembangkan teknologi sel multijunction yang lebih efisien. Jika proses ini dipadukan dengan fotokatalis yang terdispersi dalam air, daripada menggunakan sistem fotovoltaik dan elektrolitik, seluruh reaksi dapat dilakukan dalam satu langkah, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensinya.

Produksi melalui photo electrocatalytic

Sebuah metode yang dikembangkan oleh Thomas Nann dan timnya di Universitas East Anglia melibatkan penggunaan elektroda emas yang dilapisi dengan nanopartikel indium fosfida (InP). Dalam pengaturan ini, mereka memasukkan kompleks besi-belerang yang, ketika terendam dalam air dan diterangi dengan cahaya di bawah arus listrik yang kecil, dapat menghasilkan hidrogen dengan efisiensi mencapai 60%.

Pada tahun 2015, Panasonic Corp melaporkan bahwa mereka telah menciptakan fotokatalis berbasis niobium nitrida yang mampu menyerap hingga 57% dari sinar matahari. Teknologi ini mendukung proses dekomposisi air untuk menghasilkan gas hidrogen. Perusahaan tersebut berencana untuk membawa inovasi ini ke aplikasi komersial "secepat mungkin", meskipun tidak sebelum tahun 2020.

Concentrating panas matahari

Suhu yang sangat tinggi diperlukan untuk memisahkan air menjadi hidrogen dan oksigen, dan penggunaan katalis sangat penting untuk memungkinkan proses ini berlangsung pada suhu yang lebih wajar. Salah satu cara untuk memanaskan air adalah dengan

memanfaatkan energi matahari melalui teknologi kolektor solar yang efisien.

Di Plataforma Solar de Almería, Spanyol, terdapat pabrik percontohan bernama Hydrosol-2 dengan kapasitas 100 kilowatt, yang mengandalkan sinar matahari untuk mencapai suhu antara 800 hingga 1.200 °C yang diperlukan dalam proses pemanasan air. Desain pabrik percontohan ini bersifat modular, yang memberikan fleksibilitas untuk dengan mudah mengembangkan teknologi ini hingga mencapai kapasitas megawatt. Hal ini dapat dilakukan dengan menggandakan unit reaktor yang ada dan mengintegrasikan pabrik ke dalam bidang heliostat yang sesuai, yaitu area yang dilengkapi dengan cermin pelacak matahari.

2.5 Metode Termokimia Pada Produksi Hidrogen

Produksi termokimia hidrogen yang memanfaatkan energi kimia dari batubara atau gas alam biasanya tidak dianggap sebagai pilihan utama, karena jalur kimia yang lebih langsung terbukti lebih efisien. Meskipun beberapa metode produksi hidrogen secara termokimia telah diuji di laboratorium, belum ada yang sukses diterapkan pada skala produksi. Namun, sebuah pencapaian menarik tercatat, di mana pemulihan hidrogen sebesar 97% dapat diraih melalui proses pemanasan plastik menggunakan gelombang mikro selama beberapa detik. Dalam teknik ini, plastik yang telah digiling dicampurkan dengan oksida besi dan aluminium oksida untuk menghasilkan hidrogen.

Ekstraksi hidrogen

Hidrogen merupakan bahan baku penting dalam industri, terutama dalam produksi amonia dan metanol, serta dalam proses penyulingan minyak bumi. Meskipun gas hidrogen awalnya dianggap tidak ada secara alami di reservoir standar, saat ini sistem hidrogen sedang dieksplorasi untuk memproduksi listrik. Dalam beberapa tahun terakhir, telah ditemukan lebih banyak sumber hidrogen alami di lingkungan geologi kontinental dan daratan, membuka peluang baru dalam pemanfaatan hidrogen alami atau organik yang mendukung upaya transisi energi. Hidrogen putih, misalnya, dapat ditemukan atau diproduksi dalam skala besar di Mid-continental Rift System, berkontribusi pada ekonomi hidrogen terbarukan. Selain itu, air dapat dipompa ke dalam batuan kaya besi yang panas untuk menghasilkan hidrogen, yang kemudian dapat diekstraksi.

Environmental impact

Sebagian besar hidrogen diproduksi dari sumber bahan bakar fosil, yang mengakibatkan emisi karbon dioksida. Hidrogen yang dihasilkan melalui proses ini sering disebut sebagai hidrogen abu-abu ketika emisi dilepaskan ke atmosfer dan hidrogen biru ketika emisi tersebut berhasil ditangkap melalui teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (carbon capture and storage, CCS).

Diperkirakan, hidrogen biru memiliki jejak karbon 20% lebih tinggi dibandingkan dengan pembakaran gas atau batubara untuk pemanasannya, serta 60% lebih besar jika dibandingkan dengan pembakaran diesel untuk tujuan yang sama, dengan asumsi adanya kebocoran metana dari sektor hulu dan tengah AS, serta produksi yang dilakukan menggunakan reformer metana uap (steam methane reformers, SMR) dilengkapi dengan sistem penangkapan karbon dioksida.

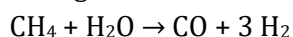
Menggunakan reformer autothermal (ATR) yang terintegrasi dengan penangkapan karbon dioksida memberikan tingkat penangkapan yang lebih tinggi, serta efisiensi energi yang memuaskan. Penelitian mengenai siklus hidup dari metode ini menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan SMR yang juga menerapkan penangkapan karbon dioksida. Penerapan teknologi ATR yang terintegrasi dengan penangkapan karbon dioksida di Eropa, misalnya pada proyek H21, menunjukkan jejak gas rumah kaca yang lebih rendah dibandingkan dengan pembakaran gas alam, dengan pengurangan emisi yang dilaporkan mencapai 68%. Hal ini disebabkan oleh pengurangan intensitas karbon dioksida dari gas alam, bersinergi dengan penggunaan reaktor yang lebih efisien dalam menangkap karbon dioksida.

Hidrogen yang dihasilkan dari sumber energi terbarukan dikenal sebagai hidrogen hijau. Terdapat dua metode utama yang dianggap praktis untuk memproduksi hidrogen dari sumber energi terbarukan. Yang pertama adalah metode pemecahan air melalui elektrolisis yang menggunakan tenaga listrik untuk menghasilkan hidrogen, dan yang kedua adalah penggunaan gas TPA dalam proses reformasi uap untuk menghasilkan hidrogen. Ketika hidrogen diproduksi dari sumber energi terbarukan seperti tenaga angin atau solar, maka hidrogen tersebut terklasifikasi sebagai bahan bakar terbarukan. Hidrogen yang dihasilkan

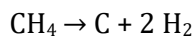
dari energi nuklir melalui elektrolisis juga kadang-kadang dianggap sebagai bagian dari kategori hidrogen hijau, meskipun sering disebut hidrogen merah muda. Sebagai contoh, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Oskarshamn membuat kesepakatan pada Januari 2022 untuk menyediakan hidrogen merah muda dengan kapasitas komersial dalam skala kilogram per hari.

Steam Reforming

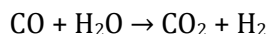
Hidrogen diproduksi oleh steam methane reforming (SMR), reaksi air dan metana. Jadi, pada suhu tinggi 700–1100 °C, uap (uap air) bereaksi dengan metana untuk menghasilkan karbon monoksida dan H₂.



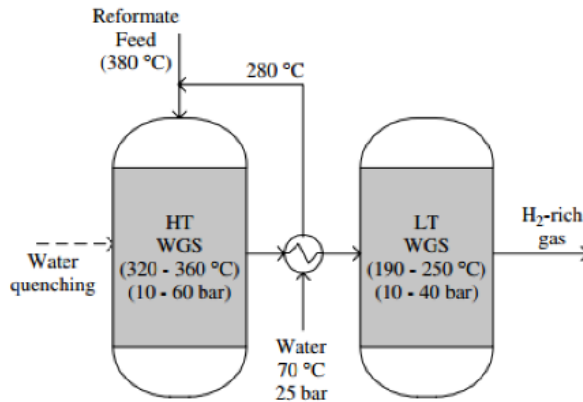
Reaksi ini berlangsung pada tekanan rendah, tetapi dilaksanakan pada tekanan tinggi, yaitu sekitar 20 atm, karena hidrogen dengan tekanan tinggi merupakan produk yang paling berharga. Sistem pemurnian yang dikenal sebagai *pressure swing adsorption* (PSA) beroperasi pada tekanan yang lebih tinggi. Campuran produk yang dihasilkan disebut "gas sintesis," karena sering digunakan langsung untuk memproduksi metanol dan berbagai senyawa lainnya. Selain metana, hidrokarbon lainnya juga dapat digunakan untuk menghasilkan gas sintesis, dengan rasio produk yang bervariasi. Salah satu teknologi yang sangat dioptimalkan adalah pembentukan kokas atau karbon:



Steam reforming biasanya menggunakan kelebihan H₂O. Hidrogen tambahan dapat diperoleh kembali dari uap dengan menggunakan karbon monoksida melalui reaksi water gas shift (WGS). Proses ini membutuhkan katalis oksida besi:



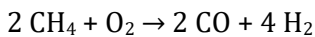
Hidrogen kadang-kadang diproduksi dan dikonsumsi dalam proses industri yang sama, tanpa dipisahkan. Dalam proses Haber untuk produksi amonia, hidrogen dihasilkan dari gas alam.



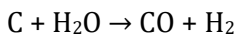
Gambar 2.4 Proses reaksi water gas shift

Oksidasi parsial hidrokarbon

Metode lain untuk produksi CO dan H₂ termasuk oksidasi parsial hidrokarbon:



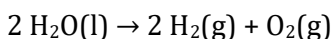
Meskipun kurang penting secara komersial, batubara dapat berfungsi sebagai awal dari reaksi pergeseran di atas:



Unit produksi olefin dapat menghasilkan sejumlah besar hidrogen produk sampingan, terutama dari bahan baku ringan seperti etana atau propana.

Elektrolisis air

Elektrolisis air adalah metode konseptual sederhana untuk menghasilkan hidrogen.



Elektroliser komersial menggunakan katalis berbasis nikel dalam larutan basa kuat. Platinum adalah katalis unggul tetapi mahal.

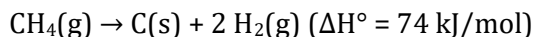
Elektrolisis air garam untuk menghasilkan klorin juga menghasilkan hidrogen sebagai produk sampingan.

Pirolisis metana

Hidrogen dapat dihasilkan melalui proses pirolisis gas alam, khususnya metana. Metode ini menawarkan jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan proses produksi hidrogen yang biasa digunakan secara komersial. Dengan mengembangkan proses pirolisis metana secara komersial, kita dapat mempercepat adopsi hidrogen dalam berbagai aplikasi industri dan sektor transportasi. Proses pirolisis

metana ini dilakukan dengan cara melewati metana melalui katalis logam cair yang mengandung nikel terlarut.

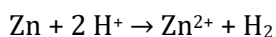
Metana diubah menjadi gas hidrogen dan karbon padat



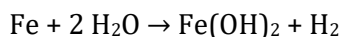
Karbon dapat dijual sebagai bahan baku manufaktur atau bahan bakar, atau ditimbun. Penelitian lebih lanjut berlanjut di beberapa laboratorium, termasuk di Karlsruhe Liquid-metal Laboratory dan di University of California – Santa Barbara. BASF membangun pabrik percontohan pirolisis metana.

2.6 Metode Laboratorium Pada Produksi Hidrogen

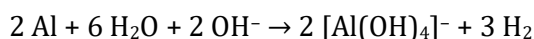
Hidrogen (H_2) biasanya diproduksi di laboratorium, sering kali sebagai produk sampingan dari reaksi kimia lainnya. Berbagai logam dapat bereaksi dengan air untuk menghasilkan hidrogen, namun laju pelepasan gas ini sangat bergantung pada jenis logam, pH lingkungan, serta keberadaan zat paduan. Secara umum, evolusi hidrogen sering diinduksi oleh asam. Logam alkali dan alkali tanah, serta aluminium, seng, mangan, dan besi, diketahui bereaksi dengan air dalam larutan asam dengan sangat mudah. Reaksi ini adalah dasar dari peralatan Kipp, yang pernah digunakan sebagai sumber gas laboratorium::



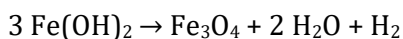
Dengan tidak adanya asam, evolusi H_2 lebih lambat. Karena besi banyak digunakan bahan struktural, korosi anaerobnya memiliki signifikansi teknologi:



Banyak logam, seperti aluminium, lambat bereaksi dengan air karena mereka membentuk lapisan oksida pasif. Namun, paduan aluminium dan galium bereaksi dengan air. Pada pH tinggi, aluminium dapat menghasilkan H_2 :



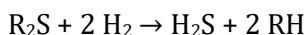
Beberapa senyawa yang mengandung logam bereaksi dengan asam untuk mengembangkan H_2 . Dalam kondisi anaerob, besi hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) dapat dioksidasi oleh proton air untuk membentuk magnetit dan H_2 . Proses ini dijelaskan oleh reaksi Schikorr:



Proses ini terjadi selama korosi anaerob besi dan baja dalam air tanah bebas oksigen dan dalam mengurangi tanah di bawah permukaan air.

Industri petrokimia

Sejumlah besar hidrogen (H_2) digunakan dalam proses "peningkatan" bahan bakar fosil. Konsumen utama dari H_2 meliputi hidro dealkilasi, hidro desulfurisasi, dan hidro cracking. Banyak dari reaksi ini dapat dikategorikan sebagai hidrogenolisis, yaitu pembelahan ikatan oleh hidrogen, ilustrasi pemisahan belerang dari bahan bakar fosil cair:



Hidrogenasi

Hidrogenasi, Penambahan H_2 ke berbagai substrat dilakukan secara besar-besaran. Proses hidrogenasi N_2 untuk menghasilkan amonia melalui metode Haber-Bosch menyerap beberapa persen dari total konsumsi energi di industri. Amonia yang dihasilkan berperan penting dalam menyediakan sebagian besar protein yang dikonsumsi oleh manusia. Selain itu, hidrogenasi juga digunakan untuk mengubah lemak dan minyak tak jenuh menjadi bentuk jenuh (trans), dengan aplikasi utama dalam produksi margarin. Metanol, yang diperoleh melalui hidrogenasi karbon dioksida, juga berfungsi sebagai sumber hidrogen dalam produksi asam klorida. Di samping itu, H_2 dimanfaatkan sebagai reduktor untuk mengubah berbagai bijih menjadi logam. Secara umum, hidrogen digunakan di pembangkit listrik sebagai pendingin pada generator, berkat sejumlah sifat menguntungkan akibat struktur molekul diatomiknya yang ringan. Ini termasuk kepadatan rendah, viskositas rendah, dan panas spesifik tertinggi dan konduktivitas termal dari semua gas.

Energi carrier

Hidrogen dapat digunakan sebagai energi bahan bakar untuk menghasilkan listrik atau melalui pembakaran untuk menghasilkan panas. Ketika hidrogen digunakan sebagai bahan bakar, pembakarannya dapat menghasilkan nitrogen oksida yang berbahaya melalui proses pembentukan termal. Emisi hidrogen secara keseluruhan sangat bergantung pada metode produksinya. Saat ini, sebagian besar pasokan hidrogen dunia berasal dari bahan bakar fosil. Metode yang paling umum digunakan adalah reformasi metana uap, di mana hidrogen dihasilkan melalui reaksi antara uap dan metana, yang merupakan komponen utama

dari gas alam. Proses ini mengeluarkan antara 6,6 hingga 9,3 ton karbon dioksida untuk setiap ton hidrogen yang diproduksi. Meskipun teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) dapat mengurangi sebagian besar emisi tersebut, jejak karbon dari hidrogen yang dihasilkan dari gas alam tetap sulit untuk dinilai hingga tahun 2021, sebagian besar disebabkan oleh emisi yang ditimbulkan selama proses produksi gas alam itu sendiri.

Listrik dapat dimanfaatkan untuk memisahkan molekul air, menghasilkan hidrogen berkelanjutan, selama listrik tersebut dihasilkan secara berkelanjutan. Namun, saat ini, proses elektrolisis ini lebih mahal dibandingkan dengan produksi hidrogen dari metana tanpa menggunakan CCS, dan efisiensi konversi energinya masih terbilang rendah. Hidrogen dapat diproduksi saat terdapat surplus listrik dari sumber terbarukan dan kemudian disimpan untuk digunakan dalam menghasilkan panas atau mengubahnya kembali menjadi listrik. Hidrogen yang dihasilkan melalui elektrolisis menggunakan energi terbarukan biasanya dikenal sebagai "hidrogen hijau. " Selain itu, hidrogen ini dapat diolah lebih lanjut menjadi bahan bakar sintetis seperti amonia dan metanol. Sebagai bahan bakar, hidrogen dapat menyediakan panas intens yang dibutuhkan dalam proses industri seperti produksi baja, semen, kaca, dan bahan kimia, sehingga berkontribusi pada upaya dekarbonisasi industri, bersamaan dengan teknologi lainnya, seperti tungku busur listrik untuk pembuatan baja. Namun, hidrogen diharapkan akan memiliki peran yang lebih signifikan sebagai bahan baku industri dalam produksi amonia dan bahan kimia organik yang lebih ramah lingkungan. Dalam konteks pembuatan baja, hidrogen dapat berfungsi sebagai pembawa energi bersih sekaligus sebagai katalis rendah karbon, menggantikan kokas yang berasal dari batu bara. Dalam sektor transportasi, hidrogen diperkirakan akan berperan besar dalam pengiriman, penerbangan, dan, dalam skala yang lebih kecil, pada kendaraan berat, melalui penggunaan bahan bakar sintetis seperti amonia dan metanol, serta teknologi sel bahan bakar. Untuk kendaraan tugas ringan termasuk mobil penumpang, hidrogen jauh di belakang kendaraan bahan bakar alternatif lainnya, terutama dibandingkan dengan tingkat adopsi kendaraan listrik baterai, dan mungkin tidak memainkan peran penting di masa depan.

BAB 3

METODE PENYIMPANAN HIDROGEN

3.1 Pendahuluan

Pengadaan Hidrogen dalam skala besar merupakan bagian penting dalam proses penunjang dekarbonisasi dan peningkatan pemanfaatan energi non fosil pada sektor industri dan transportasi. Hal – hal yang dirasakan urgent dalam kepentingan tersebut antara lain adalah bagaimana upaya efisiensi biaya produksi hidrogen, pembangunan infrastruktur dalam kaitannya dengan penyimpanan, transportasi maupun proses distribusi.

Dalam bab ini akan dibahas khusus tentang bagaimana teknologi penyimpanan hidrogen yang dikelompokkan menjadi dua yaitu berbasis fisik dan material. Secara umum dapat dikatakan bahwa penyimpanan hidrogen berbasis fisik memiliki arti penyimpanan hidrogen dalam keadaan gas, cair ataupun superkritis terkompresi. Sedangkan penyimpanan berbasis bahan merupakan penyimpanan dalam bentuk cair – organik, hidrida logam atau bahan bakar listrik.

Peran penting teknologi penyimpanan hidrogen adalah sebagai penentu dalam metode pengangkutan dan pemanfaatan hidrogen selanjutnya. Dalam tinjauan teknis secara umum terdapat 5 parameter yang dipergunakan sebagai penentu karakter penyimpanan hidrogen, 5 parameter itu adalah :

1. Gravimetric Densitas 5.5 wt%
2. Temperatur Operasi -40°C hingga 60°C
3. Volumetric Densitas 0.04 kg H₂/L
4. Cycle Life 1500 Cycles
5. Waktu Pengisian 1.5 kg H₂/min

Ada beberapa metode penyimpanan gas hidrogen yang umum dilakukan, diantaranya:

1. Penyimpanan dalam bentuk gas bertekanan tinggi:
 - Hidrogen disimpan dalam tangki bertekanan tinggi (350-700 bar) untuk penggunaan di kendaraan atau aplikasi portabel.
2. Penyimpanan dalam bentuk hidrogen cair:

- Hidrogen dicairkan pada suhu sangat rendah (-253°C) untuk meningkatkan densitas energi volumetrik, meskipun memerlukan infrastruktur penyimpanan kriogenik.
- 3. Penyimpanan dalam bentuk hidrogen padat:
 - Hidrogen disimpan dalam bentuk padat dalam bahan seperti logam hidrida, yang menyerap dan melepaskan hidrogen melalui reaksi kimia.
- 4. Penyimpanan hydrogen dalam karbon berpori / kimia:
 - Hidrogen disimpan dalam bentuk senyawa kimia seperti amonia atau asam format, yang dapat dipecah untuk melepaskan hidrogen bila diperlukan.
- 5. Penyimpanan hidrogen dalam bahan penyerap /adsorpsi
 - Hidrogen dapat disimpan pada permukaan material berpori yang memiliki kemampuan untuk menyerap hidrogen pada tekanan rendah. Material seperti karbon aktif, MOF (Metal-Organic Framework), atau CNT (Carbon Nanotubes) digunakan untuk adsorpsi hidrogen.
- 6. Penyimpanan hidrogen dalam bentuk amonia
 - Hidrogen dapat disimpan dalam bentuk amonia, yang mudah dihasilkan dan dapat digunakan sebagai media untuk transportasi hidrogen. Amonia mengandung sekitar 17,6% hidrogen berdasarkan berat, dan bisa diproses untuk melepaskan hidrogen kembali melalui dekomposisi termal.
- 7. Penyimpanan hidrogen dalam bentuk gas hidrat
 - Hidrogen dapat disimpan dalam bentuk gas hidratan, yaitu senyawa yang terbentuk dari hidrogen dan air pada suhu rendah dan tekanan tinggi.

Adapun penjelasan lebih lanjut dapat disampaikan pada informasi di bawah ini :

3.2 Penyimpanan Sistem Kompresi Gas/ CGH_2 (*Compressed Gasesous Hydrogen Storage*)

Metode penyimpanan ini terbagi menjadi 2 yaitu bejana bertekanan (*pressure vessel*) dan penyimpanan bawah tanah (*underground hydrogen storage*). Pada metode 1 yaitu bejana bertekanan merupakan cara termudah dengan teknologi paling sempurna untuk penyimpanan

hidrogen. Metode ini terbagi menjadi 4 tipe yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. CGH₂ tipe 1

- Bejana bertekanan terbuat dari material sepenuhnya metalik seperti baja ataupun aluminium
- Nilai tekanan berkisar 15 – 30 Mpa
- Nilai harga berkisar 240\$ untuk tiap kg H₂
- Gravimetri densitas sebesar 1.7 wt%
- Tipe ini biasanya dipergunakan sebagai penyimpan gas industri

2. CGH₂ tipe 2

- Bejana bertekanan dengan material logam lingkaran dibungkus dengan kaca komposit serat
- Nilai tekanan berkisar 10 – 95 Mpa dengan pernah tercatat toleransi tekanan maksimal tertinggi hingga lebih dari 100 Mpa.
- Nilai harga berkisar 360\$ untuk tiap kg H₂
- Gravimetri densitas sebesar 2.1 wt%
- Tipe 2 ini dipergunakan pada stasiun pengisian bahan bakar

3. CGH₂ tipe 3

- Bejana bertekanan dengan material yang terbungkus komposit penuh dengan lapisan logam
- Nilai tekanan berkisar 30 – 70 Mpa
- Nilai harga berkisar 700\$ untuk tiap kg H₂
- Gravimetri densitas sebesar 4.2 wt%
- Tipe 3 ini dipergunakan pada H₂ tube trailer, trailer dan on board H₂ storage

4. CGH₂ tipe 4

- Bejana bertekanan dengan material sepenuhnya komposit (misalnya bagian dalam polietilen densitas tinggi dengan kaca atau serat karbon)
- Nilai tekanan berkisar 30 – 70 Mpa
- Nilai harga berkisar 500\$ - 1200\$ untuk tiap kg H₂

- Gravimetri densitas sebesar 5.7 wt%
- Tipe 4 ini diaplikasikan pada Stationary low-pressure hydrogen storage at HRS, H₂ tube trailer, trailer dan on board H₂ storage

Sedangkan metode 2 yaitu penyimpanan bawah tanah. Metode ini dikembangkan untuk penyimpanan jangka menengah dan panjang pada jumlah hidrogen yang besar. Penyimpanan dilakukan pada gua garam, akuifer dan reservoir gas yang habis (depleted gas reservoir). Pada storage gua garam memiliki keunggulan dengan sifat mekanik garam yang menguntungkan berupa kestabilannya dalam pengaruh reaksi kimia maupun sifat batuan evaporit viskoelastik yang menjadi penyegel yang baik untuk gas selain itu kondisi garam akan menekan konsumsi mikroba yang disimpan hidrogen. Para ahli menyatakan bahwa metode penyimpanan ini sangat baik untuk penyimpanan hidrogen murni. Namun terdapat kelemahan pada metode ini yaitu persebaran dan volume gua garam yang tidak banyak selain itu karakteristik geologisnya yang beragam dan harus diidentifikasi dengan baik pada saat eksplorasi dan eksploitasi.

Berikut merupakan beberapa contoh proyek underground hydrogen storage di beberapa negara di dunia berdasarkan hasil dari [1] **Tipe gua garam** dengan prosentase H₂ 95% terdapat di Teeside UK dengan kedalaman 365 m, volume 210000 m³ dengan tekanan kerja 4 – 5 Mpa, Di Clements USA dengan kedalaman 1000 m, volume 580000 m³ dengan tekanan kerja 7 – 13,7 Mpa, di Moss Bluff USA dengan kedalaman 1200 Mpa, volume 566000 m³ dan tekanan kerja 5,5 – 15,2 Mpa, terakhir di Spindletop USA dengan tekanan kerja 6,8 – 20,2 Mpa, kedalaman 1340 m dan volume 906000 m³. Keempat storage tipe gua garam tersebut dalam kondisi masih aktif beroperasi.

Tipe aquifer terdapat di Ketzin Jerman dengan kandungan H₂ sebesar 62% pada kedalaman 200 – 250 m dengan operasional bersama natural gas. Kemudian di Beynes Perancis dengan kandungan H₂ sebanyak 50% kedalaman 430 m dan volume 33000000 m³ dengan operasional bersama natural gas dan yang terakhir berada di kota Lobodice Republik Czech dengan kandungan H₂ sebanyak 50% tekanan kerja 9 Mpa dan temperatur kerja 34°C, kedalaman 430 meter dan dalam kondisi aktif beroperasi.

Tipe *depleted gas reservoir* berada di kota Diadema Argentina dengan kandungan H₂ hanya 10%, tekanan kerja 1 Mpa dan temperatur kerja 50°C, kedalaman 600 meter. Yang kedua berada di Austria dengan kandungan 10% H₂, tekanan kerja 7,8 Mpa dan temperatur kerja 40°C, kedalaman 1000 meter.

Keunggulan: Ini adalah metode yang relatif sederhana dan sudah banyak diterapkan dalam kendaraan berbasis hidrogen (seperti kendaraan sel bahan bakar hidrogen).

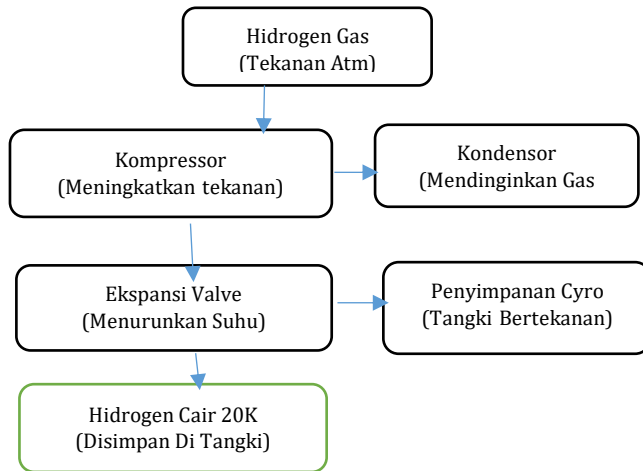
Keterbatasan: Meskipun praktis, kepadatan energi hidrogen gas masih rendah, sehingga volume penyimpanan lebih besar dibandingkan dengan metode lainnya.

3.3 Penyimpanan Bentuk Cair Cryogenic /(Liquid Hydrogen Storage/LH₂)

Terdapat perbedaan yang signifikan antara hidrogen dalam bentuk cair dibandingkan dengan bentuk gas. Kepadatan gravimetrik dan volumetrik yang jauh lebih tinggi dibandingkan penyimpanan gas terkompresi dan proses pencairan hidrogen yang lebih sulit dan menghabiskan lebih banyak energi menjadikan tantangan tersendiri bagi proses penyimpanan likuefaksi ini. Fakta ini didukung oleh kondisi berikut :

1. Suhu penguapan hidrogen yang sangat rendah yaitu berada pada 20.28 K pada 1 Atm dengan titik kritis 33 K
2. Ukuran molekul hidrogen yang sangat kecil
3. Entalpi penguapan parahidrogen pada 20 K atau 447 kJ/kg lebih rendah dibandingkan entalpi konversi eksotermik dari hidrogen normal ke kesetimbangan pada waktu yang sama.

Berikut merupakan skema penyimpanan hidrogen dalam bentuk cair :



Proses diawali dengan pengkondisian hidrogen sebagai gas pada suhu dan tekanan atmosferik, selanjutnya proses peningkatan tekanan pada gas hidrogen dilakukan dengan menggunakan kompresor. Peningkatan gas hidrogen ini dilanjutkan dengan pengkondisian dalam kondensor sebagai penurun temperatur gas, setelah mengalami pendinginan gas hidrogen diproses melalui sistem ekspansi dengan valve maupun mesin ekspansi sehingga proses penurunan suhu terus berlanjut hingga menjadi cair. Setelah hidrogen berubah menjadi cair penyimpanan selanjutnya dilakukan pada tangki cryogenic yang dirancang untuk mempertahankan suhu tetap dalam kondisi sangat rendah dan mengisolasi cairan agar tetap stabil dan meniadakan proses penguapan.

Dalam penyimpanan hidrogen cair kebutuhan akan tangki cryogenic menjadi kebutuhan utama hal ini dikarenakan kemampuan dalam mengkondisikan cairan pada suhu dan tekanan yang sangat spesifik dan ekstrem seperti hidrogen yang harus disimpan dalam suhu - 253° C, tangki tipe ini mampu menjaga stabilitas suhu dan keamanannya. Adapun karakteristik khas dari tangki cryogenic adalah sebagai berikut :

1. Desain dan Konstruksi Tangki Cryogenic

Desain tangki dilengkapi dengan isolasi yang terdiri atas isolasi termal untuk menjaga kestabilan dalam suhu yang sangat rendah, isolasi vakum yang berfungsi untuk mengurangi perpindahan panas antara hidrogen cair dengan lingkungan sekitar. Isolasi

vakum ini merupakan lapisan vakum ganda yang berada diantara tangki. Dan bahan isolasi tambahan yang berfungsi menyerap panas agar tidak mengalir ke dalam tangki.

Adapun tangki cryogenic terbuat dari bahan yang tahan terhadap suhu ekstrem dan memiliki ketahanan terhadap kerusakan material dan korosi. Adapun contoh material yang umum direkomendasikan adalah baja tahan karat dan paduan aluminium dengan keunggulan kemampuan dalam menahan suhu rendah tanpa pecah maupun mengembang. Tangki direkomendasikan berdinding ganda dimana dinding luar berfungsi sebagai pelindung dan penyimpan isolasi termal, serta dinding dalam sebagai penahan hidrogen cair pada suhu dan tekanan rendah.

2. Fungsi dan Cara Kerja Tangki Cryogenic

Tangki memiliki kemampuan dalam penyimpanan hidrogen cair pada suhu rendah hingga -253°C dan pada tekanan tinggi. Sifat hidrogen yang memiliki titik didih yang sangat rendah menjadikan urgent untuk mengkondisikan hidrogen tetap dalam bentuk cair dan tidak berubah menjadi gas. Dalam tangki ini juga dilengkapi dengan katup dan regulator tekanan yang memastikan keamanan tekanan, selain itu adanya isolasi termal dan kontrol suhu baik pemanas maupun pendingin dipergunakan untuk menjaga suhu di dalam tangki tetap stabil, mengurangi laju penguapan hidrogen cair dan memastikan keamanan. Selain itu sebagai kelengkapan keamanan dipasang juga detektor kebocoran hidrogen mengingat sifatnya yang sangat mudah terbakar.

Keunggulan dari metode ini adalah sebagai berikut :

- Efisiensi penyimpanan dimana menyimpan hidrogen dalam bentuk cair meningkatkan densitas energi lebih tinggi sehingga lebih banyak hidrogen dapat disimpan dibandingkan dalam bentuk gas.
- Tangki cryogenic memungkinkan penggunaan lebih fleksibel termasuk untuk kendaraan berbahan bakar hidrogen, pembangkit energi dan infrastruktur distribusi hidrogen.

- Memudahkan dalam proses pengangkutan baik melalui darat, laut dan udara karena menyimpan lebih banyak energi dalam volume yang lebih kecil.

Keterbatasan :

- Kebutuhan biaya isolasi dan konstruksi yang tinggi karena material dan teknologi yang canggih
- Adanya potensi kehilangan hidrogen melalui proses evaporasi yang disebut boil off.
- Resiko kebocoran dan isu keamanan, sifat hidrogen yang sangat mudah terbakar mengakibatkan perlunya pemeliharaan dan pengawasan yang ketat.

3.4 Penyimpanan Bentuk Padat Dalam Logam Hidrida

Metode penyimpanan hidrogen dalam bentuk padat dilakukan dengan cara mengikat hidrogen ke dalam struktur logam yang membentuk senyawa hidrida. Dalam persenyawaan hidrida terjadi ikatan antara hidrogen dengan logam atau paduan logam tertentu. Beberapa contoh logam yang dapat membentuk hidrida antara lain Nikel (Ni), Magnesium (Mg), Aluminium (Al), Zirkonium (Zr) dan Titanium (Ti). Persenyawaan antara nikel dengan hidrogen membentuk Nikel Hidrida (NiH) yang dipergunakan sebagai baterai hidrogen dengan kelebihan pada kestabilan dan kemudahan dalam pengisian serta pelepasan hidrogen. Contoh persenyawaan lainnya adalah antara Magnesium dengan Hidrogen membentuk Magnesium Hidrida (MgH₂). Hasil persenyawaan ini memiliki keunggulan berupa kepadatan energi yang tinggi sehingga sangat potensial dalam penyimpanan hidrogen. Selain itu terdapat persenyawaan antara unsur Lantanum, Nikel dan Hidrogen membentuk Lantanum Nikel Hidrida (LaNi₅H₆) yang sering dipergunakan dalam sistem penyimpanan energi hidrogen karena memiliki stabilitas baik dalam jangka panjang.

Adapun langkah – langkah penyimpanan hidrogen dalam bentuk padat ini dimulai dari proses pembentukan hidrida logam melalui proses penyerapan hidrogen oleh logam atau paduannya pada suhu dan tekanan tertentu. Hidrogen masuk ke dalam kisi kristal logam untuk selanjutnya terjadi proses ikatan antar atom hidrogen – logam membentuk senyawa hidrida. Proses ini biasanya berlangsung pada suhu rendah hingga sedang dan tekanan hidrogen yang relatif tinggi.

Keunggulan dari metode ini adalah :

- Hidrida logam memiliki kepadatan energi tinggi apabila dibandingkan dalam bentuk gas atau cair
- Hidrogen yang disimpan dalam bentuk hidrida lebih stabil dan aman apabila dibandingkan dengan hidrogen dalam bentuk gas bertekanan tinggi. Penyimpanan hidrogen dalam bentuk padat meminimalkan resiko kebocoran
- Proses pengisian dan pengosongan yang efisien, dimana hidrogen dapat dilepaskan dari hidrida dengan cara pemanasan maupun penurunan tekanan dengan proses yang relatif cepat.

Keterbatasan dari metode ini adalah :

- Diperlukannya pengkondisian suhu dan tekanan yang cukup ketat, hal ini disebabkan oleh beberapa hidrida hanya dapat menyerap hidrogen pada suhu dan tekanan tertentu saja seperti suhu tinggi atau tekanan yang sangat tinggi hal ini tentu berdampak pada efisiensi sistem.
- Keterbatasan dalam kapasitas penyimpanan, hal ini disebabkan oleh kekhasan pada sifat fisik dan kimia logam yang digunakan sehingga meskipun hidrida memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas.
- Diperlukannya peningkatan kemampuan penyimpanan hidrogen yang lebih baik, suhu pelepasan hidrogen yang lebih rendah dan kemampuan siklus yang lebih lama.

3.5 Penyimpanan Hidrogen Secara Kimiawi /Chemical Storage

Penggunaan senyawa kimia untuk mengikat hidrogen dan menyimpannya dalam bentuk senyawa yang stabil merupakan prinsip dasar dari penggunaan metode penyimpanan hidrogen secara kimiawi ini. Pada metode ini melibatkan ikatan kimia antara hidrogen dan senyawa kimia tertentu seperti Amonia (NH_3), Borohidrida, dan Metanol (CH_3OH). Dimana setelah terjadi ikatan persenyawaan dengan pengkondisian suhu dan tekanan tertentu maupun katalis dapat melepaskan hidrogen kembali melalui reaksi kimia. Dapat dikatakan bahwa metode penyimpanan ini mengandalkan pembentukan senyawa kimia baru dalam bentuk yang stabil.

Berikut adalah contoh bahan kimia yang umum dipergunakan dalam metode penyimpanan hidrogen secara kimia yaitu :

Amonia (NH_3), merupakan salah satu senyawa kima yang memiliki kepadatan energi yang tinggi bahkan lebih tinggi dibandingkan gas hidrogen. Amonia dapat berada dalam bentuk cair pada suhu dan tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan hidrogen cair, hal ini menjadikannya lebih mudah untuk disimpan. Hidrogen diserap dalam amonia membentuk NH_3 yang dapat diangkut dan disimpan dengan cara yang relatif aman. Proses pelepasan hidrogen dari amonia dapat melalui proses pemecahan katalitik atau pemanasan yang dapat memisahkan hidrogen dan nitrogen.

Borohidrida, beberapa contoh senyawa yang termasuk Borohidrida antara lain adalah Natrium Borohidrida (NaBH_4) dan Litium Borohidrida (LiBH_4) dapat menyimpan hidrogen dan melepaskannya melalui reaksi kimia. Secara umum Borohidrida mampu melepaskan hidrogen melalui reaksi hidrolisis dengan air maupun melalui proses kimia lain dengan melibatkan katalis. Dalam persenyawaan borohidrida ini memiliki kepadatan hidrogen yang sangat tinggi meskipun proses pelepasan hidrogen memerlukan reaksi kimia dengan waktu dan energi yang tinggi.

Metanol (CH_3OH), senyawa kimia ini berbentuk cairan yang dapat menyimpan hidrogen dan melepaskannya melalui reaksi kimia. Untuk melepaskan hidrogen dapat dilakukan beberapa cara seperti pemanasan, reformasi metanol/katalisis. Metanol dengan kondisi fisik berbentuk cairan pada suhu dan tekanan normal memungkinkan penanganan yang lebih mudah apabila dibandingkan dengan gas hidrogen bertekanan tinggi.

Keuntungan metode penyimpanan hidrogen menggunakan metode kimiawi adalah sebagai berikut :

- Penyimpanan hidrogen dalam bentuk senyawa kimia relatif lebih aman dibandingkan dengan penyimpanan gas bertekanan tinggi. Karena sifatnya yang lebih stabil, tidak mudah meledak dan dapat berupa cairan pada suhu dan tekanan normal.
- Kepadatan energi yang tinggi per unit volume memudahkan dalam penyimpanan dan pengangkutan.

Keterbatasannya antara lain :

- Proses pelepasan hidrogen yang relatif rumit dan memerlukan energi dan pengkondisian khusus.

- Regenerasi bahan pembawa hidrogen tidak dapat dilakukan dalam siklus berulang. Semisal borohidrida yang kemungkinan memerlukan proses regenerasi yang lebih kompleks untuk pemulihan setelah pelepasan hidrogen.
- Adanya produk sampingan seperti CO₂ yang dihasilkan dari reformasi metanol atau amonia menjadikan beban emisi karbon.
-

3.6 Penyimpanan hidrogen dalam bahan penyerap (Karbon Berpori) /Physical Adsorption

Metode penyimpanan hidrogen dengan karbon berpori merupakan suatu metode yang menggunakan material dengan struktur berpori dengan prinsip adsorpsi fisik bukan ikatan kimia. Material berpori meliputi karbon aktif, zeolit atau kerangka organik logam (MOFs – *Metal Organic Frameworks*) dengan luas permukaan yang sangat besar tempat dimana molekul hidrogen menempel tanpa terikat secara kimiawi. Berikut penjelasan dari material berpori yang digunakan,

Karbon aktif (*Activated Carbon*), merupakan material yang paling banyak dipakai dalam penyimpanan hidrogen berpori. Melalui proses aktivasi karbon menjadi sangat berpori dan dapat menyerap hidrogen. Material ini masih terbatas dibandingkan dengan beberapa material berpori lainnya.

Zeolit, mineral berpori ini memiliki struktur yang dapat disesuaikan untuk memaksimalkan adsorpsi hidrogen pada tekanan tertentu.

Kerangka Organik Logam (MOFs): merupakan material berpori dengan struktur terorganisir dan permukaan luas sehingga berpotensi lebih dalam penyimpanan hidrogen meskipun pada kondisi suhu dan tekanan yang lebih rendah.

Keunggulan dari metode ini adalah :

1. Proses pengisian dan pelepasan hidrogen sangat cepat dibandingkan dengan proses kimiawi, hal ini disebabkan karena hanya melibatkan interaksi fisik yang lebih lemah.
2. Pada penyimpanan hidrogen pada dalam karbon berpori memiliki tingkat keamanan yang lebih apabila dibandingkan dengan penyimpanan gas bertekanan tinggi. Hal ini disebabkan karena tekanan yang diperlukan untuk proses adsorpsi lebih rendah.

3. Memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas bertekanan tinggi meskipun kapasitasnya tidak sebesar penyimpanan hidrogen dalam bentuk cair atau hidrida logam.
4. Memiliki nilai efisiensi energi yang baik karena adsorpsi hidrogen tidak memerlukan energi besar dalam proses penyimpanan ataupun pelepasan hidrogen.

Keterbatasan metode ini :

1. Kapasitas penyimpanan per unit volume relatif rendah dibandingkan dengan penyimpanan kimiawi.
2. Tantangan teknis dan biaya tambahan dalam pengelolaan sistem penyimpanan pada kondisi ekstrim, sebagaimana diketahui proses adsorpsi hidrogen lebih efisien pada tekanan tinggi dan suhu rendah.
3. Keterbatasan pada harga dan produksi material.

3.7 Penyimpanan hidrogen dalam bentuk gas hidrat

Metode penyimpanan hidrogen dalam bentuk gas hidrat melibatkan pembentukan hidrida gas atau gas hidrat yang merupakan senyawa padat yang terbentuk ketika hidrogen terperangkap dalam struktur kristal air pada kondisi tertentu. Merupakan salah satu metode yang berpotensi dan menjanjikan apabila dibandingkan dengan penyimpanan gas bertekanan tinggi atau hidrogen cair. Adapun proses pembentukan gas hidrat dalam kondisi khusus yaitu tekanan tinggi ataupun suhu rendah. Pada tekanan tinggi, gas hidrogen terperangkap dalam kristal air. Sedangkan suhu yang rendah diperlukan agar air dapat membentuk struktur kristal es yang stabil untuk menahan molekul hidrogen di dalamnya. Molekul hidrogen yang terjebak dalam kisi kristal air ini yang akan membentuk struktur gas hidrat. Sehingga dapat dikatakan bahwasanya gas hidrat ini merupakan gas yang terperangkap dalam struktur kristal es.

Metode ini memiliki **keunggulan** antara lain :

1. Kepadatan energi yang tinggi apabila dibandingkan dengan gas hidrogen
2. Penyimpanan lebih aman karena bentuknya yang padat meminimalisir kebocoran atau ledakan

3. Gas hidrat stabil pada suhu rendah hal ini juga mengurangi resiko kebocoran hidrogen dalam keadaan tidak stabil.
4. Proses penyimpanan dan pelepasan hidrogen yang relatif lebih mudah dengan proses pemanasan maupun penurunan tekanan, hal ini tentu berbeda dengan metode penyimpanan lain yang memerlukan reaksi kimia dalam proses pemisahannya.
5. Kemudahan dan keamanan dalam transportasi maupun penyimpanan jangka panjang.

Keterbatasan dari metode ini antara lain :

1. Gas hidrat diproses pada kondisi pembentukan yang ketat, dimana hanya dapat terbentuk pada suhu rendah dan tekanan tinggi. Hal ini menjadikan proses pembentukan dan penyimpanannya lebih sulit dan tidak praktis pada skala besar tanpa sistem yang dirancang khusus.
2. Kapasitas penyimpanan yang terbatas untuk hidrogen per volume
3. Diperlukannya stabilitas dan pengontrolan tekanan dan suhu secara terus menerus dan membutuhkan peralatan dan sistem kontrol yang rumit. Pencegahan pembentukan gas yang tidak stabil ataupun pembentukan cairan yang tidak diinginkan memerlukan peralatan dan sistem yang rumit tersebut. Kenaikan suhu yang terlalu tinggi maupun penurunan tekanan yang terlalu banyak menjadikan gas hidrat terurai dan hidrogen menjadi terlepas yang meningkatkan resiko kebocoran.
4. Berkurangnya efisiensi produksi karena diperlukannya energi tambahan pada proses pembentukan gas hidrat.

BAB 4

TEKNOLOGI TRANSPORTASI HIDROGEN

4.1 Pendahuluan

Kebutuhan transportasi hidrogen dalam rantai pasok energi menjadi semakin penting karena hidrogen dipandang sebagai salah satu solusi energi bersih untuk mengurangi emisi karbon global. Hidrogen dapat diproduksi dari berbagai sumber, termasuk energi terbarukan, gas alam, dan biomassa, namun sering kali diproduksi di lokasi yang jauh dari pusat konsumen energi. Oleh karena itu, kemampuan untuk mentransportasikan hidrogen secara efisien dari tempat produksinya ke tempat penggunaannya sangat krusial. Selain itu, tanpa infrastruktur transportasi yang memadai, hidrogen akan sulit untuk diadopsi secara luas sebagai bagian dari solusi energi masa depan. Transportasi hidrogen yang aman dan efisien diperlukan untuk memastikan bahwa pengguna akhir, seperti pembangkit listrik, industri, dan sektor transportasi, dapat mengakses hidrogen dengan mudah seperti pada kapal pengangkut *liquid hydrogen* pada Gambar 1.



Gambar 4.1. Kapal pengangkut *liquid hydrogen*

Sumber: tradewindsnews.com

Dalam konteks global, beberapa negara memiliki sumber daya terbarukan yang melimpah untuk memproduksi hidrogen, tetapi permintaan hidrogen justru lebih tinggi di negara lain. Misalnya, Australia memiliki potensi besar untuk memproduksi hidrogen hijau dari energi surya dan angin, namun pasar utama untuk hidrogen tersebut mungkin berada di Asia Timur atau Eropa. Oleh karena itu, transportasi

hidrogen lintas negara ataupun lintas benua menjadi tantangan besar yang harus diatasi untuk menciptakan pasar hidrogen global yang efisien. Jika infrastruktur transportasi ini tidak segera dikembangkan, potensi hidrogen untuk menjadi sumber energi utama akan terhambat, meskipun teknologi produksi hidrogen sudah tersedia.

Selain itu, transportasi hidrogen diperlukan untuk mendukung diversifikasi sumber energi di berbagai sektor ekonomi. Dalam sektor transportasi, misalnya, kendaraan sel bahan bakar hidrogen atau *fuel cell vehicle* (FCV) memerlukan stasiun pengisian hidrogen yang tersebar luas agar dapat beroperasi dengan efisien. Agar stasiun-stasiun ini tetap berfungsi, hidrogen harus dikirimkan ke lokasi-lokasi yang tersebar di seluruh wilayah tersebut. Hal ini menciptakan kebutuhan mendesak untuk pengembangan infrastruktur transportasi hidrogen yang handal. Tanpa sistem transportasi yang baik, penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar kendaraan akan terbatas pada beberapa wilayah yang memiliki produksi hidrogen lokal, yang membatasi adopsi teknologi ini.

Infrastruktur transportasi hidrogen juga penting dalam memastikan keamanan pasokan energi. Dalam skenario di mana hidrogen menjadi bagian penting dari sistem energi global, gangguan dalam pendistribusian hidrogen dapat memiliki dampak yang signifikan terhadap kegiatan perekonomian dan masyarakat. Oleh karena itu, diperlukan jaringan transportasi yang andal dan fleksibel untuk memastikan ketersediaan hidrogen setiap saat. Investasi dalam infrastruktur ini akan membantu mengurangi risiko ketergantungan pada sumber energi fosil dan meningkatkan ketahanan energi. Dengan jaringan transportasi hidrogen yang baik, negara-negara dapat lebih siap menghadapi krisis energi global di masa depan.

Kebutuhan transportasi hidrogen juga terkait dengan efisiensi energi, seperti transportasi kapal. Hidrogen memiliki densitas energi yang rendah dalam kondisi gas sehingga pengangkutannya dalam bentuk cair atau menggunakan pembawa kimia atau *liquid organic hydrogen carrier* (LOHC) sering kali lebih efisien untuk jarak jauh. Pengembangan teknologi transportasi yang efisien akan mengurangi biaya energi yang diperlukan untuk mentransportasikan hidrogen, sehingga membuatnya lebih kompetitif dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Dengan demikian, inovasi dalam teknologi transportasi hidrogen menjadi kunci untuk memperluas penggunaan hidrogen di berbagai sektor industri. Hal ini juga akan mendorong peningkatan skala ekonomi yang membuat hidrogen semakin terjangkau.



Gambar 4.2. Infrastruktur pipa penyaluran gas hidrogen

Sumber: processsensing.com

Pengangkutan hidrogen juga penting untuk memfasilitasi dekarbonisasi sektor-sektor industri yang sulit diubah ke energi listrik, seperti baja, semen, dan kimia. Industri-industri ini memerlukan bahan bakar yang bersih, dan hidrogen dapat memainkan peran penting sebagai sumber energi rendah karbon. Namun, pabrik-pabrik ini sering kali berada jauh dari lokasi produksi hidrogen, sehingga transportasi hidrogen dalam jumlah besar menjadi krusial misalnya menggunakan infrastruktur pipa hidrogen (Gambar 2). Tanpa sistem transportasi yang efisien, transisi ke penggunaan hidrogen dalam industri-industri ini akan sangat sulit tercapai. Maka dari itu, pembangunan infrastruktur transportasi hidrogen harus menjadi prioritas untuk mendukung dekarbonisasi sektor-sektor tersebut.

Seiring meningkatnya permintaan hidrogen, transportasi hidrogen juga dibutuhkan untuk menjaga stabilitas harga dan pasokan. Seperti komoditas energi lainnya, fluktuasi harga hidrogen dapat dipengaruhi oleh gangguan pada rantai pasokan, termasuk transportasi. Jika infrastruktur transportasi tidak memadai, biaya transportasi hidrogen dapat meningkat, yang akan berdampak pada harga akhir hidrogen di pasar. Dengan demikian, investasi dalam jaringan transportasi yang baik akan membantu menjaga harga hidrogen tetap stabil dan terjangkau bagi konsumen. Hal ini juga penting untuk menarik lebih banyak investasi di sektor hidrogen.

Di sisi lain, pengembangan transportasi hidrogen harus sejalan dengan regulasi keselamatan yang ketat. Hidrogen adalah bahan yang mudah terbakar dan berpotensi meledak jika tidak ditangani dengan benar. Oleh karena itu, sistem transportasi hidrogen harus mematuhi standar keselamatan yang sangat tinggi untuk menghindari kecelakaan. Regulasi dan protokol keselamatan yang ketat harus diterapkan di seluruh rantai pasokan hidrogen, mulai dari produksi hingga distribusi.

Dalam hal ini, transportasi hidrogen memerlukan pendekatan yang berbeda dibandingkan dengan transportasi bahan bakar konvensional seperti gas alam atau minyak.

Infrastruktur transportasi hidrogen juga memiliki dampak lingkungan yang perlu diperhitungkan. Meskipun hidrogen itu sendiri adalah sumber energi bersih, proses transportasinya, terutama jika menggunakan kendaraan atau kapal yang berbahan bakar fosil, dapat menambah jejak karbon. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan sistem transportasi hidrogen yang ramah lingkungan, misalnya dengan menggunakan kendaraan atau kapal yang juga menggunakan energi terbarukan atau bahan bakar hidrogen. Hal ini akan memastikan bahwa hidrogen benar-benar menjadi bagian dari solusi untuk mengurangi emisi karbon secara keseluruhan.

Terakhir, kebutuhan transportasi hidrogen juga menjadi peluang bagi inovasi dan pengembangan teknologi baru. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak penelitian dan investasi telah diarahkan pada pengembangan teknologi penyimpanan dan transportasi hidrogen yang lebih efisien. Inovasi ini termasuk pengembangan pipa hidrogen, penggunaan pembawa kimia, dan teknologi pencairan hidrogen. Dengan terus mendorong inovasi, tantangan-tantangan dalam transportasi hidrogen dapat diatasi, yang pada akhirnya akan mempercepat transisi global ke energi hidrogen.

4.2 Transportasi Hidrogen Dalam Bentuk Gas

Hidrogen dalam bentuk gas dapat ditransportasikan menggunakan beberapa metode khusus yang dirancang untuk mengatasi tantangan unik dari gas ini. Hidrogen memiliki molekul yang sangat kecil dan sangat mudah terbakar, sehingga membutuhkan penanganan yang aman dan efisien selama transportasi. Salah satu metode paling umum adalah melalui tabung atau silinder bertekanan tinggi, yang memungkinkan hidrogen disimpan dan diangkut dengan volume yang lebih besar. Tabung ini biasanya terbuat dari material yang kuat, seperti baja atau komposit karbon, untuk menahan tekanan tinggi yang diperlukan. Biasanya, hidrogen disimpan pada tekanan antara 350 hingga 700 bar, yang memungkinkan penyimpanan lebih banyak gas dalam ruang yang lebih kecil.



Gambar 4.3. Transportasi gas hidrogen dengan truk

Sumber: endeavormgmt.com

Pengangkutan hidrogen dalam tabung bertekanan tinggi ini sering kali dilakukan menggunakan truk, kereta api, atau kapal laut. Truk yang dilengkapi dengan tangki khusus sering digunakan untuk mendistribusikan hidrogen ke stasiun pengisian bahan bakar hidrogen atau fasilitas industri (Gambar 3). Namun, jarak yang dapat ditempuh truk-truk ini terbatas, terutama karena volume gas yang dapat diangkut dalam setiap tangki terbatas. Untuk transportasi jarak yang lebih jauh, kereta api atau kapal sering digunakan, karena mereka dapat membawa lebih banyak tabung atau tangki sekaligus. Transportasi dalam jumlah besar ini sering digunakan untuk pengiriman ke fasilitas yang membutuhkan hidrogen dalam skala besar, seperti pabrik kimia atau pembangkit listrik.

Selain menggunakan tabung bertekanan tinggi, saluran pipa merupakan metode transportasi gas hidrogen yang sangat efisien, terutama untuk jarak yang lebih jauh dan dalam skala yang besar. Penggunaan pipa memudahkan aliran hidrogen dari tempat produksi, seperti fasilitas elektrolisis, ke lokasi pengguna akhir tanpa perlu memuat dan membongkar tangki secara berulang kali. Pipa-pipa hidrogen biasanya dibangun menggunakan material yang lebih tahan terhadap kebocoran, karena molekul hidrogen yang sangat kecil dapat menembus bahan pipa konvensional. Tantangan dalam menggunakan pipa ini adalah biayanya yang tinggi, terutama jika pipa harus dibangun dari awal di wilayah yang tidak memiliki infrastruktur gas alam. Namun, untuk jangka panjang, transportasi melalui pipa menjadi lebih ekonomis dibandingkan dengan pengangkutan tabung gas.

Transportasi hidrogen dalam bentuk gas juga dapat dilakukan dengan menggunakan kontainer komposit yang lebih ringan dan lebih efisien dibandingkan tabung baja konvensional. Kontainer ini biasanya dibuat dari bahan komposit serat karbon, yang memiliki kekuatan tinggi tetapi beratnya lebih ringan. Dengan kontainer ini, lebih banyak hidrogen dapat diangkut tanpa menambah beban yang signifikan pada kendaraan pengangkut. Penggunaan kontainer komposit ini sangat ideal untuk pengangkutan jarak menengah di mana efisiensi berat dan kapasitas gas sangat diperhitungkan. Kontainer ini juga lebih mudah ditangani, karena dapat ditempatkan dan dipindahkan dengan lebih mudah dibandingkan tabung tradisional.

Salah satu tantangan utama dalam transportasi hidrogen gas adalah faktor keselamatan. Hidrogen sangat mudah terbakar dan memiliki kisaran campuran udara-bahan bakar yang lebih luas dibandingkan dengan gas lain, sehingga sangat mudah meledak jika ada kebocoran. Oleh karena itu, standar keselamatan yang ketat harus diterapkan dalam setiap aspek transportasi hidrogen, mulai dari pemuatan hingga pembongkaran. Transportasi dalam tabung bertekanan tinggi juga harus dilengkapi dengan sistem deteksi kebocoran yang canggih, serta katup pelepas tekanan untuk menghindari ledakan jika terjadi kebocoran. Penanganan yang hati-hati dan pelatihan operator yang memadai juga sangat penting untuk mengurangi risiko.

Pengaturan tekanan juga merupakan faktor penting dalam transportasi hidrogen gas. Karena hidrogen disimpan dalam tekanan yang sangat tinggi, pengangkutannya memerlukan peralatan khusus untuk menjaga tekanan tetap stabil selama perjalanan. Misalnya, tabung gas biasanya dilengkapi dengan regulator tekanan yang dapat menyesuaikan tekanan di dalam tabung saat suhu berubah. Hal ini penting karena perubahan suhu dapat menyebabkan peningkatan atau penurunan tekanan, yang berpotensi menyebabkan kebocoran atau ledakan. Dengan menggunakan sistem pengaturan tekanan yang baik, risiko ini dapat diminimalisir, sehingga transportasi hidrogen menjadi lebih aman.

Sistem penyimpanan hidrogen bertekanan juga memainkan peran penting dalam proses transportasi. Penyimpanan harus dirancang sedemikian rupa untuk menjaga hidrogen tetap stabil dalam bentuk gas. Salah satu teknik yang digunakan adalah menyimpan hidrogen dalam tabung berinsulasi termal untuk menghindari fluktuasi suhu yang signifikan selama transportasi. Selain itu, sistem penyimpanan ini juga harus mudah diakses untuk perawatan dan inspeksi, karena tabung atau

kontainer hidrogen memerlukan pemeriksaan rutin untuk memastikan tidak ada kebocoran. Penyimpanan yang aman dan andal ini akan membantu memastikan bahwa hidrogen dapat tiba di lokasi tujuan tanpa insiden.

Dalam hal efisiensi energi, transportasi hidrogen gas membutuhkan energi tambahan untuk proses kompresi sebelum pengiriman. Kompresi gas hidrogen hingga tekanan tinggi membutuhkan infrastruktur dan teknologi yang canggih serta memakan energi yang tidak sedikit. Karena alasan ini, teknologi kompresor gas yang lebih efisien dan hemat energi terus dikembangkan untuk mengurangi biaya transportasi. Selain itu, mengoptimalkan rute transportasi dan menggunakan kendaraan pengangkut yang hemat energi juga penting untuk mengurangi jejak karbon transportasi hidrogen. Dengan upaya ini, transportasi hidrogen dapat menjadi lebih ramah lingkungan.

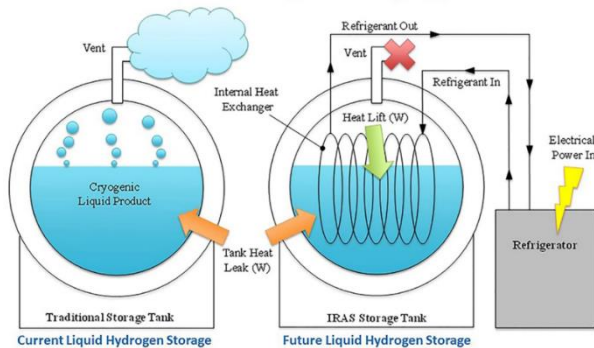
Terakhir, pentingnya pengembangan infrastruktur untuk mendukung transportasi hidrogen gas tidak bisa diabaikan. Infrastruktur yang mencakup jaringan distribusi, fasilitas pengisian ulang, dan sistem penyimpanan akan sangat diperlukan seiring meningkatnya penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar masa depan. Negara-negara yang serius dalam mengembangkan ekonomi hidrogen harus berinvestasi dalam infrastruktur ini untuk memastikan kelancaran distribusi hidrogen dari produsen ke konsumen. Tanpa infrastruktur yang memadai, transportasi hidrogen akan menghadapi hambatan logistik yang signifikan, yang pada akhirnya dapat memperlambat adopsi hidrogen sebagai bagian dari transisi energi bersih global.

Transportasi hidrogen gas, meskipun menghadapi berbagai tantangan, merupakan komponen penting dari rantai pasokan energi berbasis hidrogen. Pengembangan teknologi yang lebih efisien dan aman, diiringi dengan investasi dalam infrastruktur yang memadai, akan memungkinkan hidrogen untuk diangkut dalam jumlah besar ke seluruh dunia. Dengan begitu, hidrogen dapat memainkan peran penting dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mendukung keberlanjutan lingkungan di masa depan.

4.3 Transportasi Hidrogen Dalam Bentuk Cair

Transportasi hidrogen dalam bentuk cair menjadi pilihan menarik karena memungkinkan pengiriman hidrogen dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan hidrogen gas. Untuk mengubah hidrogen menjadi cair, diperlukan proses kriogenik yang mendinginkan gas hingga suhu sangat rendah, sekitar -253°C . Dalam keadaan ini, volume hidrogen berkurang drastis, sehingga lebih praktis untuk diangkut dalam jumlah besar. Meskipun proses pencairan ini memerlukan energi yang signifikan, efisiensi transportasi jarak jauh menjadi lebih tinggi karena densitas energi yang meningkat. Oleh karena itu, metode ini sangat cocok untuk mendistribusikan hidrogen ke lokasi yang jauh dari fasilitas produksi.

Hidrogen cair diangkut menggunakan tangki kriogenik khusus yang dirancang untuk menjaga suhu ekstrem ini selama proses pengangkutan. Tangki tersebut harus memiliki isolasi termal yang sangat baik untuk memastikan hidrogen tetap dalam bentuk cair dan tidak berubah kembali menjadi gas selama transportasi. Tangki kriogenik ini biasanya digunakan di berbagai moda transportasi, seperti truk, kapal, dan kereta api, tergantung pada volume hidrogen yang diangkut dan jarak tempuhnya. Selain itu, material tangki harus cukup kuat dan tahan terhadap perubahan suhu ekstrim tanpa mengalami kerusakan. Penggunaan tangki ini membantu memastikan hidrogen cair bisa diangkut secara aman dan efisien ke lokasi tujuan.



Gambar 4.4 Teknologi tabung gas hidrogen menghilangkan *loss boil-off* hidrogen

Sumber: nasa.gov

Transportasi hidrogen cair juga menghadapi tantangan keamanan yang cukup besar. Hidrogen sangat mudah terbakar, dan ketika dalam bentuk cair, risiko meningkat akibat suhu yang sangat rendah. Tangki kriogenik harus dilengkapi dengan sistem keamanan yang canggih untuk menghindari kebocoran atau peningkatan tekanan yang berlebihan. Sistem pemantauan suhu dan tekanan harus selalu aktif selama proses transportasi. Selain itu, pelatihan khusus bagi operator transportasi diperlukan untuk menangani prosedur keselamatan hidrogen kriogenik. Aspek keamanan yang ketat menjadi prioritas utama untuk menghindari insiden serius selama pengangkutan.

Salah satu masalah yang sering dihadapi dalam transportasi hidrogen cair adalah *loss boil-off*, di mana sebagian kecil hidrogen cair berubah menjadi gas selama perjalanan akibat kenaikan suhu. Gas yang terbentuk ini perlu dikeluarkan secara aman untuk mencegah tekanan berlebih di dalam tangki. Teknologi terbaru sudah dirancang untuk mengurangi atau memanfaatkan kembali hidrogen yang menguap ini (Gambar 4), sehingga dapat digunakan sebagai sumber energi tambahan atau bahan bakar untuk kendaraan pengangkut. Pengelolaan *boil-off* gas ini sangat penting untuk mengoptimalkan efisiensi transportasi dan meminimalkan kerugian selama proses pengiriman.

Meski proses pencairan hidrogen membutuhkan energi yang besar, transportasi dalam bentuk cair tetap menjadi pilihan ekonomis untuk jarak jauh. Ini karena hidrogen cair memiliki densitas yang lebih tinggi, sehingga volume yang bisa diangkut dalam setiap perjalanan lebih banyak dibandingkan dengan hidrogen gas bertekanan tinggi. Biaya yang diperlukan untuk infrastruktur transportasi hidrogen cair dapat diimbangi dengan penghematan yang diperoleh dari efisiensi transportasi dalam skala besar. Pengembangan teknologi pencairan hidrogen yang lebih hemat energi juga terus dilakukan untuk menekan biaya dan membuat transportasi hidrogen cair semakin kompetitif dalam pasar energi.

Untuk pengangkutan jarak jauh antarnegara, kapal tanker kriogenik menjadi salah satu solusi utama. Kapal ini, yang dirancang mirip dengan kapal pengangkut gas alam cair (LNG), dilengkapi dengan tangki berisolasi tinggi untuk mengangkut hidrogen cair dalam jumlah besar. Kapal-kapal ini memainkan peran penting dalam pengiriman hidrogen ke pasar global, terutama untuk memenuhi kebutuhan industri berat dan pembangkit listrik yang memerlukan suplai energi hidrogen dalam skala besar. Beberapa proyek internasional, seperti antara Jepang

dan Australia, sudah mulai memanfaatkan kapal tanker kriogenik untuk mengangkut hidrogen cair. Infrastruktur ini akan menjadi kunci penting dalam distribusi hidrogen secara global di masa depan.

Di darat, kereta api kriogenik juga mulai menjadi opsi yang dipertimbangkan untuk pengiriman hidrogen cair dalam jumlah besar. Kereta api dapat membawa lebih banyak tangki kriogenik dibandingkan dengan truk dan dapat menempuh jarak yang lebih jauh tanpa sering berhenti. Efisiensi penggunaan energi kereta api juga lebih tinggi dibandingkan dengan moda transportasi darat lainnya, menjadikannya alternatif yang efisien untuk distribusi hidrogen cair di dalam wilayah daratan. Dalam beberapa tahun ke depan, kereta api kriogenik diprediksi akan semakin populer seiring dengan meningkatnya permintaan hidrogen cair untuk berbagai aplikasi industri dan energi bersih.

Infrastruktur yang mendukung pengisian ulang tangki kriogenik juga sangat diperlukan untuk kelancaran transportasi hidrogen cair. Stasiun pengisian ulang ini harus tersebar di sepanjang rute transportasi agar hidrogen cair dapat diangkut dengan efisien tanpa gangguan. Fasilitas pengisian ini juga memerlukan teknologi pengisian yang cepat dan aman untuk meminimalkan waktu henti selama transportasi. Investasi dalam pengembangan infrastruktur pengisian ulang ini akan memperkuat jaringan distribusi hidrogen cair, menjadikannya lebih andal dan efektif dalam memenuhi kebutuhan energi masa depan. Dengan infrastruktur yang berkembang, transportasi hidrogen cair akan semakin mudah dan dapat diandalkan.

Meskipun memerlukan biaya besar untuk pencairan, transportasi hidrogen cair menawarkan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan dengan transportasi hidrogen gas bertekanan tinggi. Hidrogen cair dapat diangkut dalam volume yang lebih besar, sehingga mengurangi frekuensi pengiriman dan menekan biaya logistik. Dengan efisiensi yang meningkat ini, hidrogen cair menjadi pilihan yang semakin menarik untuk rantai pasokan hidrogen dalam skala besar. Teknologi baru yang dapat mengurangi energi yang dibutuhkan untuk proses kriogenik akan semakin meningkatkan keuntungan ekonomi dari transportasi hidrogen cair. Inovasi ini diharapkan membuat hidrogen cair lebih kompetitif dalam mendukung transisi energi bersih global.

Transportasi hidrogen cair juga penting dalam mendukung rantai pasokan energi berbasis hidrogen di seluruh dunia. Hidrogen cair dapat digunakan untuk berbagai aplikasi energi, termasuk transportasi, pembangkit listrik, dan industri berat. Dengan infrastruktur transportasi

yang terus berkembang, hidrogen cair diharapkan akan memainkan peran utama dalam transisi energi global, menggantikan bahan bakar fosil dengan sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Selain itu, transportasi hidrogen cair juga memungkinkan kolaborasi internasional yang lebih luas dalam penggunaan energi hidrogen, menciptakan peluang baru untuk inovasi dan perkembangan teknologi energi masa depan.

4.4 Faktor Utama Dalam Transportasi Hidrogen

Transportasi hidrogen merupakan bagian krusial dari rantai pasokan energi bersih yang semakin mendapat perhatian global. Hidrogen dianggap sebagai bahan bakar masa depan karena keunggulannya yang ramah lingkungan, namun tantangan utama dalam pengadopsiannya adalah efisiensi dan keamanan transportasinya. Dalam skala besar, faktor-faktor teknis seperti bentuk hidrogen yang diangkut, jarak pengiriman, dan moda transportasi yang digunakan sangat berpengaruh terhadap efektivitas sistem transportasi. Selain itu, penanganan hidrogen yang rentan terhadap kebocoran dan kebakaran menjadi pertimbangan penting dalam mendesain infrastruktur transportasi yang aman. Oleh karena itu, riset dan pengembangan terus berfokus pada meningkatkan efisiensi dan keamanan transportasi hidrogen untuk meminimalkan risiko dan biaya.

Salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan transportasi hidrogen adalah bentuk fisik hidrogen itu sendiri. Hidrogen dapat diangkut dalam tiga bentuk: gas, cair, atau dalam senyawa kimia seperti amonia atau metanol. Hidrogen gas bertekanan tinggi adalah metode yang paling umum digunakan, namun membutuhkan infrastruktur yang signifikan untuk menangani tekanan tinggi. Hidrogen cair menawarkan densitas energi yang lebih tinggi, namun memerlukan suhu kriogenik yang ekstrem untuk penyimpanannya, meningkatkan tantangan teknis dan biaya. Sementara itu, penggunaan senyawa kimia seperti amonia memungkinkan hidrogen diangkut dengan lebih mudah tetapi membutuhkan proses tambahan untuk memisahkan hidrogen sebelum digunakan. Pemilihan bentuk hidrogen yang tepat sangat bergantung pada kebutuhan operasional dan infrastruktur transportasi yang tersedia.

Infrastruktur transportasi menjadi faktor kunci lainnya. Sistem distribusi gas alam yang ada, misalnya, tidak dapat digunakan langsung untuk mengangkut hidrogen tanpa modifikasi. Ini karena hidrogen memiliki molekul yang jauh lebih kecil dibandingkan gas alam, sehingga cenderung lebih mudah bocor dari jaringan pipa yang tidak didesain khusus. Untuk mengatasi hal ini, pipa-pipa baru dengan material yang tahan terhadap sifat korosif hidrogen perlu dikembangkan. Selain itu, transportasi hidrogen cair memerlukan tangki kriogenik yang sangat terisolasi untuk menjaga suhu -253°C , yang membutuhkan investasi besar dalam pengadaan dan pemeliharaan. Infrastruktur pelabuhan dan stasiun pengisian juga perlu diperbarui agar dapat menangani hidrogen dengan aman, mencakup stasiun pengisian ulang untuk kendaraan hidrogen dan terminal pengangkutan massal.

Faktor keamanan adalah salah satu aspek paling penting dalam transportasi hidrogen, terutama karena sifatnya yang sangat mudah terbakar. Hidrogen memiliki rentang ledakan yang lebih luas dibandingkan bahan bakar fosil, artinya lebih mudah terjadi ledakan jika terjadi kebocoran. Karena hidrogen sangat ringan, kebocoran kecil dapat dengan cepat menyebar dan berpotensi menyebabkan kebakaran. Untuk itu, infrastruktur transportasi harus dilengkapi dengan teknologi deteksi kebocoran yang sangat sensitif dan sistem proteksi ledakan yang canggih. Selain itu, pelatihan bagi personel yang menangani hidrogen juga penting untuk memastikan bahwa mereka memahami risiko dan prosedur penanganan yang benar. Aspek keselamatan ini tidak bisa dianggap remeh mengingat potensi bahaya yang dapat ditimbulkan oleh hidrogen.

Efisiensi transportasi juga sangat dipengaruhi oleh jarak yang ditempuh. Hidrogen dalam bentuk gas atau cair memerlukan energi yang signifikan untuk kompresi atau pencairannya, sehingga biaya transportasi untuk jarak jauh menjadi tinggi. Pada jarak pendek, menggunakan truk dengan tangki bertekanan tinggi atau kriogenik masih dapat menjadi solusi praktis. Namun, untuk transportasi jarak jauh, moda transportasi seperti kereta api atau kapal laut dengan infrastruktur khusus diperlukan. Kapal tanker kriogenik, yang biasanya digunakan untuk gas alam cair (LNG), telah dimodifikasi untuk mengangkut hidrogen cair dalam jumlah besar antarnegara. Pada jarak yang sangat jauh, efisiensi transportasi hidrogen dalam bentuk senyawa kimia seperti amonia atau metanol bisa menjadi pilihan yang lebih ekonomis.

Selain itu, biaya energi yang diperlukan untuk mengangkut hidrogen juga merupakan faktor kritis dalam kelayakan ekonomi transportasi hidrogen. Proses pencairan hidrogen, misalnya, membutuhkan hingga 30% dari total energi yang terkandung dalam hidrogen itu sendiri, yang berarti ada kehilangan efisiensi yang signifikan. Proses kompresi untuk hidrogen gas juga tidak murah, mengingat tekanan yang diperlukan mencapai ratusan bar. Oleh karena itu, penelitian terus dilakukan untuk menemukan cara-cara yang lebih hemat energi dalam mentransportasikan hidrogen. Teknologi baru seperti penggunaan hidrogen dalam bentuk padatan atau material yang mampu menyerap hidrogen dengan densitas tinggi menjadi salah satu solusi yang sedang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi transportasi.

Teknologi tangki penyimpanan juga memainkan peran penting dalam transportasi hidrogen. Untuk hidrogen gas, tangki bertekanan tinggi harus dirancang agar dapat menahan tekanan hingga 700 bar tanpa bocor. Tangki ini umumnya terbuat dari material komposit yang kuat namun ringan, untuk mengoptimalkan kapasitas angkut. Sementara itu, untuk hidrogen cair, tangki kriogenik harus mampu mempertahankan suhu sangat rendah tanpa kehilangan banyak energi dalam bentuk panas. Isolasi termal yang baik dan desain tangki yang efisien menjadi kunci dalam meminimalkan kerugian akibat "boil-off" hidrogen selama transportasi. Pengembangan material tangki yang lebih efisien akan sangat menentukan keberhasilan sistem transportasi hidrogen di masa depan.

Regulasi dan standar internasional juga merupakan faktor yang tidak bisa diabaikan dalam transportasi hidrogen. Setiap negara memiliki regulasi yang berbeda terkait penanganan bahan bakar berbahaya, termasuk hidrogen. Agar transportasi hidrogen lintas negara dapat berjalan lancar, dibutuhkan harmonisasi standar keselamatan dan teknis yang diterapkan secara global. Organisasi seperti *International Maritime Organization (IMO)* dan *International Energy Agency (IEA)* telah mulai bekerja sama dalam mengembangkan standar ini, namun implementasi di lapangan memerlukan waktu dan kerja sama yang erat antarnegara. Kejelasan regulasi ini penting untuk memberikan kepastian hukum bagi perusahaan yang ingin berinvestasi dalam infrastruktur transportasi hidrogen.

Permintaan pasar juga akan mempengaruhi bagaimana hidrogen diangkut. Di masa depan, jika permintaan hidrogen terus meningkat, terutama untuk sektor transportasi dan industri berat, maka sistem transportasi hidrogen harus mampu mengimbangi kebutuhan tersebut. Pengembangan infrastruktur transportasi yang fleksibel dan efisien menjadi penting untuk memastikan pasokan hidrogen yang stabil. Selain itu, peningkatan permintaan juga dapat mendorong investasi dalam teknologi baru yang lebih efisien dan murah, yang pada akhirnya akan menurunkan biaya transportasi hidrogen. Perubahan dinamika pasar ini harus terus dipantau untuk memastikan bahwa rantai pasokan hidrogen tetap kompetitif.

Pengaruh geopolitik juga tidak bisa diabaikan dalam transportasi hidrogen. Seperti halnya minyak dan gas, hidrogen juga dapat menjadi komoditas strategis yang diperdagangkan antarnegara. Negara-negara yang memiliki potensi besar dalam produksi hidrogen dari energi terbarukan, seperti Australia atau negara-negara Timur Tengah, dapat menjadi eksportir utama hidrogen di masa depan. Namun, hal ini juga dapat memunculkan ketegangan geopolitik terkait kontrol atas infrastruktur transportasi, seperti pipa atau rute pengiriman maritim. Oleh karena itu, penting untuk membangun infrastruktur transportasi hidrogen yang aman dan terdistribusi dengan baik untuk menghindari risiko geopolitik yang berpotensi mengganggu pasokan hidrogen global.

Faktor keberlanjutan juga harus diperhatikan dalam transportasi hidrogen. Hidrogen dijual sebagai bahan bakar bersih, tetapi jika proses transportasinya tidak efisien atau menghasilkan emisi yang signifikan, maka manfaat lingkungan dari hidrogen akan berkurang. Oleh karena itu, sistem transportasi hidrogen harus didesain agar emisi karbon yang dihasilkan seminimal mungkin, baik dari moda transportasi yang digunakan maupun dari energi yang dibutuhkan untuk kompresi atau pencairan hidrogen. Ini juga berarti bahwa pengembangan transportasi hidrogen harus selaras dengan transisi menuju energi terbarukan yang lebih luas, termasuk elektrifikasi sistem transportasi yang mendukung.

Selain teknologi dan regulasi, kolaborasi internasional sangat diperlukan untuk mempercepat pengembangan infrastruktur transportasi hidrogen. Tidak setiap negara memiliki kapasitas untuk memproduksi hidrogen dalam jumlah besar, sehingga perdagangan internasional hidrogen menjadi solusi yang penting. Kolaborasi

antarnegara dalam hal teknologi, investasi, dan standar keselamatan akan mempercepat adopsi hidrogen sebagai bahan bakar bersih global. Selain itu, dengan adanya kolaborasi ini, negara-negara dapat memanfaatkan sumber daya alam mereka untuk berkontribusi dalam rantai pasokan hidrogen global, menciptakan keseimbangan baru dalam distribusi energi bersih di masa depan.

Inovasi teknologi merupakan faktor yang tidak bisa diabaikan dalam transportasi hidrogen. Berbagai pendekatan baru sedang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan keamanan transportasi hidrogen, termasuk pengembangan bahan penyimpan hidrogen baru, teknologi kompresi dan pencairan yang lebih hemat energi, serta sistem deteksi kebocoran yang lebih canggih. Inovasi ini akan memainkan peran penting dalam menentukan keberhasilan transisi energi berbasis hidrogen, terutama dalam menghadapi tantangan transportasi jarak jauh. Di masa depan, teknologi baru ini diharapkan dapat mengurangi biaya transportasi hidrogen dan membuatnya lebih kompetitif dibandingkan bahan bakar fosil.

Investasi infrastruktur juga merupakan tantangan besar dalam transportasi hidrogen. Pembangunan pipa baru, fasilitas penyimpanan, terminal pengisian, dan moda transportasi khusus membutuhkan biaya yang signifikan. Investasi ini mungkin sulit bagi negara-negara atau perusahaan yang belum memiliki kapasitas ekonomi yang besar. Namun, dengan meningkatnya permintaan global untuk hidrogen, potensi pengembalian investasi dari sektor ini juga semakin besar. Dengan dukungan kebijakan pemerintah dan kerja sama sektor swasta, pembangunan infrastruktur transportasi hidrogen dapat menjadi pilar utama dalam revolusi energi global.

Dalam konteks transisi energi global, peran pemerintah juga tidak bisa dikesampingkan. Pemerintah memiliki tanggung jawab untuk menyediakan insentif dan regulasi yang mendukung pengembangan infrastruktur transportasi hidrogen. Selain itu, pemerintah juga perlu memfasilitasi riset dan pengembangan untuk teknologi baru yang dapat mengatasi berbagai tantangan teknis dalam transportasi hidrogen. Kebijakan publik yang mendukung hidrogen sebagai bahan bakar masa depan, termasuk insentif pajak dan subsidi untuk infrastruktur, akan sangat penting untuk mempercepat adopsi hidrogen dalam skala besar.

Terakhir, kebutuhan pelatihan sumber daya manusia juga menjadi faktor penting dalam transportasi hidrogen. Karena hidrogen adalah bahan bakar yang baru dan memiliki risiko khusus, personel yang menangani hidrogen harus memiliki keahlian yang tinggi dalam pengoperasian sistem transportasi hidrogen. Pelatihan khusus perlu diberikan untuk memastikan bahwa mereka memahami prosedur keselamatan, pengelolaan risiko, dan penggunaan teknologi canggih dalam menangani hidrogen. Dengan sumber daya manusia yang terampil, sistem transportasi hidrogen dapat dioperasikan dengan lebih aman dan efisien, meminimalkan risiko kecelakaan dan meningkatkan keandalan rantai pasokan.

4.5 Teknologi Dan Inovasi Masa Depan

Transportasi hidrogen merupakan salah satu elemen penting dalam membangun ekonomi hidrogen, terutama sebagai bagian dari solusi energi bersih di masa depan. Namun, tantangan teknis dalam mentransportasikan hidrogen dalam jumlah besar dengan aman dan efisien membutuhkan teknologi dan inovasi terbaru. Teknologi yang digunakan dalam transportasi hidrogen perlu mempertimbangkan karakteristik fisik dan kimia hidrogen, yang memiliki densitas energi rendah dan mudah bocor, serta sifatnya yang sangat reaktif. Berbagai inovasi telah dikembangkan untuk mengatasi tantangan ini, mulai dari penyimpanan hidrogen dalam bentuk gas bertekanan tinggi hingga pengangkutan hidrogen cair pada suhu kriogenik. Selain itu, metode transportasi yang melibatkan konversi hidrogen menjadi senyawa kimia yang lebih stabil seperti amonia juga menjadi fokus penelitian.

Teknologi transportasi hidrogen yang paling umum saat ini adalah pipa hidrogen yang dapat mengalirkan hidrogen dalam bentuk gas dari satu titik ke titik lainnya. Namun, hidrogen memiliki molekul yang sangat kecil sehingga lebih mudah bocor daripada gas lainnya, seperti metana. Oleh karena itu, pipa hidrogen harus terbuat dari material khusus yang mampu menahan sifat korosif hidrogen dan mencegah kebocoran. Beberapa inovasi material baru telah diperkenalkan, seperti pipa komposit dan lapisan anti-korosi yang dapat meningkatkan ketahanan pipa terhadap tekanan tinggi dan sifat korosif hidrogen. Selain itu, sensor canggih untuk mendeteksi kebocoran dan perubahan tekanan

dalam pipa juga telah dikembangkan untuk meningkatkan keamanan sistem pipa hidrogen.

Pengangkutan hidrogen cair menawarkan densitas energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan hidrogen gas, tetapi membutuhkan suhu kriogenik yang ekstrem, yakni -253°C . Untuk menjaga suhu ini selama transportasi, tangki kriogenik dengan insulasi termal tinggi diperlukan. Teknologi tangki kriogenik terus berkembang untuk mengurangi kehilangan energi selama pengangkutan akibat penguapan atau "boil-off" hidrogen cair. Salah satu inovasi penting dalam bidang ini adalah penggunaan material insulasi berbasis vakum yang mampu mengurangi transfer panas secara signifikan, sehingga memperpanjang waktu transportasi tanpa kehilangan energi yang besar. Selain itu, kontrol suhu otomatis dan sistem pengukuran tekanan juga ditingkatkan untuk menjaga stabilitas hidrogen selama perjalanan.

Teknologi kompresi juga menjadi fokus dalam transportasi hidrogen, khususnya untuk pengangkutan dalam bentuk gas bertekanan tinggi. Hidrogen umumnya disimpan dalam tangki dengan tekanan hingga 700 bar, yang memerlukan kompresor yang sangat efisien untuk menghemat energi selama proses kompresi. Inovasi dalam desain kompresor, seperti kompresor dengan friksi rendah dan penggunaan material yang lebih tahan lama, telah mampu meningkatkan efisiensi proses ini. Selain itu, teknologi penghematan energi, seperti pemulihan panas dari proses kompresi, juga sedang dikembangkan untuk mengurangi kehilangan energi selama kompresi hidrogen.

Selain kompresi, teknologi konversi hidrogen menjadi senyawa kimia seperti amonia dan metanol juga sedang dieksplorasi sebagai metode transportasi alternatif. Amonia memiliki keuntungan karena dapat disimpan dan diangkut dengan lebih mudah pada kondisi standar dibandingkan hidrogen gas atau cair. Setelah tiba di lokasi tujuan, amonia dapat dikonversi kembali menjadi hidrogen untuk digunakan sebagai bahan bakar. Inovasi dalam teknologi katalisis dan elektrolisis telah mempercepat proses konversi ini, membuatnya lebih efisien dan hemat biaya. Selain itu, penelitian dalam penggunaan senyawa kimia lain seperti cairan organik pembawa hidrogen (LOHC) juga terus berkembang sebagai metode transportasi yang lebih aman dan praktis.

Penggunaan kapal tanker kriogenik khusus untuk pengangkutan hidrogen cair juga merupakan inovasi penting dalam transportasi lintas benua. Kapal tanker ini biasanya memiliki kapasitas besar dan mampu mengangkut hidrogen dalam jumlah signifikan dalam bentuk cair pada suhu kriogenik. Pengembangan desain kapal tanker ini melibatkan peningkatan sistem insulasi termal untuk mengurangi boil-off selama perjalanan laut yang panjang. Selain itu, penggunaan sistem manajemen energi yang canggih, yang dapat memanfaatkan gas hidrogen yang menguap selama perjalanan untuk menghasilkan listrik bagi kapal, telah diperkenalkan untuk meningkatkan efisiensi operasional kapal. Inovasi ini memungkinkan pengangkutan hidrogen dalam skala besar menjadi lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

Inovasi dalam pengangkutan hidrogen melalui truk tangki juga terus mengalami perkembangan, terutama untuk distribusi hidrogen dalam jarak pendek hingga menengah. Tangki bertekanan tinggi yang dipasang pada truk harus dirancang agar ringan tetapi mampu menahan tekanan tinggi tanpa risiko kebocoran. Penggunaan material komposit dan serat karbon dalam konstruksi tangki truk telah menjadi terobosan penting untuk mengurangi berat tangki tanpa mengorbankan kekuatannya. Selain itu, sistem monitoring tekanan dan suhu real-time yang terintegrasi dalam truk memungkinkan operator untuk mengendalikan kondisi hidrogen selama perjalanan, sehingga meningkatkan keamanan transportasi.

Salah satu inovasi yang semakin diperhatikan adalah transportasi hidrogen melalui kereta api, yang menawarkan kapasitas besar dan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan moda transportasi lainnya untuk jarak menengah hingga jauh. Kereta api tangki kriogenik, yang serupa dengan kapal tanker, dapat mengangkut hidrogen dalam bentuk cair dalam jumlah besar. Selain itu, penggunaan kereta berbasis hidrogen untuk penggerakannya sendiri sedang dikembangkan sebagai bagian dari konsep transportasi berkelanjutan, di mana hidrogen tidak hanya diangkut tetapi juga digunakan sebagai bahan bakar untuk kereta. Ini menciptakan sistem transportasi yang sepenuhnya bebas emisi, yang mendukung transisi menuju ekonomi berbasis hidrogen.

Teknologi penyimpanan hidrogen dalam bahan padat atau solid-state hydrogen storage merupakan area lain dari inovasi transportasi hidrogen yang sangat menjanjikan. Beberapa material, seperti logam

hidrida, mampu menyerap hidrogen dengan densitas tinggi dan melepaskannya kembali saat dibutuhkan. Teknologi ini tidak memerlukan kompresi atau pendinginan ekstrem, sehingga mengurangi kebutuhan energi selama transportasi. Penelitian dalam pengembangan material baru untuk penyimpanan hidrogen ini terus dilakukan, dengan fokus pada peningkatan kapasitas penyimpanan dan kemudahan pelepasan hidrogen. Selain itu, teknologi ini dianggap lebih aman dibandingkan dengan penyimpanan dalam bentuk gas bertekanan tinggi atau cair karena tidak memerlukan tekanan atau suhu ekstrem.

Di bidang keamanan, inovasi dalam sistem deteksi kebocoran hidrogen telah mengalami kemajuan pesat. Karena sifat hidrogen yang tidak berwarna, tidak berbau, dan sangat mudah terbakar, sistem deteksi kebocoran yang akurat dan responsif sangat penting. Teknologi sensor modern, seperti sensor berbasis serat optik dan sensor gas canggih, telah dikembangkan untuk mendeteksi kebocoran hidrogen dengan tingkat akurasi tinggi. Sensor ini dapat dipasang di sepanjang pipa, tangki, dan kendaraan pengangkut hidrogen, serta dilengkapi dengan sistem alarm otomatis yang dapat segera memberitahukan kebocoran dan mengambil langkah-langkah mitigasi. Inovasi ini membantu meningkatkan keselamatan operasional transportasi hidrogen secara keseluruhan.

Selain sensor kebocoran, sistem perlindungan ledakan untuk transportasi hidrogen juga mengalami peningkatan. Sistem ini dirancang untuk merespons secara cepat dalam situasi darurat, seperti kebakaran atau ledakan akibat kebocoran hidrogen. Pengembangan material tahan ledakan untuk tangki dan pipa hidrogen telah menjadi salah satu area fokus, di mana material ini dapat menahan tekanan tinggi yang dihasilkan oleh ledakan hidrogen. Selain itu, teknologi pengamanan aktif, seperti katup otomatis yang menutup saat terdeteksi anomali, juga telah diterapkan untuk mencegah eskalasi kejadian yang lebih buruk.

Penggunaan drone untuk inspeksi infrastruktur transportasi hidrogen juga telah menjadi inovasi yang membantu meningkatkan efisiensi dan keselamatan. Drone dilengkapi dengan kamera termal dan sensor gas hidrogen untuk memeriksa kondisi pipa, tangki, dan fasilitas penyimpanan dari jarak jauh. Teknologi ini memungkinkan deteksi dini masalah potensial, seperti kebocoran atau kerusakan, tanpa memerlukan inspeksi manual yang lebih berisiko. Inovasi ini sangat penting untuk

pemeliharaan infrastruktur transportasi hidrogen yang tersebar luas, seperti pipa dan terminal, terutama di wilayah yang sulit dijangkau.

Inovasi teknologi juga mencakup pengembangan jaringan pipa hidrogen bertekanan rendah yang dapat diintegrasikan dengan infrastruktur energi yang ada. Mengingat bahwa membangun jaringan pipa baru untuk hidrogen membutuhkan investasi besar, inovasi ini memungkinkan penggunaan jaringan pipa gas alam yang sudah ada dengan beberapa modifikasi. Teknologi blending hidrogen dengan gas alam, yang dapat mengurangi kebutuhan infrastruktur baru, sedang diuji coba di beberapa negara. Dengan cara ini, hidrogen dapat didistribusikan melalui jaringan pipa gas alam yang sudah ada, meskipun pada kadar campuran yang rendah, sambil menunggu pengembangan infrastruktur khusus hidrogen.

Penggunaan kecerdasan buatan (AI) dalam transportasi hidrogen juga semakin diperhatikan, terutama untuk mengoptimalkan rute transportasi, mengelola risiko, dan meningkatkan efisiensi operasional. Sistem AI dapat menganalisis data dalam jumlah besar dari sensor dan sistem manajemen energi untuk memprediksi potensi masalah, mengoptimalkan penggunaan energi, serta memastikan pengiriman hidrogen tepat waktu. dapat digunakan untuk memantau kondisi lingkungan sekitar pipa dan tangki, serta memberikan rekomendasi untuk perawatan preventif yang diperlukan. Penggunaan AI dalam transportasi hidrogen menjanjikan efisiensi operasional yang lebih tinggi dan pengelolaan risiko yang lebih baik.

Dalam konteks global, kolaborasi internasional untuk mengembangkan teknologi transportasi hidrogen yang lebih baik dan lebih aman sangat penting. Negara-negara dengan kemampuan teknis dan sumber daya finansial yang berbeda dapat bekerja sama untuk membangun standar internasional, berbagi pengetahuan, dan mempercepat adopsi teknologi. Forum dan konsorsium internasional memainkan peran kunci dalam mengkoordinasikan upaya riset dan pengembangan, serta mengatasi tantangan global terkait transportasi hidrogen. Dengan sinergi internasional, pengembangan dan penerapan teknologi transportasi hidrogen dapat dilakukan secara lebih terkoordinasi dan efektif.

Secara keseluruhan, pengembangan teknologi dan inovasi dalam transportasi hidrogen adalah kunci untuk mengatasi tantangan yang ada dan mewujudkan potensi penuh hidrogen sebagai bahan bakar bersih. Dengan terus melakukan penelitian, berinvestasi dalam infrastruktur, dan menerapkan teknologi canggih, kita dapat memastikan bahwa sistem transportasi hidrogen dapat dioperasikan dengan aman, efisien, dan ekonomis. Peran penting dari berbagai sektor, mulai dari pemerintah, industri, hingga akademika, akan menentukan keberhasilan transisi energi menuju masa depan yang berkelanjutan dan rendah karbon. Inovasi dalam transportasi hidrogen akan menjadi pilar utama dalam menciptakan rantai pasokan energi global yang lebih bersih dan lebih efisien.

4.6 Studi Kasus Proyek Hidrogen

Studi Kasus: Proyek Transportasi Hidrogen yang Berhasil menawarkan wawasan mendalam tentang implementasi praktis teknologi hidrogen dalam skala besar. Salah satu contoh utama adalah HySTRA (*Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association*), sebuah proyek yang diluncurkan di Jepang untuk mengembangkan rantai pasokan hidrogen global. Proyek ini berfokus pada memproduksi hidrogen dari batu bara di Australia dan mengangkutnya dalam bentuk cair ke Jepang. Ini menjadi salah satu proyek pionir dalam mengatasi tantangan teknis dan logistik transportasi hidrogen lintas benua, serta mendemonstrasikan kelayakan teknologi dalam kondisi nyata. HySTRA tidak hanya menandai terobosan dalam transportasi hidrogen, tetapi juga menetapkan standar untuk proyek masa depan. Pada fase pertama proyek HySTRA, teknologi pencairan hidrogen diuji coba di pabrik skala komersial di Latrobe Valley, Australia. Batu bara dari daerah tersebut digunakan untuk menghasilkan hidrogen, yang kemudian dicairkan dan diangkut ke Jepang menggunakan kapal tanker kriogenik khusus. Proses pencairan ini berlangsung pada suhu sangat rendah (-253°C), menuntut penggunaan teknologi insulasi termal canggih untuk mencegah kehilangan hidrogen selama transportasi. Setelah tiba di Jepang, hidrogen cair disimpan dalam tangki kriogenik dan diubah kembali menjadi gas untuk didistribusikan melalui jaringan gas atau digunakan sebagai bahan bakar di sektor industri. Keberhasilan fase

ini membuktikan kelayakan pencairan dan transportasi hidrogen dalam skala besar.

Inovasi utama dari HySTRA adalah pengembangan kapal tanker kriogenik pertama di dunia yang dirancang khusus untuk mengangkut hidrogen cair. Kapal ini, bernama Suiso Frontier, mampu mengangkut hidrogen cair dalam jumlah besar dalam kondisi suhu kriogenik. Teknologi yang digunakan dalam kapal ini meliputi sistem insulasi termal berbasis vakum dan tangki penyimpanan berlapis khusus yang menjaga stabilitas hidrogen cair selama perjalanan panjang. Selain itu, kapal ini dilengkapi dengan sensor yang secara real-time memonitor suhu dan tekanan hidrogen, serta sistem keamanan canggih untuk mengantisipasi potensi kebocoran atau ledakan. Pengembangan Suiso Frontier menjadi pencapaian penting dalam teknologi transportasi hidrogen di lautan. Dalam proyek ini, tantangan keamanan merupakan prioritas utama, mengingat sifat hidrogen yang sangat mudah terbakar dan potensinya untuk bocor. Sistem deteksi kebocoran yang sensitif dikembangkan dan dipasang di seluruh rantai pasokan, mulai dari produksi hingga pengangkutan dan penyimpanan. Selain itu, prosedur keselamatan yang ketat diterapkan, termasuk simulasi insiden darurat untuk melatih personel dalam menangani kebocoran atau kegagalan sistem. HySTRA berhasil mengatasi tantangan ini dengan tidak hanya memperkenalkan teknologi sensor baru, tetapi juga melalui pelatihan khusus bagi pekerja untuk meningkatkan kesadaran keselamatan di lapangan. Hal ini menunjukkan bahwa keamanan dalam transportasi hidrogen dapat dicapai melalui kombinasi teknologi canggih dan pelatihan manusia yang tepat.

Dukungan pemerintah Jepang terhadap HySTRA juga sangat penting untuk keberhasilannya. Pemerintah Jepang melihat hidrogen sebagai pilar transisi energi dan mendukung proyek ini melalui insentif fiskal dan regulasi yang mendukung infrastruktur hidrogen. HySTRA mendapatkan bantuan dari berbagai kementerian untuk mempercepat pengembangan infrastruktur pendukung, seperti terminal hidrogen di pelabuhan dan fasilitas penyimpanan di lokasi pengguna akhir. Dengan adanya kerangka kebijakan yang jelas dan dukungan finansial, proyek ini berhasil berjalan sesuai jadwal dan mencapai target-target yang telah ditetapkan. Keterlibatan pemerintah ini menunjukkan betapa pentingnya dukungan politik dalam pengembangan teknologi energi baru.

Selain itu, kerjasama internasional antara Jepang dan Australia memainkan peran penting dalam keberhasilan proyek HySTRA. Australia sebagai negara penghasil hidrogen memiliki sumber daya alam yang melimpah, sementara Jepang memiliki teknologi dan infrastruktur untuk mendistribusikan dan memanfaatkan hidrogen. Kerjasama ini menciptakan sinergi antara dua negara dengan kepentingan yang berbeda, namun saling melengkapi dalam rantai pasokan hidrogen global. Proyek ini juga membuka jalan bagi kerja sama di masa depan untuk mengembangkan lebih banyak jalur transportasi hidrogen lintas negara dan benua. Keberhasilan HySTRA menyoroti pentingnya kolaborasi internasional dalam menciptakan ekonomi hidrogen yang berkelanjutan.

Di sisi lain, HySTRA juga berperan penting dalam meningkatkan kesadaran publik tentang potensi hidrogen sebagai bahan bakar masa depan. Melalui berbagai kampanye informasi dan partisipasi di forum energi internasional, proyek ini memperkenalkan hidrogen kepada masyarakat luas dan mengkomunikasikan manfaatnya untuk lingkungan dan ekonomi. Peningkatan kesadaran publik ini menjadi krusial dalam mendukung penerimaan hidrogen secara sosial, baik dari segi teknologi maupun ekonomi. HySTRA berhasil menumbuhkan kepercayaan publik terhadap hidrogen, yang pada gilirannya memperkuat basis dukungan politik dan finansial untuk proyek-proyek masa depan.

Keberhasilan HySTRA juga memberikan pelajaran penting dalam hal inovasi teknologi. Pengalaman dari proyek ini membantu memajukan teknologi pencairan, penyimpanan, dan transportasi hidrogen, yang sebelumnya hanya diuji coba di laboratorium atau skala kecil. Selain itu, proyek ini menjadi platform uji coba untuk teknologi sensor keamanan, insulasi termal, dan kapal pengangkut kriogenik yang lebih efisien. Pengetahuan yang dihasilkan dari HySTRA kini sedang diterapkan dalam proyek hidrogen serupa di seluruh dunia, mempercepat adopsi teknologi hidrogen sebagai bahan bakar bersih.

Skalabilitas proyek menjadi salah satu tantangan yang dihadapi HySTRA, terutama ketika mempertimbangkan peningkatan produksi dan distribusi hidrogen dalam skala global. Meskipun berhasil pada tingkat proyek percontohan, pengembangan skala industri memerlukan infrastruktur yang jauh lebih besar dan investasi yang signifikan. HySTRA telah membuktikan bahwa teknologi ini dapat berfungsi dalam skala kecil

hingga menengah, tetapi penerapan dalam skala industri akan membutuhkan pengembangan lebih lanjut dalam hal efisiensi biaya, keamanan, dan logistik. Studi lanjutan sedang dilakukan untuk mengidentifikasi cara-cara meningkatkan produksi hidrogen dengan biaya lebih rendah dan mengoptimalkan rantai pasokan global.

Pada akhirnya, HySTRA merupakan tonggak penting dalam pengembangan teknologi transportasi hidrogen, memberikan bukti nyata bahwa hidrogen dapat diangkut dalam jumlah besar dan digunakan sebagai bagian dari solusi energi global. Keberhasilan proyek ini memberikan landasan bagi pengembangan proyek-proyek hidrogen lainnya di seluruh dunia. Dengan inovasi teknologi dan dukungan politik yang terus berkembang, HySTRA menunjukkan bahwa hidrogen memiliki potensi besar sebagai bahan bakar bersih yang dapat mentransformasi lanskap energi global. Proyek ini tidak hanya penting dari segi teknis, tetapi juga menunjukkan bagaimana kolaborasi internasional, inovasi, dan komitmen terhadap keberlanjutan dapat mendorong transisi energi menuju masa depan yang lebih hijau

BAB 5

HIDROGEN SEBAGAI BAHAN BAKAR PEMBAKARAN DALAM

5.1 Pendahuluan

Jika kita ingin mengurangi jejak karbon dalam energi kita, sumber energi terbarukan adalah jalan keluarnya. Sumber energi terbarukan dapat dikonsumsi secara langsung, seperti biogas, atau dapat diubah menjadi listrik seperti tenaga air, tenaga surya, dan tenaga angin. Namun, sumber energi terbarukan memiliki tantangan tersendiri: ketika listrik diproduksi, listrik tersebut tidak selalu sesuai dengan permintaan dari jaringan listrik. Sumber energi terbarukan dapat dikendalikan, seperti tenaga air misalnya, yang berarti dapat mengatur daya listrik dengan mengatur aliran air, atau dapat bergantung pada cuaca seperti tenaga surya dan tenaga angin dengan sedikit kendali pada pembangkitan listrik. Jika kita ingin memanfaatkan sepenuhnya potensi dayanya, kita perlu menyimpan listrik yang dihasilkannya dan hidrogen memiliki potensi besar dalam hal itu.

Sifat fisik hidrogen menjadikannya kandidat potensial yang penting untuk menggantikan bahan bakar fosil dalam energi berikutnya. Hidrogen dapat diproduksi melalui teknologi tradisional maupun teknologi baru yang diterapkan dalam proses kimia dan elektrokimia. Namun, sebagai molekul terkecil dari semuanya, hidrogen menimbulkan tantangan serius bagi komponen sistem penyimpanan dan pengangkutannya. Karena alasan ini, bahan pipa dan katup harus dipilih dengan cermat, sementara sambungan dan koneksi perlu disegel dengan benar untuk menghindari masalah degradasi dan kebocoran.

5.2 Properties Bahan Bakar Hidrogen

Bahan bakar hidrogen memiliki sifat fisik dan kimia sebagai bahan bakar alternatif, terutama untuk aplikasi yang berfokus pada pengurangan emisi dan keberlanjutan energi. Berikut adalah beberapa properti utama bahan bakar hidrogen:

Sifat Fisik

Hidrogen adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan mudah terbakar. Gas ini lebih ringan daripada udara dan tidak larut dalam air. Sifat fisik lainnya disajikan dalam Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Properties Fisik Hidrogen

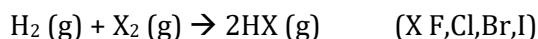
No	Properties	Unit
1	Molekul	H ₂
2	Fase pada STP	Gas
3	Titik leleh	14,025 °K
4	Titik didih	20,268 °K
5	Volume molar	11,42 · 10 ⁻³ m ³ mol
6	Entalpi penguapan	0,44936 kJ/mol
7	Entalpi fusi	0,05868 kJ/mol
8	Kepadatan	0,0899 kg/m ³
9	Kecepatan suara	1270 m/s pada 298,15 °K
10	Elektronegativitas	2,2 (skala Pauling)
11	Kapasitas kalor jenis	14304 J/(kgK)
12	Konduktivitas listrik	N/A
13	Konduktivitas termal	0,1815 W/(mK)
14	Energi ionisasi	1312,06 kJ/mol
15	Nilai kalor terendah	110,9–10,1 (MJ/kg–MJ/Nm ³)
16	Energi penyalan minimum	0,02 mJ
17	Kecepatan nyala stoikiometris	2.37 m/s
18	Kepadatan	0.084 kg/m ³
19	Titik didih	20.4 °K
20	Titik kritis	32.9 °K
21	Kapasitas jenis	14.9 kJ/(kg.K)
22	Batas mudah terbakar (berdasarkan persentase volume)	4-75%

Sifat Kimia

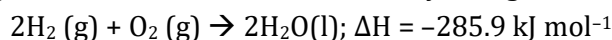
Sebagian besar perilaku kimia hidrogen ditentukan oleh entalpi disosiasi ikatan. Entalpi disosiasi ikatan H–H adalah yang tertinggi untuk ikatan tunggal antara dua atom unsur apa pun. Selain itu, ia relatif inert pada suhu kamar karena entalpi ikatan H–H yang tinggi. Jadi, atom

hidrogen diproduksi pada suhu tinggi dalam busur listrik atau di bawah radiasi ultraviolet. Karena orbitalnya tidak lengkap dengan konfigurasi elektronik $1s^1$, ia bergabung dengan hampir semua unsur. Ia melakukan reaksi dengan (i) kehilangan satu-satunya elektron untuk menghasilkan H^+ , (ii) perolehan elektron untuk membentuk H^- , dan (iii) berbagi elektron untuk membentuk ikatan kovalen tunggal. Kimia hidrogen dapat diilustrasikan oleh reaksi berikut:

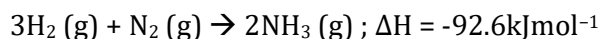
Reaksi dengan halogen: Bereaksi dengan halogen, X_2 menghasilkan hidrogen halida, HX ,



Sementara reaksi dengan fluor terjadi bahkan dalam kegelapan, dengan yodium memerlukan katalis. Reaksi dengan dioksigen: Bereaksi dengan dioksigen untuk membentuk air. Reaksinya sangat eksotermik.



Reaksi dengan dinitrogen: Dengan dinitrogen membentuk amonia



Hidrogen sebagai bahan bakar menawarkan potensi besar untuk masa depan energi bersih dan berkelanjutan. Pengembangan teknologi penyimpanan, transportasi, dan produksi hidrogen yang lebih efisien dan aman akan menjadi kunci untuk realisasi potensi ini.

5.3 Hidrogen Sebagai Bahan Bakar Pilot

Menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar pilot dalam sistem dual-fuel dengan mesin diesel adalah konsep yang menggabungkan keunggulan hidrogen sebagai bahan bakar bersih dengan efisiensi mesin diesel. Dalam sistem ini, hidrogen digunakan sebagai bahan bakar utama sementara diesel digunakan sebagai bahan bakar pilot untuk memulai pembakaran. Berikut adalah penjelasan lebih rinci tentang konsep ini:

Cara Kerja

1. Injeksi Hidrogen:

Hidrogen disimpan dalam tangki bertekanan tinggi dan diinjeksikan ke dalam ruang bakar mesin bersama dengan udara selama langkah hisap. Hidrogen bercampur dengan udara di ruang bakar, membentuk campuran yang siap dibakar.

2. Injeksi Bahan Bakar Pilot:

Bahan bakar diesel diinjeksikan sebagai bahan bakar pilot pada akhir langkah kompresi. Bahan bakar diesel menyulut campuran hidrogen-udara, memulai pembakaran.

3. Pembakaran:

Setelah bahan bakar diesel menyulut campuran hidrogen-udara, hidrogen terbakar dengan cepat dan efisien. Proses ini menghasilkan tenaga mekanis yang digunakan untuk menggerakkan mesin dan kendaraan.

Implementasi

1. Modifikasi Mesin Diesel:

Mesin diesel yang ada dapat dimodifikasi untuk menggunakan sistem dual fuel dengan menambahkan tangki hidrogen dan sistem injeksi hidrogen. Perangkat lunak kontrol mesin juga perlu diperbarui untuk mengelola pembakaran dual fuel.

2. Pengembangan Infrastruktur:

Stasiun pengisian hidrogen perlu dikembangkan untuk mendukung kendaraan dual fuel hidrogen-diesel. Investasi dalam produksi hidrogen hijau diperlukan untuk memastikan pasokan hidrogen yang berkelanjutan.

3. Prototipe dan Pengujian:

Pengembangan prototipe kendaraan dual fuel dan pengujian lapangan untuk memastikan kinerja, efisiensi, dan keandalan. Penelitian dan pengembangan lebih lanjut untuk mengoptimalkan sistem dual fuel dan mengatasi tantangan teknis.

Menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar pilot dalam sistem dual-fuel diesel menawarkan solusi yang menarik untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi bahan bakar. Meskipun ada tantangan dalam hal penyimpanan, keamanan, dan biaya, teknologi ini dapat menjadi langkah penting menuju transisi energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Dengan perkembangan teknologi dan peningkatan infrastruktur, kendaraan dual fuel hidrogen-diesel dapat memainkan peran penting dalam masa depan transportasi yang ramah lingkungan.

5.4 Penelitian Terkait Diesel Dual Fuel

Sethil Kumar dkk melakukan penelitian pemasukan gas Hidrogen pada mesin diesel berbahan bakar minyak nabati yang berasal dari minyak jarak pagar. Tujuan dari penelitian tersebut untuk mengetahui kinerja dan emisi gas buang mesin diesel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan biodiesel minyak jarak dengan konsentrasi Hidrogen 7% dapat meningkatkan *break thermal efficiency* (BTE) sebesar 2% pada beban penuh. Kemudian penambahan Hidrogen juga meningkatkan penundaan pengapian, tekanan puncak dan laju kenaikan tekanan maksimum. Durasi pembakaran berkurang karena kecepatan pembakaran hidrogen yang lebih tinggi. Laju pembakaran premix yang lebih tinggi diamati dengan penambahan gas hidrogen. Dengan induksi hidrogen, karena laju pembakaran yang tinggi, maka emisi NO_x meningkat dari 735 menjadi 875 ppm pada beban penuh. Asap berkurang dari 4,4 menjadi 3,7 BSU. Pengurangan emisi HC dan CO dari 130 menjadi 100 ppm dan 0,26-0,17% volume masing-masing pada daya maksimum (28).

Boophathi dkk melakukan percobaan untuk mengetahui kinerja mesin ketika dimasukkan gas hidrogen dengan jumlah kecil dan campuran minyak sawit yang diinjeksikan sebagai bahan bakar pilot kedalam mesin diesel dual fuel dengan cara konvensional. Pengujian dilakukan pada mesin satu silinder, 4 langkah, berpendingin air, mesin diesel injeksi langsung yang berjalan pada kecepatan konstan 1500 rpm dalam aliran hidrogen 5 dan 10 liter per menit. Dari hasil penelitian menunjukkan penambahan biodiesel jenis POME dengan konsentrasi Hidrogen 5lpm pada beban penuh mengalami kenaikan BTE 2% dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Hal tersebut disebabkan oleh nilai kalor yang terkandung di dalam Hidrogen lebih tinggi dari biodiesel POME. Selain itu penambahan hidrogen kedalam bahan bakar biodiesel pada beban penuh juga menurunkan EGT. Dilihat dari emisi gas buang, dengan penambahan Hidrogen dapat menurunkan emisi HC berkurang dari 34 menjadi 31,5 ppm, pada beban maksimum. Sedangkan emisi CO berkurang dari 0,09% menjadi 0,045% volume pada beban maksimum. Karena laju pembakaran yang lebih tinggi dengan induksi hidrogen, maka emisi NO_x meningkat dari 756 menjadi 926 ppm, pada beban maksimum (29)

Uludamar dkk melakukan penelitian penggunaan gas HHO dan Hidrogen pada mesin diesel dengan bahan bakar pilot biodiesel, tujuan dari penelitian untuk mengetahui emisi gas buang mesin diesel dual fuel. Biodiesel yang digunakan berbahan dasar dari microalga. Biodiesel dari microalga dicampur sebanyak 20% kedalam bahan bakar diesel, mesin yang digunakan adalah mesin diesel empat langkah dengan empat silinder. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan bahan bakar biodiesel 20% kedalam mesin diesel dapat langsung digunakan tanpa memodifikasi mesin. Penurunan torsi dan daya sebesar 4,1% pada bahan bakar Microalga Biodiesel 20% (MB20), namun dengan adanya penambahan gas Hidrogen dapat meningkatkan torsi dan daya yang dihasilkan. Penambahan HHO dan hidrogen mengurangi emisi CO dan CO₂ karena gas tidak mengandung atom karbon. Kenaikan emisi NO_x tidak signifikan pada beban rendah, namun berbeda pada beban tinggi yang kenaikannya NO_x sangat signifikan. Hal tersebut disebabkan kenaikan temperature di dalam ruang bakar karena nilai kalor pada Hidrogen yang tinggi (30)

Akcahy dkk melakukan eksperimen pada pencampuran biodiesel 25% (B25) pada bahan bakar diesel yang ditambahkan Hidrogen. Biodiesel berasal dari bahan *Waste Coking Oil Biodiesel* (WCOB). Pengujian dilakukan pada mesin diesel empat silinder, empat langkah, berpendingin air, 1,461-L, menggunakan turbocharged. Pengujian engine dilakukan pada kecepatan engine tetap 1750 rpm dan pada beban engine yang beragam yaitu 40, 60, dan 80 Nm. Hidrogen ditambahkan ke udara masuk dengan kecepatan aliran 10, 20, 30 dan 40 lpm. Tujuan untuk mengetahui pengaruh terhadap kinerja dan emisi mesin diesel. Hasil yang didapat adalah hidrogen memiliki efek positif pada konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC) untuk semua kondisi pengujian, untuk bahan bakar biodiesel masih diatas bahan bakar diesel pada semua kondisi pengujian. Penambahan Hidrogen meningkatkan temperatur gas buang (EGTs) dan tekanan silinder (CPs). Emisi NO_x dan total hidrokarbon (THC) menurun dengan penambahan hidrogen hingga 30 lpm pada beban mesin 40 dan 60 Nm. Di sisi lain, mereka meningkat pada beban mesin 80 Nm untuk semua penambahan hidrogen. Sementara emisi CO₂ dan O₂ menurun dengan penambahan hidrogen. Diketahui bahwa nilai 30 lpm merupakan kondisi optimum laju penambahan hydrogen (31)

Tutak dkk melakukan penelitian dengan penambahan Hidrogen

pada bahan bakar biodiesel di mesin diesel satu silinder berpendingin udara, Hidrogen dimasukkan pada intake manifold yang dikontrol oleh sistem elektrik. Kecepatan mesin konstan 1500rpm. Mesin bekerja dengan beban konstan yang ditentukan dengan indikasi tekanan efektif rata-rata (IMEP) dengan nilai IMEP = 0,7 MPa. Setiap pengambilan data ditetapkan sebanyak 200 siklus. Variasi Hidrogen untuk menggantikan energi biodiesel mulai dari 0, 2, 5, 11, 21, 38 %. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui proses pembakaran, stabilitas pembakaran, dan emisi gas buang mesin diesel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembakaran bersama biodiesel dengan hidrogen memberikan keuntungan yang besar baik dalam hal perbaikan kinerja mesin seperti, peningkatan efisiensi mesin dan juga memiliki efek positif pada emisi gas buang dan sangat signifikan mengurangi emisi jelaga. Untuk pengoperasian mesin normal, kandungan hidrogen tidak boleh lebih dari 10% karena peningkatan tekanan yang tinggi dan risiko knocking. Peningkatan konsentrasi hidrogen menyebabkan peningkatan nilai tekanan pembakaran maksimum dan meningkatkan efisiensi termal mesin pada konsentrasi Hidrogen 21%. Penambahan Hidrogen menyebabkan penurunan fase pembakaran, durasi pembakaran lebih pendek, serta mempengaruhi waktu tunda penyalaan mesin. Hal tersebut dipengaruhi oleh angka cetane biodiesel yang tinggi dan LHV Hidrogen yang tinggi. Dengan hidrogen 38%, durasi pembakaran berkurang 25% dibandingkan dengan mesin biodiesel, serta puncak HRR lebih tinggi daripada bahan bakar B100 tanpa Hidrogen. Ketidakstabilan operasi mesin berbahan bakar biodiesel dan hidrogen berada dalam kisaran yang diizinkan untuk mesin industri (COVIMEP <5%). Peningkatan konsentrasi Hidrogen juga mempengaruhi terbentuknya emisi gas buang mesin diesel, terjadi peningkatan emisi THC, kenaikan emisi THC tertinggi terjadi pada Hidrogen 38% dan lebih tinggi dari pada mesin berbahan bakar biodiesel yang besarnya 26%. Penambahan konsentrasi Hidrogen 38% mempengaruhi penurunan emisi CO dan CO₂ sebesar 2,4 kali daripada emisi CO bahan bakar B100, serta penurunan emisi jelaga secara signifikan. Dengan kandungan hidrogen 38%, emisi jelaga hanya 70 mg/m³ dan lebih dari 25 kali lebih rendah dibandingkan saat menggunakan bahan bakar biodiesel tanpa Hidrogen. Sangat wajar karena efek dari kandungan Hidrogen yang tanpa unsur carbon. Namun penambahan Hidrogen berdampak buruk pada emisi NO_x, peningkatan

emisi nitrogen oksida di seluruh rentang beban, untuk penambahan Hidrogen 38% tercatat peningkatan emisi NO_x spesifik lebih dari 2,5 kali (32)

K.Winangun dkk melakukan penelitian tentang penggunaan biodiesel yang diproduksi dari minyak sawit dan gas hidrogen pada mesin diesel telah dilakukan. Mesin diesel satu silinder dapat dioperasikan langsung pada biodiesel minyak sawit, dan manifold kemudian diisi dengan hidrogen pada aliran masing-masing 2,5, 5, 7,5, dan 10 lpm. Dalam penelitian ini, digunakan mesin diesel satu silinder dengan beban ringan dan kecepatan konstan 2000 rpm dengan sistem injeksi langsung. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik pembakaran dan kinerja mesin diesel, yang berbahan bakar gas hidrogen dan biodiesel sawit. Tekanan silinder, laju pelepasan panas, penundaan pengapian, dan ketukan dieksplorasi sebagai aspek pembakaran. Selain itu, efisiensi termal dan konsumsi bahan bakar merupakan faktor yang berkontribusi terhadap kinerja mesin secara keseluruhan. Hasil pada beban rendah menunjukkan bahwa aliran hidrogen kecil menghasilkan penundaan pengapian terendah pada Diesel Dual-Fuel (DDF) BH 2,5 lpm, dan ketukan terendah pada aliran hidrogen 10 lpm. Selain itu, terjadi peningkatan BTE rata-rata 27,38% dan penurunan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC) rata-rata 47,61% dibandingkan dengan biodiesel (33)

K.Winangun dkk menyelidiki efek negatif dari viskositas tinggi dan nilai kalor rendah biodiesel pada pembakaran mesin diesel disebabkan oleh sifat-sifat ini. Hal ini berbanding terbalik dengan sifat gas hidrogen yang memiliki nilai kalor tiga kali lipat dari biodiesel. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembakaran mesin diesel dual-fuel berbahan bakar biodiesel kelapa sawit dan gas hidrogen. Pada kecepatan konstan, biodiesel disuntikkan langsung ke mesin diesel satu silinder dengan beban 80%. Sementara itu, gas hidrogen disuntikkan ke intake manifold dengan laju aliran yang bervariasi yaitu 2,5, 5, 7,5, dan 10 lpm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan gas hidrogen dapat meningkatkan karakteristik pembakaran biodiesel, sehingga menghasilkan penundaan pengapian yang lebih pendek dan penurunan nilai ketukan sebesar 10% dibandingkan dengan biodiesel pada laju aliran hidrogen 10 lpm. Menurut penelitian, penggunaan biodiesel kelapa sawit dengan

penambahan gas hidrogen merupakan kombinasi yang menjanjikan untuk mesin diesel; Namun, penelitian tambahan diperlukan untuk menentukan efektivitas dan emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran biodiesel dan hydrogen (34)

5.5 Diesel Dual Fuel Bahan Bakar Hidrogen

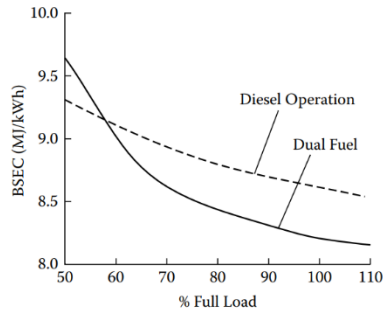
Untuk membuat mesin diesel umum mampu beroperasi pada berbagai bahan bakar gas, baik untuk aplikasi stasioner maupun bergerak, di masa lalu cenderung sering dibuat tanpa mencapai beberapa fitur mesin yang berpotensi menarik. Selain itu, fitur operasional dan desain mesin yang dikonversi kadang-kadang dilaporkan dalam literatur terbuka, sementara berdasarkan pengalaman yang diperoleh terutama dari instalasi prototipe atau dalam kondisi laboratorium. Fitur-fitur tersebut mungkin perlu dimodifikasi secara signifikan di kemudian hari melalui perubahan desain berikutnya yang dibuat atau melalui pengalaman operasional tambahan. Oleh karena itu, tidak jarang beberapa laporan yang diterbitkan tentang kinerja bahan bakar ganda, terutama di media populer atau perdagangan, tampaknya bertentangan dengan yang lain.

Saat ini, terdapat banyak sistem mesin bahan bakar ganda yang tersedia secara komersial yang ditawarkan oleh berbagai produsen di banyak bagian dunia, biasanya secara paralel dengan lini mesin diesel mereka. Terdapat pula peningkatan keberhasilan masuknya mesin bahan bakar ganda di sektor transportasi yang terutama menysasar bidang publik dan industri. Akan tetapi, meskipun sistem ini telah beroperasi dengan memuaskan dan ekonomis, masih terdapat ruang untuk mengurangi biaya dan meningkatkan kinerjanya lebih jauh, baik dalam hal efisiensi, produksi daya, memaksimalkan penggantian bahan bakar diesel, menunjukkan toleransi yang lebih luas terhadap perubahan komposisi bahan bakar gas, atau memastikan peningkatan tambahan dalam emisi gas buang. Memang, mesin bahan bakar ganda, jika didedikasikan dengan tepat terutama untuk operasi bahan bakar gas, dapat memiliki beberapa aspek kinerja yang setara atau lebih unggul daripada mesin diesel umum sambil secara ekonomis memanfaatkan berbagai sumber daya bahan bakar gas yang lebih luas.

Pengoperasian mesin bahan bakar ganda yang memuaskan bergantung pada sejumlah variabel pengoperasian dan desain yang cenderung lebih banyak jumlahnya daripada variabel yang mengendalikan kinerja mesin konvensional dengan pengapian percikan atau mesin diesel. Dengan demikian, tingkat potensi produksi daya dan tingkat emisi gas buang terkait dari mesin yang beroperasi pada berbagai bahan bakar gas dalam mode bahan bakar ganda akan bergantung pada seberapa baik dampak dari variabel desain dan pengoperasian berikut telah ditangani. Beberapa hal yang perlu diperhatikan, diantaranya:

1. Jenis bahan bakar yang digunakan, komposisi dan nilai kalornya, sifat fisik dan kimia bahan bakar, dan variasinya terhadap suhu dan tekanan; nilai batas mudah terbakar efektif dan laju pembakaran, terutama pada suhu dan tekanan tinggi yang ditemui di mesin pada akhir kompresi dan inisiasi proses pembakaran
2. Suhu dan tekanan masuk dan keluar, nilai rasio ekivalensi yang digunakan, keberadaan pengencer dalam bahan bakar atau udara yang disuplai, karakteristik penyalaan otomatis, energi dan batas penyalaan, dan variasinya yang sesuai dengan rasio ekivalensi dan suhu, dan batas ketukan operasional
3. Efisiensi volumetrik operasional terkait dengan pelambatan saat digunakan, turbocharging, dan tingkat resirkulasi gas buang (EGR) yang digunakan; sifat dan tingkat stratifikasi bahan bakar dan suhu, jenis bahan bakar pilot yang digunakan, ukuran relatifnya, karakteristik injeksi, dan waktu
4. Nilai rasio kompresi mesin, lubang, dan langkah, bentuk ruang bakar, rentang kecepatan mesin, dan aktivitas permukaan apa pun.
5. Lebih baik untuk memiliki ukuran dan waktu injeksi pilot yang bervariasi secara independen sehingga berkontribusi terhadap pencapaian dan pemeliharaan kinerja optimal dalam mode bahan bakar ganda. Selain itu, kontrol yang dikembangkan harus mempertahankan kinerja mesin yang dapat diterima ketika beberapa variasi yang relatif kecil dalam komposisi bahan bakar gas yang dipasok ditemui. Sudah menjadi praktik umum untuk menghidupkan dan mematikan mesin saat beroperasi hanya dengan bahan bakar diesel cair. Gambar 5.1 menunjukkan contoh kinerja

superior dari mesin bahan bakar ganda yang dinilai tinggi dibandingkan dengan operasi diesel yang sesuai.



Gambar 5.1. Brake Spesific Energy Consumption (BSEC) DDF Vs Single (Danyluk, P.R., ASME, 1993).

Mesin diesel dengan rasio kompresi tinggi dikaitkan dengan efisiensi produksi kerja yang relatif tinggi. Namun, emisi NO_x dan partikulat yang tinggi dihasilkan terutama karena jenis pembakaran difusi bahan bakar cair yang dikaitkan dengan beberapa lokasi penyalaan dan banyaknya daerah terlokalisasi dengan suhu pembakaran tinggi. Diesel dual fuel dengan bahan bakar hidrogen adalah sistem yang menggabungkan penggunaan bahan bakar diesel dan hidrogen dalam mesin pembakaran internal. Konsep ini bertujuan untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) dan meningkatkan efisiensi bahan bakar. Sistem diesel dual fuel dengan bahan bakar hidrogen menawarkan solusi menarik untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi bahan bakar dalam mesin diesel. Meskipun menghadapi tantangan dalam hal penyimpanan, keamanan, dan biaya, teknologi ini dapat menjadi langkah penting menuju transisi energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Dengan perkembangan teknologi dan peningkatan infrastruktur, kendaraan dual fuel dapat memainkan peran penting dalam masa depan transportasi yang ramah lingkungan.

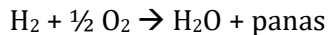
5.6 Implementasi Hidrogen Sebagai Bahan Bakar

Hidrogen merupakan pembawa energi yang sangat serbaguna. Hidrogen dapat melepaskan energi melalui sejumlah proses yang berbeda:

1. Pembakaran langsung;
2. Pembakaran katalitik;
3. Produksi uap;
4. Operasi fuel cell.

1. Pembakaran langsung

Campuran hidrogen dan oksigen dengan proporsi yang tepat ditambah adanya pemicu dapat melepaskan energi termal hingga salah satu dari kedua komponen tersebut habis dikonsumsi:



Pembakaran hidrogen dan oksigen merupakan metode tradisional untuk propulsi pesawat antariksa, sedangkan pembakaran hidrogen dan udara lebih sering digunakan dalam industri kimia dan manufaktur. Pembakaran langsung ini memiliki banyak keuntungan. Pertama-tama, rentang mudah terbakar hidrogen yang luas memungkinkan pembakaran gas dalam campuran dengan gas lain dan menciptakan penurunan suhu nyala maksimum yang masuk akal. Kedua, hidrogen juga dapat menggantikan bahan bakar tradisional dalam mesin pembakaran volumetrik dan internal. Kecepatan tinggi nyala hidrogen bahkan dapat menguntungkan mesin pembakaran internal dengan memberikannya rezim putaran yang sangat tinggi. Lebih jauh, dibandingkan dengan pembakaran bahan bakar fosil, pembakaran hidrogen melepaskan lebih sedikit, jika tidak sama sekali, polutan seperti karbon oksida (CO), partikulat, sulfur oksida (SO_x) dan nitrogen oksida (NO_x).

Dari sudut pandang termofisika, hidrogen sering dibandingkan dengan metana. Penggunaan metana tentu merupakan langkah maju untuk mengurangi produksi polutan ini karena tidak mengeluarkan SO_x atau partikulat dan menghasilkan jumlah CO, CO₂, dan HC yang lebih rendah berkat rasio C/H yang rendah. Namun, hal itu masih belum mencapai standar emisi nol. Sebaliknya, kurangnya sulfur dan karbon dalam bahan bakar hidrogen menandakan tidak adanya CO, CO₂, HC, partikulat, dan SO_x sama sekali, dengan pelepasan NO_x yang terbatas.

Tabel 5.2 menunjukkan perbandingan beberapa sifat fisik terpenting dari kedua gas tersebut dalam hal produksi energi.

Perbedaan yang cukup besar antara dimensi atom kedua gas ini hanya menonjolkan kesulitan untuk mengelola hidrogen dalam jaringan pipa dan jaringan distribusi yang sama yang dibangun untuk mengangkut metana. Faktanya, hidrogen memiliki kapasitas besar untuk melewati sambungan pipa, menembus pori-pori, dan bahkan merusak material. Oleh karena itu, pipa metana yang ada tidak dapat langsung digunakan untuk transportasi hidrogen. Tabel 5.2 juga menunjukkan bahwa titik didih, titik kritis, dan kepadatan hidrogen semuanya lebih rendah daripada metana, yang mempersulit masalah penyimpanan, transportasi, dan manajemen keselamatan.

Nilai kalor rendah hidrogen lebih tinggi daripada metana tetapi lebih rendah per satuan volume. Gas hidrogen sangat ringan dan akibatnya memiliki kepadatan energi yang lebih rendah per satuan volume, sementara energi tersimpan per satuan massa sangat tinggi.

Batas mudah terbakar hidrogen berkisar antara 4% hingga 75% sedangkan batas detonasi berada di antara 15% dan 59%. Rentang batas mudah terbakar yang lebar di satu sisi berarti bahwa campuran hidrogen yang buruk dapat dibakar dan menghasilkan produk sampingan nitrogen oksida minimum dan suhu nyala yang lebih rendah; di sisi lain, hidrogen dapat dinyalakan bahkan dengan persentase udara yang sangat rendah (misalnya ketika udara menyusup ke dalam jaringan pipa pembawa hidrogen), sehingga menciptakan potensi ancaman keamanan yang tinggi.

Tabel 5.2. Perbandingan antara hidrogen, metana, dan bensin

No	Properties	Hydrogen	Metana	Bensin	Solar
1	Density(kg/m ³)	0.0899	0.651	770	815
2	Boiling point(K)	20.268	111.7	215	370
3	Lower heating value (kJ/kg)	119.810	50.7	44.5	42.710
4	Flammability minimal energy, ambient (mJ)	0.02	0.29	0.24	

5	Flammability limits (by volume)(%)	4-75	5.3-15	1.0-7.6	
6	Detonation limits (by volume)(%)	13-65	6.3-13.5	1.1-3.3	
7	Auto-ignition temperature (° C)	585	540	228-501	>101
8	Flame temperature (° C)	2045	1875	2200	
9	Diffusion coefficient, in air(cm ² /s)	0.61	0.16	0.05	
10	Stoichiometric flames speed(m/s)	2.37	0.43	15,1	12.5
11	Explosive energy (kgTNT/m ³)	2.02	7.03	44.24	

Dalam hal ini, hidrogen mungkin tampak lebih menyukai bahan bakar jenis putih karena alasan keamanan, tetapi pada kenyataannya bensin dan solar memiliki tingkat mudah terbakar yang lebih rendah dan hanya sedikit bahan bakar ini yang cukup untuk menyebabkan kebakaran. Hidrogen kurang mudah terbakar daripada bensin karena suhu penyalan otomatisnya adalah 585 °C dibandingkan dengan 228–501 °C pada bensin. Karena hidrogen adalah unsur kimia yang paling ringan, ia dapat larut dengan cepat di ruang terbuka. Secara praktis mustahil baginya untuk menyala sendiri jika tidak di ruang tertutup. Ketika terbakar, hidrogen terbakar dengan sangat cepat dan menghasilkan nyala api yang tinggi, yang dicirikan oleh radiasi termal gelombang panjangnya yang rendah. Nyala api memiliki warna yang sangat pucat karena tidak adanya karbon dan akibatnya tidak menghasilkan jelaga. Nyala api hampir tidak terlihat di siang hari jika bukan karena radiasi termalnya dan juga terlihat dalam gelap.

Karena sifat-sifat ini, hidrogen mampu menguap dengan sangat cepat, berbeda dengan bahan bakar seperti bensin, gasolin, LPG, dan gas alam yang lebih berat daripada udara dan menimbulkan bahaya yang lebih besar karena tidak menguap ke udara secepat itu. Contohnya adalah pembakaran kendaraan akibat kebocoran bensin berlangsung selama 20

hingga 30 menit, sedangkan kendaraan berbahan bakar hidrogen terbakar tidak lebih dari 1 hingga 2 menit. Radiasi termal yang rendah dari nyala api hidrogen berarti bahwa ia hanya dapat membakar bahan-bahan lain di dekatnya jika bersentuhan langsung, oleh karena itu waktu pembakaran berkurang bersamaan dengan bahaya emisi beracun. Tidak seperti bahan bakar fosil, hidrogen tidak beracun atau korosif dan potensi kebocorannya dari tangki bahan bakar tidak mencemari tanah atau sumber air bawah tanah.

2. Pembakaran Katalitik

Pembakaran hidrogen juga dapat dilakukan dengan adanya katalis, biasanya dengan struktur berpori, untuk mengurangi suhu reaksi. Namun, dibandingkan dengan metode tradisional, pembakaran katalitik memerlukan permukaan reaksi yang lebih besar. Satu-satunya produk sampingan dari reaksi tersebut adalah uap air, karena tidak ada NO_x yang dihasilkan berkat suhu yang rendah. Oleh karena itu, proses tersebut dianggap bersih dengan emisi gas yang sangat rendah. Kecepatan reaksi dapat dikontrol dengan mudah dengan mengatur laju aliran hidrogen. Karena reaksi tersebut tidak menghasilkan api, pembakaran dengan katalis pada dasarnya merupakan prosedur yang sangat aman.

3. Produksi Uap Langsung dari Pembakaran

Pembakaran hidrogen dan oksigen dapat menaikkan suhu nyala api hingga 3000 °C dan menghasilkan uap air, akibatnya lebih banyak air perlu disuntikkan untuk mempertahankan suhu uap yang diinginkan, sehingga membentuk uap jenuh dan super panas dengan efisiensi mendekati 100% tanpa kehilangan energi termal. Uap tersebut dapat digunakan dalam turbin dan aplikasi industri dan sipil.

4. Fuel Cell

Reaksi kebalikan dari elektrolisis air adalah penggabungan H₂ dengan O₂ untuk menghasilkan air. Proses ini melepaskan sebagian energi elektrolisis yang digunakan untuk memisahkan air menjadi komponen-komponen dasarnya. Hal ini terjadi dalam perangkat yang disebut sel bahan bakar, yang akan dibahas lebih rinci nanti.

BAB 6

HIDROGEN SEBAGAI FUEL CELL

6.1 Pendahuluan

Dalam beberapa dekade terakhir, penerapan Fuel Cell pada kendaraan telah menjadi fokus perhatian yang terus berkembang. Berbeda dengan baterai, fuel cell menghasilkan energi listrik daripada menyimpannya dan terus melakukannya selama pasokan bahan bakar terjaga. Dibandingkan dengan kendaraan listrik bertenaga baterai, kendaraan bertenaga fuel cell memiliki keunggulan jarak tempuh yang lebih jauh tanpa waktu pengisian baterai yang lama. Dibandingkan dengan kendaraan konvensional, kendaraan ini memiliki keunggulan efisiensi energi yang tinggi dan emisi yang jauh lebih rendah karena konversi langsung energi bebas dalam bahan bakar menjadi energi listrik, tanpa mengalami pembakaran.

Keuntungan utama dari fuel cell adalah efisiensinya yang tinggi dan emisi yang rendah, karena satu-satunya produk samping yang dihasilkan adalah air. Ini membuat fuel cell menjadi teknologi yang ramah lingkungan dan potensial untuk berbagai aplikasi, mulai dari kendaraan listrik hingga sumber daya untuk rumah dan industri. Fuel cell dapat digunakan dalam aplikasi stasioner seperti menghasilkan listrik atau memanaskan bangunan, dan untuk memberi daya pada kendaraan, bus, dan kereta api.

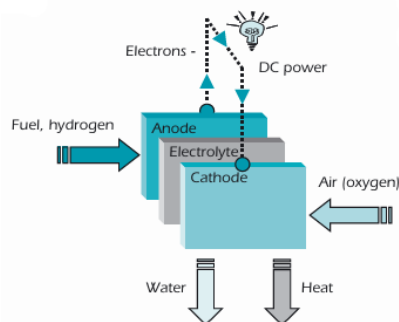
6.2 Tentang Fuel Cell

Fuel cell adalah perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia dari bahan bakar, biasanya hidrogen, dan oksigen langsung menjadi listrik melalui reaksi redoks. Fuel cell terdiri dari tiga komponen utama: anoda, katoda, dan elektrolit. Berikut adalah cara kerja fuel cell secara umum:

1. Anoda (Elektrode Negatif): Di sini, bahan bakar (misalnya, hidrogen) memasuki fuel cell dan mengalami reaksi oksidasi. Hidrogen terurai menjadi ion hidrogen (proton) dan elektron.
2. Katoda (Elektrode Positif): Oksigen memasuki fuel cell dan bereaksi dengan ion hidrogen dan elektron yang melalui sirkuit eksternal untuk membentuk air.

3. Elektrolit: Memisahkan anoda dan katoda dan hanya memungkinkan ion tertentu untuk melewatinya. Elektrolit memastikan bahwa proton yang dihasilkan di anoda bisa sampai ke katoda tanpa tercampur dengan elektron.

Fuel cell adalah perangkat yang menggunakan hidrogen (atau bahan bakar kaya hidrogen) dan oksigen untuk menghasilkan listrik melalui proses elektrokimia. Fuel cell terdiri dari dua elektroda: elektroda negatif (atau anoda) dan elektroda positif (atau katoda) yang diapit di sekitar elektrolit. Hidrogen dialirkan ke anoda, dan oksigen dialirkan ke katoda. Diaktifkan oleh katalis, atom hidrogen terpisah menjadi proton dan elektron, yang mengambil jalur berbeda menuju katoda. Elektron melewati sirkuit eksternal, menciptakan aliran listrik. Proton bermigrasi melalui elektrolit ke katoda, tempat mereka bersatu kembali dengan oksigen dan elektron untuk menghasilkan air dan panas. Untuk membran elektrolit polimer dan fuel cell asam fosfat, proton bergerak melalui elektrolit ke katoda untuk bergabung dengan oksigen dan elektron, menghasilkan air dan panas. Untuk fuel cell alkali, karbonat cair, dan oksida padat, ion negatif bergerak melalui elektrolit ke anoda tempat mereka bergabung dengan hidrogen untuk menghasilkan air dan elektron. Elektron dari sisi sel anoda tidak dapat melewati elektrolit ke katoda yang bermuatan positif; elektron harus bergerak mengitarinya melalui sirkuit listrik untuk mencapai sisi lain sel. Pergerakan elektron ini merupakan arus listrik. Karena tidak ada pembakaran, sel bahan bakar mengeluarkan sedikit atau tidak ada emisi; karena tidak ada bagian yang bergerak, fuel cell bersifat senyap dan kuat seperti gambar 6.1.



Gambar 6.1 Konsep fuel cell

Berbagai jenis fuel cell tersedia, tergantung pada jenis elektrolit yang digunakan, termasuk Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM-FC), Solid Oxide Fuel Cell (SO-FC), dan Molten Carbonate Fuel Cell (MC-FC), masing-masing dengan karakteristik dan aplikasi yang spesifik.

6.3 Jenis-Jenis *Fuel Cell*

Bagian ini mengulas enam jenis fuel cell yang sedang diselidiki secara mendalam. Jenis-jenis fuel cell diantaranya adalah:

1. *Polymer Electrolyte Membrane (PEM)*
2. *Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)*
3. *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)*
4. *Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)*
5. *Alkaline Fuel Cell (AFC)*
6. *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*

Penjelasan masing-masing jenis fuel cell disajikan pada penjelasan dibawah ini.

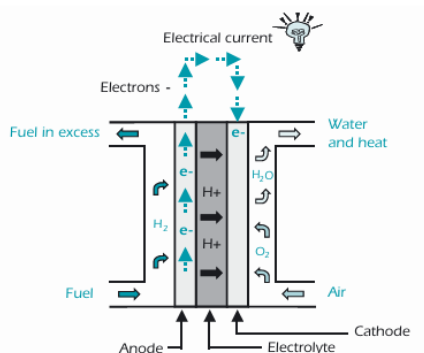
1. *Polymer Electrolyte Membrane (PEM)*

Fuel cell jenis Polymer Electrolyte Membrane (PEM) juga disebut fuel cell membran pertukaran proton atau Polymer Elektrolit Fuel Cell (PEFC), menghasilkan kepadatan daya tinggi dan menawarkan keunggulan bobot dan volume rendah, dibandingkan dengan fuel cell jenis lainnya. Fuel Cell jenis PEM menggunakan polimer padat sebagai elektrolit dan elektroda karbon berpori yang mengandung katalis platinum. Sel bahan bakar ini hanya membutuhkan hidrogen, oksigen dari udara, dan air untuk beroperasi dan tidak memerlukan cairan korosif seperti beberapa sel bahan bakar lainnya. Fuel cell jenis ini biasanya menggunakan hidrogen murni yang dipasok dari tangki penyimpanan.

Fuel cell jenis PEM beroperasi pada suhu yang relatif rendah, sekitar 80°C. Pengoperasian pada suhu rendah memungkinkan fuel cell tersebut menyala dengan cepat (waktu pemanasan lebih singkat) dan menghasilkan keausan yang lebih sedikit pada komponen sistem, sehingga menghasilkan daya tahan yang lebih baik. Namun, fuel cell jenis ini memerlukan katalis logam mulia (biasanya platinum) untuk memisahkan elektron dan proton hidrogen, yang biaya komponennya lebih mahal. Katalis platinum juga sangat sensitif terhadap gas beracun jenis CO, sehingga perlu menggunakan reaktor tambahan untuk

mengurangi CO dalam gas bahan bakar jika hidrogen berasal dari bahan bakar alkohol atau hidrokarbon. Pengembang saat ini sedang menjajaki katalis platinum yang lebih tahan terhadap CO.

Fuel cell jenis PEM digunakan terutama untuk aplikasi transportasi dan beberapa aplikasi stasioner. Karena waktu penyalanya yang cepat, sensitivitas yang rendah terhadap orientasi, dan rasio daya terhadap berat yang menguntungkan, *fuel cell* jenis PEM sangat cocok untuk digunakan pada kendaraan penumpang, seperti mobil dan bus. Gambar rangkaian *fuel cell* jenis PEM dapat dilihat pada gambar 6.2.



Gambar 6.2. Fuel cell jenis PEM

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC):

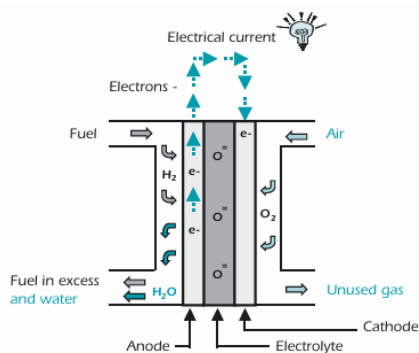
- Elektrolit: Membran polimer yang menghantarkan proton.
- Bahan Bakar: Hidrogen.
- Suhu Operasi: 60-80°C.
- Aplikasi: Kendaraan listrik, sel bahan bakar portabel, aplikasi rumah tangga.
- Kelebihan: Efisiensi tinggi, waktu start-up cepat, dan daya keluaran tinggi.

2. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) menggunakan senyawa keramik keras dan tidak berpori sebagai elektrolit. Karena elektrolitnya padat, sel tidak harus dibangun dalam konfigurasi seperti pelat yang umum pada jenis *fuel cell* lainnya. SOFC diharapkan memiliki efisiensi sekitar 50-60 persen dalam mengubah bahan bakar menjadi listrik, namun, perhitungan menunjukkan bahwa lebih dari 70% dapat dicapai. Dalam aplikasi yang dirancang untuk menangkap dan memanfaatkan panas buangan sistem, efisiensi penggunaan bahan bakar secara keseluruhan dapat mencapai 80-85 persen.

Fuel cell jenis solid oxide ini beroperasi pada suhu yang sangat tinggi, sekitar 1.000°C. Operasi suhu tinggi menghilangkan kebutuhan akan katalis logam mulia, sehingga mengurangi biaya. Hal ini juga memungkinkan SOFC untuk mereformasi bahan bakar secara internal, yang memungkinkan penggunaan berbagai bahan bakar dan mengurangi biaya yang terkait dengan penambahan reformer ke sistem. SOFC juga merupakan jenis sel bahan bakar yang paling tahan terhadap sulfur; sel ini dapat mentoleransi beberapa kali lipat lebih banyak sulfur daripada jenis fuel cell lainnya. Selain itu, SOFC tidak diracuni oleh karbon monoksida (CO), yang bahkan dapat digunakan sebagai bahan bakar. Hal ini memungkinkan SOFC menggunakan gas yang terbuat dari batu bara.

Operasi suhu tinggi memiliki kekurangan. Hal ini mengakibatkan proses start-up yang lambat dan memerlukan pelindung termal yang signifikan untuk menahan panas dan melindungi personel, yang mungkin dapat diterima untuk aplikasi utilitas tetapi tidak untuk transportasi dan aplikasi portabel kecil. Suhu operasi yang tinggi juga menempatkan persyaratan ketahanan yang ketat pada material. Pengembangan material berbiaya rendah dengan ketahanan tinggi pada suhu operasi sel merupakan tantangan teknis utama yang dihadapi teknologi ini. Para ilmuwan saat ini sedang mengeksplorasi potensi untuk mengembangkan SOFC suhu rendah yang beroperasi pada atau di bawah 800°C yang memiliki lebih sedikit masalah ketahanan dan biaya lebih rendah. Namun, SOFC suhu rendah menghasilkan lebih sedikit daya listrik, dan material tumpukan yang akan berfungsi dalam kisaran suhu yang lebih rendah ini belum diidentifikasi. Pada gambar 6.3 terlihat gambar aliran fuel cell jenis solid oxide.



Gambar 6.3. Solid Oxide Fuel Cell

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC):

- Elektrolit: Oksida padat, seperti zirkonia yang distabilkan dengan yttria.
- Bahan Bakar: Hidrogen, metana, karbon monoksida.
- Suhu Operasi: 500-1.000°C.
- Aplikasi: Pembangkitan daya stasioner, aplikasi industri.
- Kelebihan: Efisiensi sangat tinggi, mampu menggunakan berbagai jenis bahan bakar.

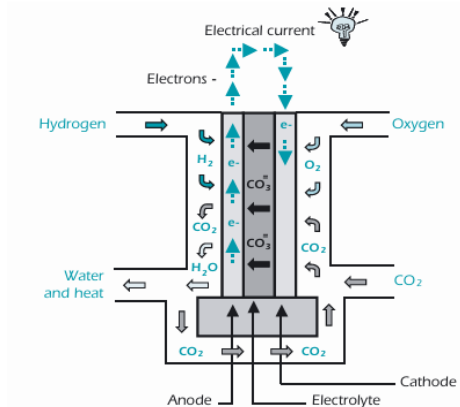
2. Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) saat ini tengah dikembangkan untuk pembangkit listrik berbahan bakar gas alam dan batu bara untuk keperluan listrik, industri, dan militer. MCFC adalah fuel cell dengan suhu tinggi yang menggunakan elektrolit yang terdiri dari campuran garam karbonat cair yang tersuspensi dalam matriks keramik litium aluminium oksida (LiAlO_2) yang berpori dan inert secara kimia. Karena beroperasi pada suhu yang sangat tinggi, yakni 650°C ke atas, logam non-mulia dapat digunakan sebagai katalis di anoda dan katoda, sehingga mengurangi biaya.

Peningkatan efisiensi adalah alasan lain mengapa MCFC menawarkan pengurangan biaya yang signifikan dibandingkan fuel cell asam fosfat. MCFC dapat mencapai efisiensi mendekati 60 persen, jauh lebih tinggi daripada efisiensi 37-42 persen pada fuel cell jenis asam fosfat. Ketika panas buangan ditangkap dan digunakan, efisiensi bahan bakar secara keseluruhan dapat mencapai 85 persen. Tidak seperti fuel cell jenis membran elektrolit polimer, asam fosfat, dan alkali, MCFC tidak memerlukan reformer eksternal untuk mengubah bahan bakar yang lebih padat energi menjadi hidrogen. Karena suhu tinggi saat beroperasi, bahan bakar ini diubah menjadi hidrogen di dalam fuel cell itu sendiri melalui proses yang disebut reformasi internal, yang juga mengurangi biaya. Meskipun lebih tahan terhadap kotoran daripada jenis fuel cell lainnya, para ilmuwan mencari cara untuk membuat MCFC cukup tahan terhadap kotoran dari batu bara, seperti sulfur dan partikulat.

Kerugian utama dari teknologi MCFC saat ini adalah daya tahan. Suhu tinggi saat sel-sel ini beroperasi dan elektrolit korosif yang digunakan mempercepat kerusakan dan korosi komponen, sehingga mengurangi masa pakai sel. Para ilmuwan saat ini sedang

mengeksplorasi bahan tahan korosi untuk komponen serta desain fuel cell yang meningkatkan masa pakai sel tanpa mengurangi kinerja. Pada gambar 6.4 adalah contoh cara kerja fuel cell jenis MCFC.



Gambar 6.4. Molten Carbonate Fuel Cell

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC):

- Elektrolit: Karbonat cair.
- Bahan Bakar: Hidrogen, metana, karbon monoksida.
- Suhu Operasi: 600-700°C.
- Aplikasi: Pembangkitan daya stasioner besar, aplikasi industri.
- Kelebihan: Efisiensi tinggi, dapat menggunakan bahan bakar hidrokarbon tanpa perlu reforming eksternal.

3. **Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)**

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) menggunakan asam fosfat cair sebagai elektrolit asam tersebut terkandung dalam matriks silikon karbida yang diikat teflon dan elektroda karbon berpori yang mengandung katalis platinum. PAFC dianggap sebagai “generasi pertama” fuel cell modern. Ini adalah salah satu jenis sel yang paling matang, yang pertama digunakan secara komersial, dan memiliki rekam jejak yang paling terbukti dalam hal aplikasi komersial dengan lebih dari 200 unit yang saat ini digunakan. Jenis fuel cell ini biasanya digunakan untuk pembangkitan daya stasioner, tetapi beberapa PAFC telah digunakan untuk memberi daya pada kendaraan besar seperti bus kota.

PAFC lebih toleran terhadap pengotor dalam reformasi daripada sel PEM, yang mudah terkontaminasi oleh CO. Karbon monoksida mengikat katalis platinum di anoda, sehingga menurunkan efisiensi fuel

cell. Mereka 85 persen efisien ketika digunakan untuk kogenerasi listrik dan panas, tetapi kurang efisien dalam menghasilkan listrik saja (37 hingga 42 persen). Ini hanya sedikit lebih efisien daripada pembangkit listrik berbasis pembakaran. PAFC juga kurang bertenaga dibandingkan fuel cell lainnya, mengingat berat dan volumenya yang besar. Akibatnya, fuel cell ini biasanya besar dan berat. PAFC juga mahal. Seperti fuel cell PEM, PAFC memerlukan katalis platinum yang mahal, yang meningkatkan biaya fuel cell itu sendiri. Fuel cell asam fosfat yang umum menghabiskan biaya investasi antara \$4.000 dan \$4.500 per kilowatt. Meskipun minat terhadap PAFC telah berkurang, saat ini ia memainkan peran dalam aplikasi khusus, misalnya untuk keperluan militer.

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC):

- Elektrolit: Asam fosfat.
- Bahan Bakar: Hidrogen.
- Suhu Operasi: 150-200°C.
- Aplikasi: Pembangkitan daya stasioner, sistem pendingin dan pemanas gabungan.
- Kelebihan: Ketahanan yang baik terhadap kontaminan bahan bakar, stabilitas termal tinggi.

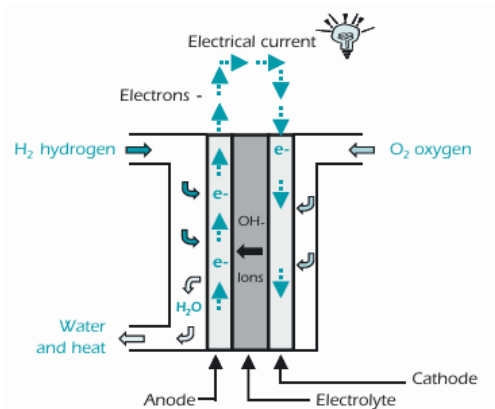
4. Alkaline Fuel Cell (AFC)

Alkaline Fuel Cell (AFC) merupakan salah satu teknologi fuel cell pertama yang dikembangkan, dan merupakan jenis pertama yang digunakan secara luas dalam program luar angkasa di Amerika Serikat untuk menghasilkan energi listrik dan air di dalam pesawat antariksa. Fuel cell ini menggunakan larutan kalium hidroksida dalam air sebagai elektrolit dan dapat menggunakan berbagai logam non-mulia sebagai katalis pada anoda dan katoda. AFC suhu tinggi beroperasi pada suhu antara 100°C dan 250°C. Akan tetapi, desain AFC yang lebih baru beroperasi pada suhu yang lebih rendah sekitar 23°C hingga 70°C.

AFC merupakan fuel cell berkinerja tinggi karena laju reaksi kimia yang terjadi di dalam sel. Sel ini juga sangat efisien, mencapai efisiensi 60 persen dalam aplikasi luar angkasa. Kerugian dari jenis fuel cell jenis ini adalah mudah terkontaminasi oleh karbon dioksida (CO_2), yang minat komersialisasinya terbatas. Faktanya, bahkan sedikit CO_2 di udara dapat mempengaruhi pengoperasian sel, sehingga perlu memurnikan hidrogen dan oksigen yang digunakan dalam sel. Proses pemurnian ini mahal. Kerentanan terhadap kontaminasi juga memengaruhi masa pakai sel,

yang selanjutnya menambah biaya. Jelas, solusi yang melibatkan pemurnian CO₂ melalui penyerapan regeneratif meningkatkan daya saing AFC.

Biaya bukanlah faktor yang penting untuk lokasi terpencil seperti luar angkasa atau di bawah laut. Namun, untuk bersaing secara efektif di sebagian besar pasar komersial utama, fuel cell jenis ini harus menjadi lebih hemat biaya. Tumpukan AFC telah terbukti mempertahankan operasi yang cukup stabil selama lebih dari 8.000 jam operasi. Agar layak secara ekonomi dalam aplikasi utilitas skala besar, fuel cell ini perlu mencapai waktu operasi yang melebihi 40.000 jam. Seiring dengan kerentanan yang tinggi terhadap kontaminasi CO₂, ini mungkin merupakan hambatan paling signifikan dalam mengomersialkan teknologi fuel cell jenis ini. Gambar 6.5 menunjukkan cara kerja fuel cell jenis alkaline.



Gambar 6.5. Fuel cell jenis Alkaline

Alkaline Fuel Cell (AFC):

- Elektrolit: Larutan alkali seperti kalium hidroksida.
- Bahan Bakar: Hidrogen.
- Suhu Operasi: 60-90°C.
- Aplikasi: Aplikasi ruang angkasa, kendaraan.
- Kelebihan: Efisiensi tinggi dan output daya yang baik, namun rentan terhadap kontaminasi CO₂.

5. Direct Methanol (DMFC)

Sebagian besar fuel cell ditenagai oleh hidrogen, yang dapat langsung dialirkan ke sistem fuel cell atau dapat dihasilkan di dalam sistem fuel cell

dengan mereformasi bahan bakar kaya hidrogen seperti metanol, etanol, dan bahan bakar hidrokarbon. Namun, fuel cell direct methanol (DMFC) ditenagai oleh metanol murni.

Dengan demikian, DMFC tidak memiliki banyak masalah penyimpanan bahan bakar yang umum terjadi pada beberapa fuel cell karena metanol memiliki kepadatan volume energi yang lebih tinggi daripada hidrogen. Meskipun lebih rendah daripada bensin atau solar. Metanol juga lebih mudah diangkut dan dipasok ke masyarakat menggunakan infrastruktur kita saat ini karena berwujud cair, seperti bensin.

Teknologi fuel cell jenis direct methanol relatif baru dibandingkan dengan fuel cell yang ditenagai oleh hidrogen murni, dan penelitian serta pengembangannya sekitar 3-4 tahun tertinggal dari jenis fuel cell lainnya. Meskipun demikian, DMFC tampaknya paling menjanjikan sebagai pengganti baterai untuk aplikasi portabel seperti telepon seluler dan komputer laptop, dan sejumlah produsen telah memperkenalkan versi komersial dari aplikasi ini.

Direct Methanol Fuel Cell (DMFC):

- Elektrolit: Membran polimer.
- Bahan Bakar: Metanol cair.
- Suhu Operasi: 50-120°C.
- Aplikasi: Perangkat elektronik portabel, aplikasi militer.
- Kelebihan: Kemudahan penyimpanan dan pengangkutan bahan bakar, cocok untuk aplikasi portabel.

Setiap jenis fuel cell memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri, serta aplikasi yang sesuai dengan karakteristik operasionalnya. Pemilihan jenis fuel cell tergantung pada kebutuhan spesifik dari aplikasi tersebut, termasuk efisiensi, suhu operasi, dan jenis bahan bakar yang tersedia.

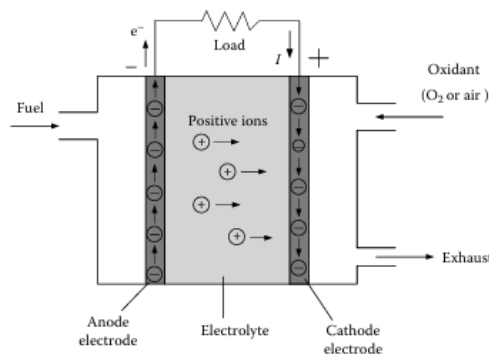
6.4 Cara Kerja Fuel Cell

Fuel cell adalah merubah energi kimia menjadi energi listrik yang didalamnya terdapat sel galvanik melalui proses elektrokimia. Bahan bakar dan zat pengoksidasi disuplai secara terus-menerus dan terpisah ke dua sel elektroda, tempat keduanya mengalami reaksi. Elektrolit diperlukan untuk mengalirkan ion dari satu elektroda ke elektroda lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Bahan bakar disuplai

ke anoda atau elektroda positif, tempat elektron dilepaskan dari bahan bakar di bawah katalis. Elektron, di bawah perbedaan potensial antara kedua elektroda ini, mengalir melalui sirkuit eksternal ke elektroda katoda atau elektroda negatif, tempat penggabungan ion positif dan oksigen, produk reaksi, atau gas buang diproduksi.

Reaksi kimia dalam fuel cell mirip dengan reaksi dalam baterai kimia. Tegangan termodinamika fuel cell terkait erat dengan energi yang dilepaskan dan jumlah elektron yang ditransfer dalam reaksi tersebut [1,2]. Energi yang dilepaskan oleh reaksi sel diberikan oleh perubahan energi bebas Gibbs, ΔG , yang biasanya dinyatakan dalam kuantitas per mol. Perubahan energi bebas Gibbs dalam reaksi kimia dapat dinyatakan sebagai.

$$\Delta G = \sum_{Products} G_i + \sum_{Reactants} G_j$$



Gambar 6.6. Operasi dasar fuel cell

di mana G_i dan G_j adalah energi bebas dalam spesies i produk dan spesies j reaktan. Dalam proses, ΔG sepenuhnya diubah menjadi energi listrik, yaitu,

$$\Delta G = -nFV_r$$

di mana n adalah jumlah elektron yang ditransfer dalam reaksi, $F = 96,495$ adalah konstanta Faraday dalam coulomb per mol, dan V_r adalah tegangan reversibel sel. Pada kondisi standar (suhu 25 ° C dan tekanan

1atm), tegangan sirkuit terbuka (reversibel), sel dapat dinyatakan sebagai:

$$V_r^0 = -\frac{\Delta G^0}{nF}$$

di mana ΔG^0 adalah perubahan energi bebas Gibbs pada kondisi standar. ΔG dinyatakan sebagai:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

dimana ΔH dan ΔS masing-masing adalah perubahan entalpi dan entropi dalam reaksi pada suhu absolut T. Tabel 6.1 menunjukkan nilai entalpi standar [3], entropi, dan energi bebas Gibbs dari beberapa zat. Tabel 6.2 menunjukkan data termodinamika untuk beberapa reaksi dalam sel bahan bakar pada 25° dan tekanan 1 atm [3].

Tabel 6.1. Entalpi Pembentukan Standar dan Energi Bebas Gibbs untuk Bahan Bakar Umum

Substance	Formula	ΔH_{298}^0 (kJ/mol)	ΔS_{298}^0 (kJ/mol K)	ΔG_{298}^0 (kJ/mol)
Oxygen	O (g)	0	0	0
Hydrogen	H (g)	0	0	0
Carbon	C (s)	0	0	0
Water	H ₂ O (l)	-286.2	-0.1641	-237.3
Water	H ₂ O (g)	-242	-0.045	-228.7
Methane	CH ₄ (g)	-74.9	-0.081	-50.8
Methanol	CH ₃ OH (l)	-238.7	-0.243	-166.3
Ethanol	C ₂ H ₅ OH (l)	-277.7	-0.345	-174.8
Carbon monoxide	CO (g)	-111.6	0.087	-137.4
Carbon dioxide	CO ₂	-393.8	0.003	-394.6
Ammonia	NH ₃ (g)	-46.05	-0.099	-16.7

Efisiensi “ideal” dari sel galvanik reversibel terkait dengan entalpi reaksi sel dengan η_{id} akan bernilai 100% jika reaksi elektrokimia tidak melibatkan perubahan jumlah mol gas, yaitu ketika ΔS bernilai nol. Hal ini berlaku untuk reaksi $C + O_2 = CO_2$. Akan tetapi, jika perubahan entropi, ΔS , dari tindakan tersebut bernilai positif, maka sel dimana reaksi ini berlangsung secara berbeda dan reversibel memiliki energi kimia, ΔH tetapi juga (dalam analogi dengan pompa kalor) jumlah kalor, $T\Delta S$ yang diserap dari lingkungan untuk diubah menjadi energi listrik (lihat Tabel 6.2).

Perubahan energi bebas, dan dengan demikian tegangan sel dalam reaksi kimia merupakan fungsi dari aktivitas spesies larutan. Ketergantungan tegangan sel pada aktivitas reaktan dinyatakan dimana R adalah konstanta gas universal, 8.31J/mol.K, dan T adalah suhu absolut dalam K. Untuk reaktan dan produk gas.

Tabel 6.2. Data Termodinamika untuk Reaksi Berbeda pada Suhu 25°C dan Tekanan 1 atm

	ΔH_{298}^0 (kJ/mol)	ΔS_{298}^0 (kJ/mol K)	ΔG_{298}^0 (kJ/mol)	<i>n</i>	<i>E</i> (V)	η_{id} (%)
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O(l)$	-286.2	-0.1641	-237.3	2	1.23	83
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O(g)$	-242	-0.045	-228.7	2	1.19	94
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO(g)$	-116.6	0.087	-137.4	2	0.71	124
$C + O_2 \rightarrow CO_2(g)$	-393.8	0.003	-394.6	4	1.02	100
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2(g)$	-279.2	-0.087	-253.3	2	1.33	91

6.5 Cara Pembuatan Fuel Cell

Membuat fuel cell memerlukan pemahaman tentang prinsip-prinsip dasar elektrokimia dan keterampilan dalam teknik-teknik manufaktur tertentu. Berikut adalah langkah-langkah dasar untuk membuat *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) sederhana:

Bahan dan Alat yang Diperlukan

1. Membran Elektrolit: Membran Nafion atau membran polimer proton-exchange lainnya.
2. Elektroda: Elektroda berbasis karbon yang dilapisi dengan katalis (biasanya platina).
3. Gas Difusi Layer (GDL): Lapisan berbasis karbon untuk membantu distribusi gas secara merata ke elektroda.
4. Bahan Bakar (Hidrogen) dan Oksigen: Sumber hidrogen dan oksigen (biasanya dari tabung gas).
5. Komponen Mekanik: Bipolar plates (biasanya terbuat dari grafit atau logam) dengan saluran gas yang diukir. Pelat penekan dan pengikat untuk menjaga seluruh unit fuel cell tetap rapat.

Adapun peralatan yang dibutuhkan antara lain :

- a. Alat pemotong dan pengebor.
- b. Perekat atau sekrup untuk mengamankan bagian-bagian.
- c. Soldering iron (jika diperlukan untuk sambungan listrik).

Langkah-Langkah Pembuatan

1. Persiapan Membran Elektrolit:
 - a. Potong membran Nafion sesuai ukuran yang diinginkan.
 - b. Jika menggunakan Nafion, rendam dalam larutan asam sulfat dan kemudian bilas dengan air deionisasi untuk mengaktifkan membran.
2. Persiapan Elektroda:
 - a. Lapsi elektroda berbasis karbon dengan katalis platina.
 - b. Pastikan lapisan katalis tersebar merata untuk efisiensi maksimum.
3. Pemasangan Gas Difusi Layer:
 - a. Tempatkan gas difusi layer (GDL) di atas elektroda yang dilapisi katalis.
 - b. GDL membantu mendistribusikan gas (hidrogen dan oksigen) secara merata ke seluruh permukaan elektroda.
4. Perakitan Membran Elektrode Assembly (MEA):
 - a. Pasang elektroda (dengan GDL) di kedua sisi membran Nafion sehingga membentuk sandwich dengan membran di tengah.
 - b. Tekan seluruh MEA untuk memastikan kontak yang baik antara elektroda dan membran.
5. Pemasangan Bipolar Plates:
 - a. Pasang MEA antara dua bipolar plates yang memiliki saluran gas yang diukir.
 - b. Bipolar plates membantu mendistribusikan gas ke MEA dan juga berfungsi sebagai konduktor listrik untuk mengalirkan elektron ke sirkuit eksternal.
6. Pengikatan dan Penyegelan:
 - a. Gunakan pelat penekan dan pengikat (seperti baut atau sekrup) untuk menekan seluruh assembly dengan kuat.
 - b. Pastikan tidak ada kebocoran gas dari unit fuel cell.
7. Pengujian:
 - a. Hubungkan fuel cell ke sumber hidrogen dan oksigen.
 - b. Ukur tegangan keluaran dan arus untuk memastikan fuel cell bekerja dengan baik.

Tips dan Pertimbangan

- a. Kebersihan: Pastikan semua komponen bersih untuk menghindari kontaminasi yang dapat mengurangi efisiensi.
- b. Tekanan: Pastikan semua sambungan gas kedap untuk mencegah kebocoran.
- c. Katalis: Penggunaan katalis platina meningkatkan efisiensi tetapi juga meningkatkan biaya. Untuk eksperimen, katalis alternatif dapat dipertimbangkan.
- d. Keamanan: Pastikan bekerja di area yang berventilasi baik dan mengikuti prosedur keselamatan saat menangani gas hidrogen yang mudah terbakar.

Proses ini adalah panduan dasar dan sederhana. Fuel cell komersial biasanya dibuat dengan peralatan dan teknik yang lebih canggih untuk memastikan efisiensi dan keandalan yang tinggi.

6.6 Implementasi *Fuel Cell* Pada Kendaraan

Sejak akhir tahun 1980-an, ada dorongan kuat untuk mengembangkan fuel cell untuk digunakan dalam propulsi kendaraan ringan dan berat. Dorongan utama untuk pengembangan ini adalah kebutuhan akan mobil, truk, dan bus yang bersih dan efisien yang beroperasi dengan bahan bakar konvensional (bensin, solar), serta bahan bakar terbarukan dan alternatif (hidrogen, metanol, etanol, gas alam, dan hidrokarbon lainnya). Dengan hidrogen sebagai bahan bakar di dalamnya, kendaraan ini akan menjadi kendaraan tanpa emisi. Dengan bahan bakar di dalamnya selain hidrogen, sistem fuel cell akan menggunakan prosesor bahan bakar yang tepat untuk mengubah bahan bakar menjadi hidrogen, menghasilkan rangkaian tenaga kendaraan dengan emisi gas asam yang sangat rendah dan efisiensi tinggi. Lebih jauh, kendaraan tersebut menawarkan keuntungan dari penggerak listrik dan perawatan yang rendah karena sedikit bagian yang bergerak. Pengembangan ini disponsori oleh berbagai pemerintah di Amerika Utara, Eropa, dan Jepang, serta oleh produsen mobil besar di seluruh dunia. Hingga tahun 1998, beberapa mobil dan bus bertenaga fuel cell yang beroperasi dengan hidrogen dan metanol telah didemonstrasikan.

Selama dekade terakhir, fuel cell telah menjadi semakin menonjol sebagai pilihan yang bersih, efisien, dan berkelanjutan untuk memberi daya pada kendaraan bermotor. Secara khusus, fuel cell PEM telah

muncul sebagai pengganti potensial untuk mesin pembakaran dalam (ICE) konvensional. Kendaraan fuel cell Hidrogen (FCV) direkayasa sangat mirip dengan kendaraan listrik hibrida, namun motor listrik dipasangkan dengan fuel cell yang menghasilkan listrik sebagai pengganti ICE. Sistem tenaga fuel cell memiliki banyak komponen, tetapi intinya adalah tumpukan fuel cell tempat keluaran listrik gabungan dari fuel cell dalam tumpukan tersebut cukup untuk memberi daya pada kendaraan. Tumpukan fuel cell yang dikombinasikan dengan komponen tambahan FCV berkontribusi pada karakteristik jarak tempuh yang jauh, kepadatan daya, dan waktu pengisian bahan bakar yang singkat yang sebanding dengan atau bahkan lebih baik daripada kendaraan konvensional. Fuel cell lebih efisien, senyap, dan tidak memiliki bagian yang bergerak. FCV dapat diisi bahan bakar dengan gas hidrogen murni yang disimpan di dalam tangki bertekanan tinggi. Atau, mereka dapat diisi dengan bahan bakar kaya hidrogen – seperti alkohol, gas alam, atau bahkan bensin – meskipun bahan bakar ini harus terlebih dahulu diubah menjadi gas hidrogen oleh perangkat yang disebut "reformer." Emisi knalpot berkisar dari tidak ada apa-apa selain panas dan air jika hidrogen digunakan sebagai bahan bakar, hingga sejumlah CO₂ dan sejumlah jejak emisi lainnya dapat dikurangi dalam proses kendaraan bahan bakar fuel cell. Fuel cell telah beralih dengan sangat cepat dari laboratorium ke pengujian jalan. Sejumlah produsen mobil besar telah menyatakan niat mereka untuk mulai menjual atau memperluas penjualan kendaraan bertenaga fuel cell. Toyota berencana untuk menawarkan sekitar 20 SUV fuel cell hybrid. Nissan telah mulai menjual kendaraan fuel cell, dan Ford Motor Company menawarkan versi fuel cell dari Focus dalam produksi volume rendah untuk operasi armada kecil.

Implementasi fuel cell pada kendaraan memerlukan integrasi yang tepat dari berbagai komponen agar sistem dapat berfungsi dengan efisien dan andal. Berikut adalah langkah-langkah dan komponen utama dalam mengimplementasikan teknologi fuel cell pada kendaraan:

Komponen Utama dari fuel cell antara lain :

1. *Fuel Cell Stack* adalah Unit utama yang menghasilkan listrik melalui reaksi elektrokimia antara hidrogen dan oksigen.
2. Tangki Hidrogen: Tangki bertekanan tinggi yang menyimpan hidrogen sebagai bahan bakar.

3. Sistem Manajemen Udara: kompresor atau blower untuk memasok udara (oksigen) ke fuel cell stack.
4. Sistem Manajemen Hidrogen difungsikan untuk pengatur aliran hidrogen dari tangki ke fuel cell stack.
5. Sistem Pendingin adalah Sistem untuk mengelola suhu fuel cell stack agar tetap dalam rentang operasi optimal.
6. Pengubah Daya (Power Electronics) adalah Inverter dan konverter untuk mengubah listrik DC yang dihasilkan oleh fuel cell menjadi listrik AC atau DC yang sesuai untuk motor listrik dan komponen lainnya.
7. Motor Listrik adalah motor yang digerakkan oleh listrik dari fuel cell untuk menggerakkan roda kendaraan.
8. Baterai atau Superkapasitor adalah Penyimpan energi tambahan untuk membantu saat beban puncak atau saat start-up.
9. Sistem Kontrol dan Manajemen Energi adalah Komputer dan sensor untuk mengatur aliran daya, mengoptimalkan kinerja, dan menjaga keselamatan sistem.

Adapun langkah-Langkah Implementasi

1. Desain Sistem dan Integrasi:
Rancang tata letak komponen utama dalam kendaraan untuk mengoptimalkan ruang dan distribusi berat. Integrasikan fuel cell stack dengan tangki hidrogen, sistem manajemen udara, dan sistem pendingin.
2. Pengembangan Sistem Pengelolaan Hidrogen:
Pasang tangki hidrogen bertekanan tinggi di tempat yang aman dan pastikan sistem pengisian ulang yang aman dan efisien. Instal pengatur aliran untuk mengontrol pasokan hidrogen ke fuel cell stack.
3. Sistem Pendingin:
Pasang radiator dan pompa untuk mengelola panas yang dihasilkan oleh fuel cell stack. Pastikan sirkulasi cairan pendingin yang efektif.
4. Integrasi Sistem Elektronik Daya:
Pasang inverter dan konverter untuk mengubah listrik DC yang dihasilkan oleh fuel cell menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh motor listrik dan sistem lain di kendaraan.
5. Pemasangan Motor Listrik dan Transmisi:

Hubungkan motor listrik ke sistem penggerak roda. Sesuaikan transmisi agar sesuai dengan karakteristik motor listrik.

6. Instalasi Baterai atau Superkapasitor:

Pasang baterai atau superkapasitor untuk penyimpanan energi tambahan. Integrasikan dengan sistem kontrol untuk manajemen energi yang efisien.

7. Sistem Kontrol dan Manajemen Energi:

Instal sistem kontrol untuk mengatur distribusi daya antara fuel cell, baterai, dan motor listrik. Pastikan adanya mekanisme keselamatan untuk mencegah kegagalan sistem.

8. Pengujian dan Kalibrasi:

Uji kendaraan secara menyeluruh untuk memastikan semua komponen berfungsi dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi. Kalibrasi sistem kontrol untuk mengoptimalkan efisiensi dan performa.

6.7 Keuntungan & Tantangan Hidrogen sebagai Fuel Cell

Berikut dipaparkan terkait keuntungan dan tantangan hidrogen dalam implementasi kendaraan fuel cell

Keuntungan:

1. Emisi Nol: Hanya menghasilkan air sebagai produk sampingan.
2. Efisiensi Tinggi: Lebih efisien dibandingkan mesin pembakaran internal.
3. Operasi Tenang: Motor listrik dan fuel cell bekerja dengan lebih tenang dibandingkan mesin pembakaran internal.

Tantangan:

1. Infrastruktur Pengisian: Keterbatasan stasiun pengisian hidrogen.
2. Biaya: Biaya awal yang tinggi untuk teknologi fuel cell dan penyimpanan hidrogen.
3. Keamanan: Pengelolaan hidrogen bertekanan tinggi memerlukan langkah-langkah keselamatan yang ketat.

Implementasi fuel cell pada kendaraan adalah langkah maju menuju transportasi yang lebih bersih dan efisien. Dengan perkembangan teknologi dan infrastruktur yang terus meningkat, kendaraan berbasis fuel cell dapat menjadi solusi utama dalam mengurangi emisi dan ketergantungan pada bahan bakar fosil.

6.8 Kendaraan Berbahan Bakar Fuel Cell

Bagian ini menyajikan hybrid untuk menghasilkan listrik atau untuk menyediakan tenaga pada kendaraan bermotor. Sistem hybrid yang menggabungkan turbin gas dibangun berdasarkan kinerja sel bahan bakar yang luar biasa dengan memanfaatkan panas fuel cell yang dikeluarkan. Kendaraan listrik hybrid memanfaatkan fuel cell untuk menyediakan tenaga listrik guna menambah atau mengganti sumber daya yang ada. Sistem ini sangat efisien dan memberikan kinerja lingkungan yang unggul. Berikut ini adalah pembahasan umum tentang teknologi hybrid serta inisiatif khusus di bidang turbin gas/fuel cell dan kendaraan hybrid bertenaga listrik.

Pada bulan Februari 2002, UTC Fuel Cells dan Nissan menandatangani perjanjian untuk mengembangkan sel bahan bakar dan komponen sel bahan bakar untuk kendaraan. Renault, mitra aliansi Nissan, juga berpartisipasi dalam proyek pengembangan. UTC Fuel Cells akan menyediakan teknologi sel bahan bakar membran pertukaran proton tekanan ambien yang dipatenkan. Mesin sel bahan bakar Ballard menggerakkan kendaraan sel bahan bakar NECAR 5 Daimler Chrysler dalam uji ketahanan selama 13 hari dan sejauh 3.000 mil di seluruh Amerika Serikat. Uji coba tersebut memberi Ballard dan Daimler Chrysler pengalaman pengujian dalam berbagai kondisi. Toyota Motor Corp. dan Honda Motor Co. mengumumkan bahwa mereka akan memajukan rencana awal pengenalan kendaraan mereka untuk kendaraan fuel cell hingga akhir tahun 2002 dari tahun 2003. Honda mencapai tonggak penting untuk peluncuran produknya dengan menerima sertifikasi CARB dan EPA untuk mobil FCX-V4 tanpa emisi. Ini adalah kendaraan pertama yang menerima sertifikasi tersebut. Fuel cell Ballard menggerakkan kendaraan Honda. Produsen mobil besar lainnya, termasuk General Motors, Volkswagen, Volvo, Chrysler, Nissan, dan Ford, juga telah mengumumkan rencana untuk membangun prototipe kendaraan fuel cell elektrolit polimer yang menggunakan hidrogen, metanol, atau bensin. IFC dan Plug Power di AS, dan Ballard Power Systems di Kanada (15), terlibat dalam program terpisah untuk membangun sistem fuel cell 50 hingga 100 kW untuk tenaga penggerak kendaraan. Produsen fuel cell lainnya

terlibat dalam program kendaraan serupa. Beberapa mengembangkan kendaraan utilitas bertenaga fuel cell seperti kereta golf.

Kendaraan berbahan bakar fuel cell, atau dikenal sebagai Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV), menggunakan fuel cell untuk menghasilkan listrik yang menggerakkan motor listrik. Berikut adalah penjelasan lebih rinci tentang FCEV, termasuk prinsip kerja, contoh kendaraan yang sudah ada, kelebihan dan kekurangan, serta tantangan yang dihadapi:

Prinsip Kerja FCEV

1. **Produksi Listrik:** Hidrogen disimpan dalam tangki bertekanan tinggi di dalam kendaraan. Kemudian hidrogen dikirim ke fuel cell stack, di mana ia mengalami reaksi elektrokimia dengan oksigen dari udara untuk menghasilkan listrik, air, dan panas.
2. **Penggerak:** Listrik yang dihasilkan oleh fuel cell stack digunakan untuk menggerakkan motor listrik yang menggerakkan roda kendaraan. Sistem manajemen energi mengatur aliran listrik dari fuel cell dan baterai ke motor listrik untuk efisiensi optimal.
3. **Penyimpanan Energi Tambahan:** Kendaraan FCEV juga dilengkapi dengan baterai atau superkapasitor untuk menyimpan energi tambahan dan memberikan daya saat beban puncak atau akselerasi cepat.

Contoh Kendaraan FCEV

- **Toyota Mirai:** Salah satu kendaraan FCEV paling terkenal, Mirai memiliki jangkauan sekitar 500 km dengan sekali pengisian hidrogen.
- **Honda Clarity Fuel Cell:** Menawarkan jangkauan serupa dengan Toyota Mirai, dengan desain yang ramah lingkungan dan efisien.
- **Hyundai Nexo:** SUV berbasis fuel cell dengan jangkauan hingga 600 km, dilengkapi dengan berbagai fitur teknologi canggih.

Kelebihan FCEV

- **Emisi Nol:** hanya menghasilkan air sebagai produk sampingan, sehingga sangat ramah lingkungan.
- **Jangkauan Panjang:** FCEV biasanya memiliki jangkauan yang lebih panjang dibandingkan kendaraan listrik baterai (BEV) karena kepadatan energi hidrogen yang tinggi.
- **Pengisian Cepat:** Mengisi tangki hidrogen hanya memerlukan waktu beberapa menit, mirip dengan mengisi bahan bakar kendaraan konvensional.

- Operasi Tenang dan Halus: Motor listrik yang digerakkan oleh sel bahan bakar bekerja dengan sangat tenang dan memberikan akselerasi halus.

Kekurangan FCEV

- Biaya Tinggi: Produksi dan infrastruktur pengisian hidrogen masih mahal, sehingga harga kendaraan FCEV lebih tinggi dibandingkan kendaraan konvensional dan BEV.
- Infrastruktur Terbatas: Stasiun pengisian hidrogen masih sangat terbatas, terutama di luar kawasan perkotaan dan negara-negara yang sudah mengadopsi teknologi ini.
- Efisiensi Produksi Hidrogen: Produksi hidrogen memerlukan energi, dan jika tidak berasal dari sumber energi terbarukan, dampak lingkungan bisa menjadi signifikan.
- Keamanan: Hidrogen adalah gas yang sangat mudah terbakar, sehingga penanganan dan penyimpanannya memerlukan langkah-langkah keamanan khusus.

Tantangan dan Masa Depan

1. Pengembangan Infrastruktur: Diperlukan investasi besar dalam pengembangan stasiun pengisian hidrogen untuk mendukung adopsi luas kendaraan FCEV. Produksi Hidrogen Ramah Lingkungan: Mengembangkan metode produksi hidrogen yang lebih ramah lingkungan, seperti elektrolisis air menggunakan energi terbarukan.
2. Penurunan Biaya: Mengurangi biaya produksi fuel cell dan komponen terkait melalui inovasi teknologi dan skala ekonomi. Kesadaran dan Dukungan Kebijakan: Meningkatkan kesadaran publik dan dukungan kebijakan pemerintah untuk mempercepat adopsi teknologi FCEV.

Kendaraan berbahan bakar fuel cell menawarkan solusi yang menjanjikan untuk transportasi berkelanjutan dengan emisi nol. Dengan kemajuan teknologi dan peningkatan infrastruktur, FCEV memiliki potensi besar untuk menjadi bagian penting dari masa depan mobilitas global.

BAB 7

APLIKASI HIDROGEN DALAM TRANSPORTASI

7.1 Pendahuluan

Teknologi bahan bakar dan transportasi merupakan dua hal yang tidak terpisahkan. Perkembangan teknologi bahan bakar pada sistem transportasi berpedoman pada teknologi hijau dengan tanggung jawab terhadap emisi dan dampaknya terhadap lingkungan dan manusia. Berbagai penelitian dan inovasi dibuat sebagai upaya mitigasi terhadap dampak operasional transportasi menuju emisi bersih nol persen pada 2050 mendatang. Dalam data yang dilansir oleh beberapa sumber menyebutkan bahwa sektor transportasi menjadi kontributor 24% emisi karbon dunia yang berasal dari penggunaan energi. Dimana sebanyak 74,5% didominasi oleh transportasi darat, 11,6% transportasi udara dan sisanya 10,6% berasal dari transportasi laut. hampir semua 95% transportasi masih mengandalkan energi berbasis minyak bumi/energi fosil. Emisi karbon pencetus gas rumah kaca menjadi penanggung jawab terbesar atas pemanasan global dan perubahan iklim.

Seiring dengan peningkatan populasi global, perputaran ekonomi yang semakin tinggi dan kesejahteraan yang semakin baik maka permintaan akan transportasi baik darat, laut maupun udara diperkirakan akan meningkat pesat. Dalam pemikiran berdasarkan data dan estimasi yang dilakukan, International Energy Association IEA atau badan energi internasional menyatakan bahwa pada tahun 2070 akan terjadi peningkatan jumlah transportasi secara global dua kali lipat, dimana kepemilikan mobil meningkat 60% dan permintaan terhadap distribusi penumpang dan barang meningkat tiga kali lipat. Fakta ini tentu saja menjadi gambaran nyata peningkatan emisi transportasi yang akan terjadi jika tidak dilakukan intervensi selama kurun waktu tersebut. Intervensi teknologi hijau dalam berbagai bidang transportasi menjadi hal yang mutlak dilakukan. Skenario besar dalam pembangunan berkelanjutan untuk mencapai emisi karbon nol pada tahun 2050 mendatang. Sektor transportasi menjadi satu dari berbagai elemen yang masuk dalam skenario besar tersebut.

Berdasarkan karakteristik dan kajian resikonya, gas CO₂ karbondioksida, Hidrokarbon HC dan Metana CH₄ bukan merupakan

polutan yang berdampak secara langsung pada makhluk hidup akan tetapi merupakan golongan gas rumah kaca GRK yang bertanggungjawab penuh terhadap pemanasan global dan perubahan iklim yang secara tidak langsung justru menjadi ancaman eksistensi manusia dan lingkungan hidup. Mayoritas kendaraan baik darat, air dan udara menggunakan bahan bakar fosil yang berpotensi besar menjadi emisi karbon yang menjadi ancaman tersebut.

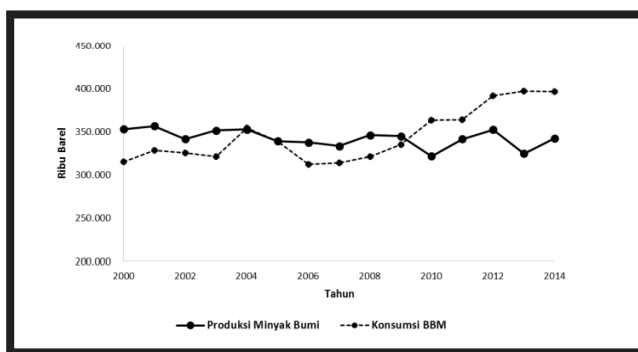
Hidrogen kemudian muncul sebagai wacana bahan bakar alternative rendah emisi dan nol karbon yang dipandang cukup menjanjikan. Sejarah mencatat perkembangan hidrogen sejak tahun 1975 di awal potensi terungkap hingga tahun 2018 telah mengalami pertumbuhan sebesar empat kali lipat. Dimana hydrogen saat itu sebagian besar digunakan untuk produksi ammonia NH_3 dan pemurnian bahan bakar fosil. Seiring dengan penelitian dan kajian yang dilakukan memandang hydrogen dapat dikembangkan secara besar – besaran untuk memenuhi skala produksi bahan bakar alternative pengganti energi fosil. Disadari tantangan dan hambatan dalam penyiapan teknologi adaptasi tidaklah kecil dan sedikit. Skala prioritas yang harus diidentifikasi, bidang penelitian yang perlu dieksplorasi dan dikembangkan serta kesenjangan pengetahuan yang perlu dijembatani sebagai kesiapan teknologi. Pengembangan teknologi hydrogen yang meliputi teknologi produksi hydrogen, pemurnian, penyimpanan hingga distribusi yang direncanakan tentunya membutuhkan banyak kajian dan penelitian.

7.2 Hidrogen Pada Transportasi Darat

Sektor transportasi darat menjadi salah satu sistem layanan pergerakan barang dan publik yang secara umum paling nyaman dengan ketersediaan penunjang yang menyeluruh. Dengan meningkatnya produksi domestik bruto dari suatu negara maka kebutuhan akan secara otomatis kebutuhan akan transportasi untuk melayani mobilitas maupun produktifitas barang dan jasa semakin meningkat. Aktifitas transportasi yang meningkat dan jumlah armada pelayanan yang semakin bertambah menjadikan kebutuhan akan energi bahan bakar meningkat pesat. Konsumsi bahan bakar yang semakin banyak seperti dua mata pedang dimana secara positif menjadi indikator pertumbuhan industri dan

negatifnya menjadi sumber polusi lingkungan yang berdampak jangka pendek maupun panjang bagi manusia.

Kebutuhan yang terus meningkat akan bahan bakar fosil menjadikan kesenjangan atau gap antara permintaan dan pasokan. Sifat tak terbarukan menjadikan kelangkaan dan habisnya persediaan bahan bakar fosil diprediksikan terjadi dalam beberapa puluh tahun lagi. Apabila tidak ada intervensi maupun inovasi dalam substitusi bahan bakar maka kelumpuhan industri dan transportasi dapat saja terjadi. Dalam tulisannya (1) menjelaskan terkait peramalan perkembangan penyediaan konsumsi BBM di Indonesia pada beberapa tahun yang akan datang. Dari grafik terlihat gap ketersediaan bahan bakar dan permintaannya.



Gambar 7.1. Grafik produksi dan konsumsi BBM di Indonesia (1) Perkembangan jumlah kebutuhan armada transportasi darat berbahan bakar fosil yang semakin meningkat secara linier meningkatkan potensi polusi udara yang meliputi CO, HC, NO_x, partikel PM dan CO₂ terutama di kota – kota besar. Kota besar dengan aktifitas dinamisasi yang tinggi, tidak adanya daya dukung lingkungan seperti pepohonan semakin meningkatkan potensi dampak polusi terhadap manusia secara langsung. Karbondioksida CO₂ sebagai polutan terbanyak hasil pembakaran bahan bakar fosil pada kendaraan darat merupakan salah satu gas rumah kaca yang bertanggungjawab penuh pada pemanasan global dan perubahan iklim. Pergeseran budaya, tingkat sosial dan ekonomi menjadikan perubahan gaya hidup dan cara manusia beraktifitas. Kendaraan pribadi menjadi satu simbolik strata sosial dan ekonomi yang justru berdampak buruk pada scenario energi dan lingkungan terutama di kota besar. Di

kota metropolitan seperti halnya ibukota negara diperkirakan separuh konsumsi bahan bakar fosil dilakukan kendaraan di jalan raya yang didominasi oleh kendaraan pribadi (2).

Dorongan kebutuhan akan efisiensi energi dan kelangsungan hidup yang bebas polusi mendorong upaya pencarian dan pemanfaatan energi alternative yang dapat menjadi solusi masalah yang ada. Hydrogen menjadi salah satu potensi energi yang menjanjikan dengan nilai kalor tiga kali lebih besar dibandingkan minyak bumi pada jumlah massa yang sama dengan hasil emisi gas buang yang lebih rendah, hydrogen hanya menghasilkan H_2O saat dipergunakan dalam sel bahan bakar (3). Kelebihan – kelebihan yang dimiliki inilah yang menjadikan hydrogen sebagai kandidat terbaik pada aplikasi transportasi maupun industry. Beberapa pertimbangan teknis yang menjadikan hydrogen layak untuk diaplikasikan pada kendaraan darat antara lain adalah (4)(5)

1. Secara tinjauan emisi, hydrogen memiliki keunggulan yang tidak ditemukan pada bahan bakar fosil (konvensional) maupun natural gas yaitu tidak adanya emisi hidrokarbon HC, karbondioksida (CO_2) maupun karbonmonoksida (CO). Emisi – emisi tersebut yang menjadi permasalahan selama ini sebagai green house gas yang menjadi penyebab pemanasan global dan perubahan iklim. Penggunaan hydrogen pada transportasi maupun industry tentunya menjadi pendukung utama penancangan program nol karbon di 2030 nanti.
2. Pada nilai massa yang sama energi yang dihasilkan oleh pembakaran hydrogen lebih tinggi 2 – 3 kali dibandingkan dengan bahan bakar fosil yang saat ini digunakan. Sebagai komparasi pada metana didapatkan 50 MJ/Kg, gasoline 44,8 MJ/Kg sedangkan hydrogen sebesar 120 MJ/Kg.
3. Hydrogen memiliki batas penyalaan dengan rentang yang cukup lebar 4 – 75 % volume, lebih menguntungkan dari segi safety dan mendukung operasional *lean combustion* yang berarti tingkat penggunaan bahan bakar ekonomis dan minimal emisi NO_x . Perbandingan flammability limit metana pada kisaran 4,3 – 15 % vol dan gasoline pada 1,4 – 7,6 % vol saja.

4. Di udara, hydrogen lebih mudah tersebar sehingga menguntungkan pada proses pembakaran dimana pencampuran bahan bakar dan udara berlangsung lebih sempurna. Data menunjukkan bahwa koefisien difusi hydrogen di udara sebesar $0,61 \text{ Cm}^2/\text{s}$, sedangkan metana $0,16$ dan gasoline $0,005 \text{ Cm}^2/\text{s}$. Sudah menjadi keniscayaan ketika pembakaran sempurna lebih berpotensi terjadi maka efisiensi energi dan emisi yang dihasilkan akan lebih rendah.
5. Hydrogen membutuhkan energi relative rendah untuk penyalaan sehingga memungkinkan efisiensi energi karena pembakaran dapat terjadi dengan cepat dalam kondisi *lean combustion*

Akan tetapi dibalik keunggulan teknis yang dimilikinya, hydrogen juga memiliki beberapa karakter teknis yang melemahkan, seperti :

1. *Low density*, hydrogen memiliki kelemahan berupa enegy volumetric densitas yang rendah. Pada volume yang sama energi yang dihasilkan hydrogen paling rendah apabila dibandingkan dengan metana dan gasoline. Hal ini menjadi tantangan pada penyediaan tangki penyimpanan (storage) yang membutuhkan dimensi lebih besar untuk energi yang sama. Penggunaan tangki yang besar tentunya menjadi kelemahan bagi desain alat transportasi yang membutuhkan kapasitas muat, akselerasi maupun keseimbangan. Hydrogen memiliki nilai energi densitas volume pada $9,9 \text{ MJ/Kg}$, Methane $32,6 \text{ MJ/Kg}$ dan gasoline $32,704 \text{ MJ/Kg}$.
2. Hydrogen berpotensi tinggi dalam kehilangan panas pembakaran dan menimbulkan *backfire* yang merugikan

Berikut beberapa ulasan terkait dengan implementasi penggunaan hydrogen pada beberapa jenis dan model kendaraan di darat, seperti yang disampaikan ling Chin et al (6)

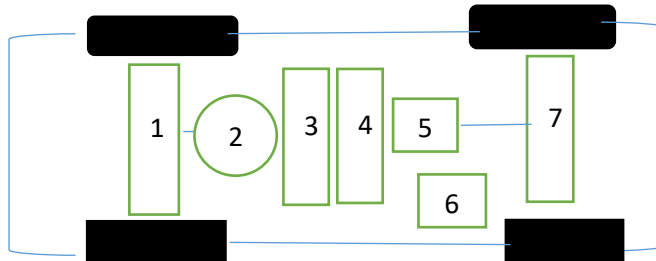
a. Penggunaan hydrogen untuk Mobil

Dalam perkembangannya aplikasi hydrogen pada kendaraan ringan terbagi menjadi 2 yaitu hydrogen sebagai *fuel cell* (PEM FC) dan bahan bakar mesin pembakaran dalam (ICE).

Mobil hydrogen dengan Sel Bahan Bakar (*Fuel Cell Cars*)

a. Sistem Penggerak

- Mekanisme kerjanya adalah PEM FCs mengkonversi energi kimia dari hydrogen menjadi energi listrik sebagai sumber energi penggerak pada mobil.



Keterangan :

1 Transmisi

2 Motor Traksi

3 Motor Inverter

4 DC/DC Converter

5. Fuel Cells

6. Penyimpanan Energi Listrik

7. Penyimpanan Hidrogen

b. Penyimpanan Hidrogen

- Dalam bentuk gas terkompresi 700 bar yang disimpan dalam mobil pada kisaran 5,46 – 5,63 kg H₂ dalam bejana bertekanan tinggi berbahan komposit tipe IV. Diharapkan didapatkan tekanan yang tinggi dengan tempat yang relative tidak berat sehingga memudahkan penempatan maupun mobilisasi saat berkendara.
- Tangki penyimpanan hydrogen biasanya diletakkan di bagian belakang mobil terpasang melintang di depan atau diatas as roda belakang. Hal ini mengakomodasi kebutuhan penyimpanan yang memerlukan volume besar dengan keterbatasan ruang yang ada.
- Material yang digunakan untuk penyimpanan wajib kompatibel agar terhindari dari masalah kebocoran, abrasi, keausan dan korosi. Kekuatan, kekerasan dan kemampuan mesin harus dipertimbangkan selama pemilihan material

c. Model pengguna

Beberapa model terapan aplikasi sistem fuel cell di mobil antara lain : Hyundai ix35, Hyundai Nexo, Toyota Mirai, Honda Clarity, Mercedes benz GLC, Riversimple Rasa, Symbioo kangoo van

d. Kelebihan

- Nilai efisiensi fuel cell FC yang lebih tinggi sekitar 60% dibandingkan dengan mesin pembakaran CE
- Jarak tempuh yang lebih jauh sekitar 300 km
- Model pengisian bahan bakar yang hampir tidak berbeda dengan kendaraan konvensional.
- Pengisian bahan bakar yang relatif singkat lebih kurang 5 menit
- Risiko emisi produk buangan yang rendah karena hanya uap air
- Tidak ada persyaratan untuk produksi baterai Li-ion skala besar
- Pengalaman berkendara yang lebih senyap dengan getaran yang minimal

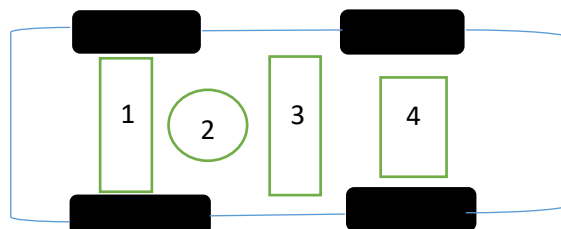
e. Kekurangan

- Biaya investasi yang tinggi
- Diperlukannya biaya tambahan sebagai pengembangan infrastruktur pengisian bahan bakar
- Diperlukannya biaya pemurni tambahan karena adanya pengotor dalam hydrogen.

Mobil Pembakaran Dalam (H₂ICE Cars)

a. Sistem Penggerak

- Hidrogen yang dipergunakan dalam pembakaran dalam menggunakan *port fuel injection* (PFI) atau *direct injection* (DI) dengan sistem *spark ignition*.



Keterangan :

- 1 Transmisi
 - 2 Mesin Pembakaran Dalam
 - 3 Regulator Tekanan
 - 4 Penyimpanan Hydrogen
- b. Penyimpanan Hidrogen
 - Penyimpanan hydrogen dalam bentuk cair maupun terkompresi memerlukan volume penyimpanan yang besar dan tekanan injeksi yang tinggi. Hal ini kemudian menjadikan penilaian hydrogen dinyatakan berefisiensi rendah karena kapasitas penuh tangki kriogenik dengan tekanan yang dihasilkan di dalamnya menjadi tidak bisa digunakan.
 - c. Model Pengguna
 - Beberapa model kendaraan darat ringan yang telah mengadopsi sistem ini antara lain BMW hydrogen 7 dan renesis RE hydrogen (dual fuel hydrogen/bensin), Mazda Premacy RE Hidrogen, Ford Superchief F250 (triple fuel), Toyota Corolla
 - d. Kelebihan
 - Biaya instalasi dan operasional lebih murah apabila dibandingkan dengan fuel cell.
 - Lebih mature teknologinya, sehingga lebih sedikit pekerjaan yang diperlukan untuk transisi ke H₂ICE
 - Pengisian ulang bahan bakar yang relative singkat
 - Bersifat lebih bersih, tidak ada pengotor sehingga tidak memerlukan proses pemurnian.
 - Tidak memerlukan modifikasi pada sistem penggerak
 - Jarak tempuh lebih jauh pada tingkat kuantitas hydrogen yang sama dibandingkan fuel cell
 - Tidak memerlukan baterai li-on yang menghabiskan proses panjang dan energi
 - e. Kekurangan
 - Efisiensi rendah pada kisaran 20-25%
 - Potensi emisi NOx
 - Biaya isi ulang yang lebih tinggi
 - Pengembangan biaya infrastruktur penunjang yang membutuhkan investasi tambahan

b. Penggunaan Hidrogen pada Kendaraan besar

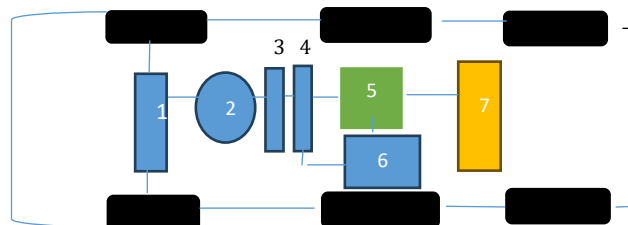
Selain kendaraan darat ringan seperti halnya mobil, kendaraan berat berupa truk muatan dan bis menjadi potensi penggunaan hydrogen yang cukup signifikan dalam menurunkan emisi. Dari data kontribusi emisi kendaraan – kendaraan tersebut cukup besar dari total emisi domestic system transportasi darat. Truk dan bus rata – rata memiliki jarak tempuh yang Panjang dengan power mesin yang relative besar sehingga lebih banyak mengkonsumsi bahan bakar fosil dibandingkan dengan mobil, hal ini tentu linier dengan potensi emisi yang lebih besar dibandingkan kendaraan ringan. Hal ini juga menjadi perbedaan prioritas Dimana dengan konversi bahan bakar ke hydrogen diharuskan bernilai ekonomi yang lebih tinggi, investasi instalasi yang lebih terjangkau, dan biaya operasional lebih rendah dibandingkan bahan bakar konvensional. Hal ini mengingat secara fungsional truk dan bus merupakan armada komersil yang membutuhkan laba bagi perusahaannya.

Berikut skema powertrain berdasarkan skema yang diambil dari Seperti halnya dalam kendaraan ringan mobil, perkembangan hydrogen pada truk – truk besar dapat dibedakan menjadi *fuel cell truck* PEM FC dan *H₂ICEs truck*.

Truk hydrogen dengan sel bahan bakar

a. Sistem Penggerak

- Pada model hydrogen sebagai sel bahan bakar memiliki karakteristik daya keluaran yang lebih besar dan daya tahan tinggi, sehingga meningkatkan jarak tempuh.
- Dibuat dengan system hybrid
- Desain sasis truk dirancang khusus yang memungkinkan pemasangan komponen fuel cell lebih mudah dan fleksibel.
- Desain system tampak dalam gambar berikut :



Keterangan Gambar :

- | | | |
|------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 Transmisi | 4 DC/DC Converter | 7 Hidrogen Storage |
| 2 Motor Traksi | 5 Fuel Cells | |
| 3 Motor Inverter | 6 Electrical Energy Storage | |

b. Penyimpanan Hidrogen

- Dalam bentuk CH_2 pada 350 atau 700 bar. Dapat juga berbentuk LH_2 yang didinginkan lebih rendah (potensi penggunaan CCH_2 di masa mendatang)
- Dibandingkan dengan kendaraan ringan, masalah ketersediaan Lokasi penyimpanan lebih mudah.

c. Model Truk Pengguna

- Beberapa tipe kendaraan yang telah menjadi model penggunaan symbio FC, Toyota kentworth, Hyundai Xcient, Hyson Motor Hymax 450, Nikola Tre, Truk Daimler.

d. Kelebihan

- Efisiensi fuel cell yang lebih tinggi sekitar 60% dibandingkan dengan ICE memungkinkan jarak tempuh yang jauh pada kapasitas energi yang sama (400 – 1000 km), waktu pengisian bahan bakar yang singkat (sekitar 10 – 15 menit)
- Tidak ada emisi berbahaya karena hanya menghasilkan uap air
- Umur pakai yang lebih panjang
- Bobot kendaraan yang lebih ringan dibandingkan truk Listrik bertenaga baterai
- Pengalaman berkendara yang lebih senyap dengan getaran yang lebih rendah
- Daya konstan selama seluruh perpindahan gigi

e. Kekurangan

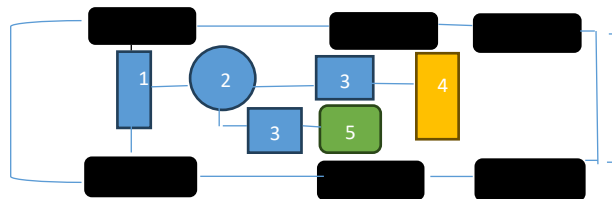
- Secara pembiayaan awal yang tinggi, termasuk pengisian bahan bakar yang juga masih tinggi
- Terdapat biaya tambahan berupa biaya pemurnian karena adanya pengotor dalam hydrogen yang mempengaruhi masa pakai sel bahan bakar

- Masih memerlukan pengembangan infrastruktur pengisian bahan bakar yang memerlukan keterlibatan banyak pihak dan permodalan yang tidak sedikit

Truk dengan tipe H₂ICE

a. System Penggerak

- Dapat berupa system bahan bakar tunggal maupun ganda. Untuk bahan bakar ganda menggunakan H₂ dan bahan bakar alternatif yang diharapkan dapat menurunkan biaya maupun emisi pada kendaraan berat. Konversi ke H₂ memerlukan sedikit atau tidak ada perubahan pada mesin.
- Desain system tampak sebagai berikut :



Keterangan gambar :

- | | |
|---|-------------------|
| 1 Transmisi | 4 Tangki hydrogen |
| 2 ICE <i>internal combustion engine</i> | 5 Diesel Storage |
| 3 Regular tekanan | |

b. Penyimpanan hydrogen

- H₂ terkompresi dalam kisaran 350 atau 700 bar
- Memerlukan modifikasi minor seperti penyediaan tangki penyimpanan hydrogen, system injeksi tinggi pada penggunaan hydrogen cair dalam tangka kriogenik

c. Model truk pengguna

- Beberapa model truk yang sudah menggunakan system ini antara lain Ford Superchief F250, Volvo FH16 yang didapatkan dari konversi ulang ULEMCo

d. Kelebihan

- Pada truk dengan kapasitas angkut besar dan jarak tempuh panjang system bahan bakar ganda lebih murah daripada tipe fuel cell, lebih fleksibel karena dapat bekerja dengan hydrogen sebagai system bahan bakar Tunggal maupun kombinasi dengan bahan bakar lain.

- System pembakaran hydrogen memiliki sifat lebih bersih dengan produksi pengotor yang minimal sehingga tidak memerlukan alat pemurni. Hal ini tentu menjadi nilai ekonomis yang lebih baik dibandingkan FC.
 - Jarak tempuh yang dicapai lebih jauh dibandingkan dengan truk listrik dengan system baterai
 - Tidak ada modifikasi pada system penggerak
 - Penggunaan tipe ICE dan FC secara bobot tidak berbeda secara signifikan
- e. Kekurangan
- Meskipun relative bersifat lebih bersih namun ada potensi emisi Nox
 - Biaya pengisian bahan bakar yang tinggi
 - Perlunya investasi pengembangan infrastruktur tambahan

Sistem bahan bakar hydrogen pada bus

System bahan bakar yang diterapkan adalah hybrid fuel cell, superkapasitor, dan baterai dipergunakan sebagai penyedia daya puncak (peak power) sekaligus memulihkan energi pengereman. Hal ini menjadi satu teknologi yang menguntungkan karena dapat mengurangi konsumsi hydrogen dan meningkatkan masa pakai system fuel cell.

Fuel cell sendiri memiliki karakteristik :

- Produksi kelistrikan relative konstan,
- *Poor dynamic*,
- Menyalakan dan memberhentikan system menyebabkan penurunan tegangan, mengurangi efisiensi dan masa pakai.

Baterai memiliki karakteristik :

- Siklus efisiensi 80%
- Memungkinkan penyimpanan energi pengereman
- Masa pakai yang terbatas
- Kepadatan daya lebih rendah
- Periode pengisian ulang yang lebih lama
- Memerlukan converter daya untuk terhubung ke sel bahan bakar
-

Superkapasitor memiliki karakteristik :

- Umur pemakaian lebih Panjang lebih kurang 40 tahun
- Memiliki siklus efisiensi yang tinggi kisaran 90%
- Memiliki kepadatan daya tinggi dengan respon dinamis
- Kepadatan energinya rendah
- Dapat dikosongkan dan diisi ulang dengan cepat
- Biaya lebih tinggi dari baterai
- Dapat menghilangkan tegangan (stress) pada fuel cell dan baterai.

7.3 Hidrogen Pada Transportasi Laut

Dunia kemaritiman yang meliputi industri perkapalan dan pelayaran semakin meningkat operasionalnya dari tahun ke tahun. Peningkatan kebutuhan pengiriman barang dan jasa serta mobilisasi manusia dari satu tempat ke tempat yang lain menjadikan peningkatan fungsional transportasi laut. Dalam kisaran kontribusi 5% dari total emisi global, transportasi laut juga bertanggung jawab terhadap emisi global. Meskipun saat ini secara faktual saat ini hidrogen belum dipergunakan secara luas dan komersil pada industri maritim dan perkapalan namun telah menarik banyak perhatian sebagai bagian proyek sumber energi masa depan bagi pelayaran yang ramah lingkungan. Berbagai program dan persiapan proyek dilakukan dalam upaya membangun sistem penerapan hidrogen bagi transportasi air, seperti program pembangunan rantai pasok yang layak serta infrastruktur pengisian bahan bakar/bunkering. Berikut beberapa strategi yang diterapkan untuk aplikasi hidrogen :

- Hidrogen dalam bentuk H_2ICE dapat berfungsi dalam aplikasi transportasi dengan melakukan modifikasi terlebih dahulu untuk mengakomodasi sifat – sifat hidrogen. Modifikasi diperlukan untuk mempertahankan efisiensi kerja turbin uap / gas. Laju aliran massa udara, laju hidrogen maupun gas buang agar kinerja yang dihasilkan optimal. Aplikasi sebagaimana pembangkit listrik tenaga diesel dimana kapasitas yang lebih besar dipergunakan untuk pemenuhan operasional saat di laut dan yang lebih kecil dipergunakan saat kapal manuver maupun saat berlabuh dipelabuhan.

- H₂ICE dengan segala kelebihanannya memungkinkan penggunaan yang lebih layak bagi pelayaran internasional jika dibandingkan dengan teknologi FC yang lebih mahal dan masa kerjanya yang lebih pendek.
- Pada H₂ICE kelebihan berupa panas buang dapat dimanfaatkan kembali sebagai penguap LH₂
- Penerapan teknologi FC dalam skala besar pada bidang maritim membutuhkan upaya yang lebih kompleks apabila dibandingkan dengan H₂ICE. Hal ini dikarenakan pelibatan konversi energi listrik menjadi mekanik dan fisik yang lebih besar sehingga membutuhkan ruang lebih yang menjadi permasalahan bagi kapal sehingga kurang fleksibel bagi kapal dengan perjalanan panjang
- Teknologi FC lebih tepat dipergunakan pada kapal kecil dengan rute pendek dan perjalanan singkat.
- Contoh penerapan teknologi hidrogen pada kapal seperti yang disampaikan Stark C et al(7) oleh antara lain sebagai berikut :
 - a. Tahun 2016 – 2017 Proyek Hydroville pada kapal penumpang (*passenger shuttle vessel*) menggunakan sistem propulsi *hybrid compressed hydrogen – diesel internal combustion engine*. Proyek pertama terkait sertifikasi penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar mesin *passenger shuttle vessel*.
 - b. Tahun 2013 – sekarang Proyek Hyseas (I-III) pada kapal ferry menggunakan *compressed hydrogen – hybrid fuel cell – battery system*. Proyek ini
 - c. Tahun 2018 – 2021 Proyek Flagships pada kapal cargo vessel, *passenger* dan *car ferry* menggunakan *compressed hydrogen, hybrid fuel cell – battery system*
 - d. Tahun 2017 – 2021 Proyek Maranda pada kapal riset menggunakan *compressed hydrogen hybrid fuel cell – battery system* sebagai mesin bantu. Pada proyek ini mengujicobakan 165 kW *hydrogen proton-exchange membrane (PEM) fuel cell* sebagai permesinan bantu pada kapal riset.

- e. Tahun 2021 – 2024 proyek Hyship pada ro-ro vessel menggunakan liquified hydrogen hybrid fuel cell – battery system. Pada program ini ditunjukkan hasil desain dan konstruksi kapal ro – ro baru yang menggunakan liquid green hydrogen LH₂
- f. Proyek Europe seaways yang saat ini masih sedang berjalan dengan target penggunaan compressed hydrogen hybrid fuel cell – battery system pada ropax ferry. Proyek ini mentargetkan penggunaan fuel cell berkapasitas besar 23 mW pada kapal Ropax ferry.
- g. Proyek Suiso Frontier pada kapal hydrogen carrier untuk menunjukkan proses produksi dan transportasi hidrogen cair dapat dilakukan dengan aman.

7.4 Hidrogen Pada Transportasi Udara

Terapan hidrogen pada transportasi udara diupayakan dapat dipergunakan sebagai solusi pengurangan kontribusi emisi sektor pada total emisi global. Terdapat beberapa strategi penerapan hidrogen pada transportasi udara seperti yang telah disajikan oleh Ling-Chin et al (8)

1. Dalam bentuk fuel cell FC
 - Dipergunakan sebagai daya pendorong, tambahan dan atau penggunaan darurat. Pensuplaian energi listrik melalui FC dipergunakan untuk menggerakkan motor sebagai penghasil gaya dorong, unit daya pada aplikasi tambahan seperti menghidupkan mesin induk, lighting, de – icing, pemanas kabin, pemberian tekanan maupun penyediaan modul hiburan penumpang dan juga sebagai unit daya darurat. Pada unit transportasi udara unit daya tambahan dan daya darurat menghasilkan emisi kisaran 20%, menggantikan sumber energi konvensional dengan FC menjadikan potensi pengurangan 20% emisi tersebut.
 - Terdapat 3 teknologi FC yang dapat diaplikasikan yaitu alkaline, PEM, oksida padat dan metanol FC. Saat ini teknologi PEM FC yang paling banyak diminati untuk penggunaan mesin penerbangan karena sistem gravimetrinya yang relatif lebih tinggi, kepadatan daya, pengoperasian yang relatif tenang dan bersuhu rendah. Kendala yang ada hanyalah masalah

penyimpanan hidrogen pada on board yang membutuhkan efisiensi volumetrik tinggi serta biaya investasi yang relatif tinggi.

2. Menggunakan bentuk LH_2 sebagai bahan bakar permesinan *internal combustion*.
 - Penelitian terkait potensi LH_2 sebenarnya telah dilakukan sejak tahun 1970 sebagai bahan bakar jet dan diupayakan dalam penelitian untuk dapat dipergunakan pada airbus. Tahapan pembakaran LH_2 sebelum memasuki ruang bakar dipanaskan heat exchanger terlebih dahulu untuk menguapkan hidrogen yang selanjutnya dibakar dengan oksigen di dalamnya dan menghasilkan gaya dorong. Emisi yang patut diwaspadai adalah munculnya Nox
3. Melakukan inovasi produksi bahan bakar penerbangan berkelanjutan dari hidrogen

Secara umum tantangan yang dihadapi oleh penggunaan hidrogen pada armada transportasi baik darat, laut maupun udara hampir sama yaitu :

1. Proses penyimpanan dan distribusi, dimana hidrogen dengan karakteristiknya membutuhkan teknologi tangki yang advance dengan tekanan tinggi pada suhu cryogenis -253°C . Hal ini juga menjadi tantangan bagi penyediaan infrastruktur pada sistem distribusinya. Permasalahan biaya investasi, permodalan dan kebijakan menjadi batasan klasik pada terapan teknologi baru.
2. Biaya produksi yang relatif lebih tinggi, kesiapan teknologi dan inovasi yang dilakukan masih membutuhkan biaya sehingga menjadikan biaya produksi energi terbarukan selalu relatif lebih mahal dibandingkan bahan bakar fosil yang ada
3. Integrasi sistem dengan desain armada, aplikasi tambahan berupa tangki yang menampung hidrogen dengan aman dan cukup dalam pelayanan penerbangan membutuhkan desain ulang pesawat

Saat ini tengah dikembangkan proyek ZEROe yang dikembangkan airbus untuk penggunaan bahan bakar hidrogen bagi industri penerbangan dengan target operasional pada tahun 2035. ZEROe merupakan proyek ambisius dan prestisius dalam pengembangan protipe pesawat hidrogen yang bebas karbon dan menjanjikan di masa depan. Terdapat tiga konsep pesawat bertenaga hidrogen yang tengah dikembangkan Airbus dalam proyek ZEROe ini yaitu :

1. **Turbofan** merupakan konsep pesawat dengan sistem propulsi bertenaga turbin gas yang dimodifikasi untuk membakar hidrogen cair, cocok pada penerbangan jarak menengah dengan kapasitas 200 penumpang dan jangkauan 2000 mil laut seperti antar benua pendek Eropa – Asia Tenggara
2. **Turboprop** berkonsep propulsi baling – baling dengan tenaga yang berasal dari hidrogen cair. Didesai sebagai armada penerbangan jarak pendek antar kota dalam satu negara sekitar 1000 mil laut dengan ukuran yang lebih kecil dan kapasitas penumpang 100 orang
3. **Blended – Wing Body (BMW)** dirancang dengan model futuristik dimana badan menyatu dengan sayap yang memungkinkan ruangan lebih luas dalam penyimpanan hidrogen. Pesawat jenis ini diklaim memiliki keunggulan aerodinamika yang lebih baik, efisiensi bahan bakar yang tinggi dan mampu maksimal dalam mendukung penyimpanan hidrogen karena tangkinya yang cukup besar. Dengan kapasitas dan target jangkauan serupa turbofan, jenis ini dinilai lebih unggul dengan teknologi yang lebih *advance*. Teknologi utama berupa modifikasi mesin turbin gas yang dirancang ulang agar mampu membakar hidrogen dengan efisiensi tinggi dan nol emisi karbon.

Selain itu proyek terkait penggunaan hidrogen pada transportasi udara yang lainnya adalah H₂Fly yang diprakarsai oleh perusahaan Jerman. Proyek H₂Fly ini diawali dengan pencapaian pesawat prototipe HY4 yang mampu membawa hingga empat penumpang dengan jangkauan 1500 km dan mampu berfungsi penuh. Proyek H₂Fly sendiri melakukan pengembangan teknologi sel bahan bakar modular yang memungkinkan peningkatan efisiensi lebih tinggi dan tercapai pengurangan berat bagi jarak pendek hingga menengah.

Selain H2Fly terdapat satu lagi proyek yang berbasis di Inggris dengan nama Cranfield Aerospace Solutions (CAeS). Proyek ini berfokus pada transformasi pesawat berbahan bakar konvensional menjadi bersumber energi hidrogen. Produk hasil CAeS ini antara lain adalah pesawat Britten – Norman Islander sebuah pesawat komuter yang melayani penerbangan regional yang telah dimodifikasi menjadi berbahan bakar hidrogen. Produk kedua adalah Hydrogen Aircraft Powertrain Enhancement (HAPE) dengan target peningkatan efisiensi, performa, teknologi penyimpanan dan pengurangan berat sistem tanpa mengesampingkan keamanan dan kinerja.

BAB 8

HIDROGEN PERSPEKTIF SOSIAL EKONOMI

8.1 Pendahuluan

Kebutuhan akan energi menjadi sesuatu yang tak terelakkan baik untuk masa kini maupun mendatang. Segala sektor baik industri maupun transportasi terhubung dengan permintaan energi. Kemajuan teknologi, peningkatan kapasitas produksi maupun perkembangan kehidupan manusia menjadikan peningkatan kebutuhan energi yang terus menerus. Kehadiran sumber energi baru yang terbarukan menjadi penting dikarenakan keterbatasan dan kelemahan bahan bakar fosil saat ini baik dari segi kapasitas produksi untuk memenuhi permintaan maupun dari aspek tinjauan lingkungan dengan progresifitas regulasi yang semakin ketat.

Energi terbarukan dan teknologi efisiensi energi menjadi langkah konkrit bagi permasalahan gap energi dan emisi. *Green house gases* sebagai salah satu penyebab pemanasan global dan berkelanjutan menjadi perubahan iklim yang menimbulkan perubahan besar pada kelangsungan hidup umat manusia hanya dapat dicegah dengan jalan melakukan 2 hal tadi yaitu pengadaan energi terbarukan dan program efisiensi energi pada segala sektor bidang baik industri maupun transportasi. Oleh karena itu, menjadi penting untuk dikembangkan energi terbarukan dan teknologi efisiensi energi yang memungkinkan penyediaan energi yang rendah karbon, bersih, aman, andal

Hidrogen merupakan salah satu energi terbarukan yang diwacanakan dapat menjadi alternatif energi yang menjanjikan bagi ekonomi dan lingkungan di masa depan. Dalam penggunaannya hidrogen dapat diterap[an dalam berbagai sektor dan aplikasi seperti industri, transportasi maupun sebagai pembangkit listrik. Hidrogen dapat dianggap sebagai bahan bakar yang ramah lingkungan dimana hanya menghasilkan air sebagai produk sampingannya. Penggunaannya yang fleksibel dapat diplikasikan pada transportasi, operasional industri, dan pembangkit listrik. Namun tidak dipungkiri bahwa dalam pengembangan bahan bakar hidrogen masih menghadapi tantangan dalam penyediaan infrastruktur, produksi dan efisiensi penggunaannya. Tantangan dalam infrastruktur antara lain berupa keterbatasan dalam penyediaan stasiun

pengisian, teknologi pengiriman maupun penyimpanan hidrogen. Hal ini perlu dirancang sedemikian rupa agar supaya teknologi hidrogen dapat diterima secara luas oleh masyarakat umum maupun industri. Pengembangan penggunaannya dapat dilakukan sedemikian rupa sehingga dapat meningkatkan skala produksi dalam upaya pemenuhan kebutuhan masyarakat yang lebih luas.

Beberapa hal yang dapat dilakukan dalam upaya peluang peningkatan penggunaan hidrogen sebagai pendukung penyediaan energi di masa depan antara lain :

1. Perlu adanya upaya terus – menerus dalam peningkatan efisiensi produksi hidrogen, pengurangan biaya produksi, peningkatan performa sel bahan bakar melalui upaya penelitian dan inovasi teknologi sehingga hidrogen dapat diterima dengan cepat sebagai bahan bakar pengganti fosil.
2. Perlunya intervensi kebijakan dan dukungan dari pemerintah dalam upaya pengembangan hidrogen. Intervensi yang dilakukan dapat berupa investasi dalam pengembangan infrastruktur pengisian dan penyimpanan hidrogen, insentif dalam kegiatan produksi hidrogen hijau, maupun penetapan regulasi yang membatasi emisi sehingga mampu mendorong dunia industri segera melakukan konversi energi.
3. Memperluas peluang kerjasama internasional dalam penelitian dan pengembangan hidrogen sebagai energi dalam industri dan transportasi. Dengan adanya kerjasama internasional dapat menciptakan standar global dan mempercepat pengembangan industri hidrogen di seluruh dunia.

Pengembangan hidrogen sebagai bahan bakar industri dan transportasi memiliki potensi besar untuk mendukung transisi menuju energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Namun seperti halnya penerapan teknologi baru lainnya selalu menimbulkan dampak positif maupun negatif dalam sosial, ekonomi maupun lingkungan. Berikut disajikan beberapa ulasan terkait dampak yang mungkin dapat ditimbulkan :

8.2 Dampak Pengembangan Hidrogen

Ditinjau dari dampak yang ditimbulkan dari pengembangan hidrogen pada bidang sosial dan ekonomi tentunya relatif signifikan. Penggunaan aplikasi teknologi baru terutama energi berkenaan langsung dengan kehidupan manusia. Dampak yang dimaksud tentunya ada dua sisi yaitu yang positif dan negatif. Ulasan terkait dampak yang ditimbulkan ini tentunya sangat penting sebagai bentuk upaya antisipasi maupun preventif terhadap hal – hal yang tidak dikehendaki dan tujuan besarnya adalah penerimaan maupun adaptasi yang baik pada hal baru tersebut. Berikut merupakan hal – hal yang akan terjadi dengan adanya wacana hidrogen sebagai energi terbarukan.

1. Terbukanya Peluang Baru Sektor Pekerjaan Energi & tergantikannya sektor pekerjaan berbasis bahan bakar fosil.

- Dalam menangani program pengembangan hidrogen sebagai bahan bakar dibutuhkan banyak tenaga mulai dari sektor teknologi, manufaktur, riset, inovasi teknologi hingga infrastruktur. Hal ini tentu menjadikan peluang pekerjaan terbuka dan serapan tenaga ahli menjadi bertambah. Perubahan teknologi lama berbasis bahan bakar fosil menjadi hidrogen membutuhkan banyak pekerjaan tambahan semisal pekerjaan terkait dengan produksi sel bahan bakar, pembangunan sarana prasarana instalasi stasiun pengisian hidrogen, perancangan dan pembuatan kendaraan berbasis hidrogen, serta pekerjaan terkait perawatan infrastruktur hidrogen. Pekerjaan berteknologi tinggi pada bidang energi terbarukan di berbagai wilayah membutuhkan banyak tenaga profesional dalam jumlah yang tidak sedikit. Selain itu pelatihan terkait alih energi dan fungsi peralatan secara teknologi mutlak dibutuhkan. Bagi yang tidak dapat beradaptasi dan masih sangat tergantung pada energi konvensional tentunya akan menjadi permasalahan tersendiri.

2. Adanya perubahan peta ekonomi secara global

- Perubahan dapat terjadi pada negara – negara yang selama ini menjadi penghasil bahan bakar fosil, dimana mayoritas kebutuhan energi untuk transportasi, industri maupun operasional tergantung penuh pada negara tersebut. Tekanan ekonomi secara signifikan akan berdampak pada negara tersebut dengan adanya perkembangan energi terbarukan yang dapat

dihasilkan oleh negara – negara yang berbeda. Negara dengan wilayah yang memiliki potensi alam seperti tenaga angin, matahari maupun hidro yang terkait erat dengan produksi hidrogen hijau akan berpotensi mengalami perubahan struktur ekonomi dan mengambil alih peran produsen energi jika berperan aktif dalam produksi bahan bakar hidrogen. Mereka dapat menjadi eksportir hidrogen dan menjadi negara kaya raya. Sedangkan negara – negara penghasil bahan bakar fosil akan menghadapi tantangannya. Dari sinilah dapat terjadi potensi perubahan peta ekonomi secara global. Selain itu perubahan yang terjadi dapat menyebabkan ketidaksetaraan global maupun ketegangan geopolitik.

3. Isu ketidakadilan akses energi serta keberlanjutannya

- Dalam upaya proses penyediaan hidrogen untuk seluruh lapisan masyarakat di semua wilayah, tantangan terbesar adalah keterjangkauan dan pemerataan infrastruktur utama dan penunjang. Bagaimanapun ketersediaan hidrogen dapat menjadi solusi bagi masyarakat di wilayah terpencil dengan memanfaatkan potensi alam lokal yang dimiliki seperti sinar matahari, angin maupun air. Produksi hidrogen secara luas dengan penggunaan yang efisien dapat memperbaiki ketimpangan energi yang selama ini terjadi pada wilayah yang kurang berkembang, mendorong perkembangan mobilitas berbasis lingkungan.
- Namun perkembangan teknologi hidrogen yang masih dinamis memungkinkan wilayah yang dekat dengan pusatlah yang menerima dampak positif lebih cepat dibandingkan dengan wilayah yang lebih terpencil. Wilayah yang tidak ditunjang dengan infrastruktur hidrogen baik karena biaya maupun ketidaksediaan tenaga ahli bidang hidrogen akan mengalami kesulitan dalam akses energi yang berdampak signifikan pada banyak bidang. Selain itu apabila tidak ditunjang dengan kebijakan yang memperhatikan keadilan distribusi maka dapat memperburuk akses energi yang menyebabkan kesenjangan sosial dan ekonomi yang kian lebar.

4. Perkembangan Pembelajaran Energi Hidrogen pada Pendidikan dan Pelatihan

- Adanya penemuan dan inovasi teknologi baru pada bidang hidrogen mendorong pemenuhan kebutuhan tenaga kerja yang terampil pada bidang tersebut. Perguruan tinggi, lembaga pelatihan maupun sertifikasi melakukan pengembangan kurikulum dan program studi terkait energi terbarukan, khususnya teknologi hidrogen dan sel bahan bakar. Hal ini dibutuhkan untuk mendorong kesiapan tenaga kerja, mengurangi kemungkinan kesenjangan ketrampilan dan kelangsungan ke depannya. Dengan dorongan kebijakan yang tepat, investasi dalam pendidikan dan sarana prasarannya maka dapat memaksimalkan teknologi hidrogen dan perkembangannya.

5. Dampak Pada Kesehatan dan Lingkungan

- Bahan bakar berbasis hidrokarbon yang sering kita sebut fosil memberikan dampak yang kurang baik pada kesehatan manusia dan lingkungan. Emisi gas buang yang dihasilkan dari mesin transportasi maupun produksi berdampak jangka pendek maupun panjang. Sifat dan karakteristik masing – masing zat pencemar menjadi penentu konsekuensi dari tingkat kefatalan terhadap makhluk hidup dan lingkungannya. Dengan melakukan konversi energi dari bahan bakar fosil ke hidrogen dapat meminimalisir pencemaran udara, hasil pembakaran hidrogen pada mesin – mesin industri maupun transportasi tidak menghasilkan nitrogen oksida (Nox), sulfur dioksida (SO₂) maupun partikulat pencemar seperti halnya kendaraan maupun mesin yang berbahan bakar fosil. Hal ini tentu sangat mendukung program net zero carbon maupun emisi yang ditargetkan pada tahun 2050. Kualitas udara yang meningkat di kota – kota besar dapat meningkatkan pencegahan penyakit pernafasan dan jantung serta penyakit lainnya yang ditimbulkan oleh buruknya kualitas udara.
- Namun perlu disadari penerapan teknologi produksi hidrogen belum 100% hijau, terdapat hidrogen abu – abu yang masih bergantung pada bahan bakar fosil, produksi hidrogen abu – abu ini masih dimungkinkan menghasilkan emisi karbondioksida (CO₂) yang merupakan salah satu *green house gases* (GHG).

Sehingga upaya tetap harus dilakukan untuk dapat memaksimalkan potensi teknologi hidrogen hijau dengan tetap memperhatikan penggunaan air maupun tanah agar tidak tercemar sejauh pengembangan produksi dilakukan.

8.3 Perspektif Sosial & Ekonomi Hidrogen Di Masa Depan

Dalam perjalanan pengembangan energi terbarukan dan upaya net zero carbon, hidrogen dapat dipandang sebagai salah satu potensi yang menjanjikan di masa depan. Dalam perspektif sosial hidrogen secara umum dapat membantu meningkatkan kualitas hidup karena terkait erat dengan pengurangan polusi dan penjagaan lingkungan hidup. Kualitas hidup yang semakin baik akan meningkatkan produktifitas dan hal - hal positif lainnya dalam kehidupan manusia. Selain tentu saja dengan adanya potensi ekonomi baru terkait pekerjaan hidrogen yang dapat membantu terciptanya lapangan kerja baru. Sedangkan dalam tinjauan ekonomi, adanya peluang baru terkait diversifikasi energi yang mendukung penggunaan energi terbarukan dalam kegiatan industri maupun transportasi untuk mendukung industri hijau yang berkelanjutan. Termasuk di dalamnya peningkatan perdagangan energi global yang dapat mendorong perubahan pertumbuhan ekonomi negara - negara di dunia.

Dalam perspektif sosial ekonomi, keberadaan hidrogen dapat dinilai sebagai hal positif maupun negatif, mengingat keberadaan teknologi baru selalu menghadirkan 2 hal tersebut, adapun penjelasan detailnya dapat digambarkan sebagai berikut :

Perspektif Sosial :

- Terjadinya transisi energi bersih dimana diketahui bahwa hidrogen merupakan salah satu energi bersih karena dalam pengoperasionalannya tidak menghasilkan emisi karbon sehingga tidak berdampak panjang pada perubahan iklim. Selain itu wacana energi bersih memberikan angin segar pada peningkatan kualitas kesehatan masyarakat dan lingkungan. Keberadaan infrastruktur yang menjadi penunjang tentu mutlak diperlukan, hal ini membutuhkan investasi yang tidak sedikit.
- Industri hidrogen membuka peluang baru dalam bidang pekerjaan, peluang pada bidang penelitian dan pengembangan, produksi, distribusi maupun penggunaan hidrogen dalam berbagai sektor.

Peluang juga banyak terbuka pada bidang pekerjaan yang terkait langsung dengan pekerjaan teknis yang merupakan transisi energi dari fosil menjadi hidrogen. Tantangan selanjutnya adalah bagaimana penyediaan tenaga terampil dan memiliki pemahaman terkait teknologi hidrogen

- Kekhawatiran terhadap ketimpangan akses energi antara negara - negara yang mampu memproduksi hidrogen dengan negara berkembang atau terbelakang yang tidak memiliki kemampuan tersebut.
- Kebutuhan vital akan penerimaan sosial terhadap adopsi hidrogen sebagai sumber energi utama. Sebagian masyarakat yang belum memiliki pemahaman yang baik terkait keamanan dan keselamatan terhadap penyimpanan, distribusi maupun penggunaan hidrogen membutuhkan pencerahan terkait integrasi hidrogen dalam keseharian.

Perspektif Ekonomi :

- Adanya peluang baru dalam perdagangan energi menjadikan hidrogen dalam konteks ekonomi memberikan harapan bagi negara - negara yang memiliki potensi sumber daya terbarukan yang melimpah seperti angin ataupun matahari untuk dapat memproduksi hidrogen hijau dalam skala besar untuk pemenuhan kebutuhan sendiri maupun pasar ekspor.
- Kebutuhan investasi dan infrastruktur utama, pendukung maupun penunjang pengembangan hidrogen seperti pabrik elektroliser, stasiun pengisian bahan bakar hidrogen sekaligus jaringan distribusi. Kebutuhan tersebut dapat menjadi pendorong ekonomi dalam penciptaan industri baru dan inovasi teknologi. Namun hal ini dapat juga menjadi tantangan hambatan bagi negara karena investasi awal yang mahal.
-

DAFTAR PUSTAKA

1. Langins, Janis (8 Jun 1983). "Hydrogen production for ballooning during the French Revolution: An early example of chemical process development". *Annals of Science*. **40** (6). Taylor & Francis: 531–558. doi:10.1080/00033798300200381.
2. "A Students Guide to Refining – Energy – Articles – Chemical Engineering – Frontpage – Cheresources.com". Cheresources.com Community. Retrieved 8 February 2016.
3. Improvements in and relating to internal combustion engines using a mixture of hydrogen and oxygen as fuel Archived 2013-01-05 at archive.today
4. Eberle, Ulrich; Mueller, Bernd; von Helmolt, Rittmar. "Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012". *Energy & Environmental Science*. Retrieved 2014-12-19.
5. Nickel-Hydrogen Battery Technology—Development and Status Archived 2009-03-18 at the Wayback Machine
6. Sandia Corporation (2004). Fuel-Cell-Powered Mine Locomotive Archived 2014-12-24 at the Wayback Machine. Sandia National Laboratories.
7. "E.ON inaugurates power-to-gas unit in Falkenhagen in eastern Germany". 28 August 2013. Retrieved 8 February 2016.
8. Heremans, Gino; Trompoukis, Christos (2017). "Vapor-fed solar hydrogen production exceeding 15% efficiency using earth abundant catalysts and anion exchange membrane". *Sustainable Energy & Fuels*. **1** (10): 2061–2065. doi:10.1039/C7SE00373K. Retrieved 2020-11-09.
9. Gallucci, Maria (2019-03-13). "Solar Panel Splits Water to Produce Hydrogen". *IEEE Spectrum*. IEEE. Retrieved 2020-11-09. A research team in Belgium says its prototype panel can produce 250 liters of hydrogen gas per day
10. Andrei, Virgil; Ucoski, Geani M.; Pornrungrroj, Chanon; Uswachoke, Chawit; Wang, Qian; Achilleos, Demetra S.; Kasap, Hatice; Sokol, Katarzyna P.; Jagt, Robert A.; Lu, Haijiao; et al. (2022-08-17). "Floating perovskite-BiVO₄ devices for scalable solar fuel production". *Nature*. **608** (7923): 518522. Bibcode:2022Natur.608.518A. doi:10.1038/s41586-022-04978-6.

11. F. Michalak, J. Beretta, and J.-P. Lisse, Second generation proton exchange membrane fuel cell working with hydrogen stored at high pressure for fuel cell electric vehicle. Society of Automotive Engineers (SAE) Journal, Paper No. 2002-01-0408, Warrendale, PA, 2002.
12. J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons, New York, 2000.
13. J. Bevan Ott and J. Boerio-Goates, Chemical Thermodynamics—Advanced Applications, Academic Press, New York, ISBN 0-12-530985-6, 2000.
14. S. I. Sandler, Chemical and Engineering Thermodynamics, Third Edition, John Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-18210-9, 1999.
15. H. K. Messerle, Energy Conversion Statics, Academic Press, New York, 1969.
16. S. E. Gay, J. Y. Routex, M. Ehsani, and M. Holtzapple, Investigation of hydrogen carriers for fuel cell based transportation. Society of Automotive Engineers (SAE) Journal, Paper No. 2002-01-0097, Warrendale, PA, 2002.
17. R. O'Hayre et al. Fuel Cell Fundamentals. John Wiley & Sons, 2016.
18. C. Bao and W. G. Bessler, Two-dimensional modeling of a polymer electrolyte membrane fuel cell with long flow channel. Part II. Physics-based electrochemical impedance analysis. Journal of Power Sources, 278, 2015: 675–682, ISSN 0378-7753. 19.
19. P. Hong, L. Xu, J. Li, and M. Ouyang, Modeling of membrane electrode assembly of PEM fuel cell to analyze voltage losses inside. Energy, 2017, ISSN 0360-5442.
20. Costamagna P, Selimovic A, Del Borghi M, Agnew G (2004) Electrochemical model of the integrated planar solid oxide fuel cell (IP-SOFC). Chemical Engineering Journal 102:61–69.
21. Sa'adah AF, Fauzi A, Juanda B. Peramalan Penyediaan dan Konsumsi Bahan Bakar Minyak Indonesia dengan Model Sistem Dinamik. J Ekon dan Pembang Indones [Internet]. 2017 Jan 1;17(2):118–37. Available from: <https://scholarhub.ui.ac.id/jepi/vol17/iss2/2/>
22. Chang X, Ma T, Wu R. Impact of urban development on residents' public transportation travel energy consumption in China: An analysis of hydrogen fuel cell vehicles alternatives. Int J Hydrogen Energy. 2019;

23. Shadidi B, Najafi G, Yusaf T. A review of hydrogen as a fuel in internal combustion engines. Vol. 14, *Energies*. 2021.
24. Yip HL, Srna A, Yuen ACY, Kook S, Taylor RA, Yeoh GH, et al. A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion. *Appl Sci*. 2019;9(22).
25. Hosseini SE, Butler B. An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles. Vol. 17, *International Journal of Green Energy*. 2020.
26. Ling-Chin J, Giampieri A, Wilks M, Lau SW, Bacon E, Sheppard I, et al. Technology roadmap for hydrogen-fuelled transportation in the UK. *Int J Hydrogen Energy*. 2024;52.
27. *J. Eng. Gas Turbines Power*. October 1993, 115(4): 728–733. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2906766>
28. Senthil Kumar, M., Ramesh, A., & Nagalingam, B. (2003). Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(10), 1143–1154. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00234-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00234-3).
29. Boopathi, D., Sonthalia, A., & Devanand, S. (2017). Experimental investigations on the effect of hydrogen induction on performance and emission behaviour of a single cylinder diesel engine fuelled with palm oil methyl ester and its blend with diesel. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(7), 1972–1987.
30. Uludamar, E., Yildizhan, Ş., Aydin, K., & Özcanli, M. (2016). Vibration, noise and exhaust emissions analyses of an unmodified compression ignition engine fuelled with low sulphur diesel and biodiesel blends with hydrogen addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(26), 11481–11490. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.179>.
31. Akcay, M., Yilmaz, I. T., & Feyzioglu, A. (2020). Effect of hydrogen addition on performance and emission characteristics of a common-rail CI engine fueled with diesel/waste cooking oil biodiesel blends. *Energy*, 212, 118538. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118538>.

32. Tutak, W., Jamrozik, A., & Grab-Rogaliński, K. (2020). Effect of natural gas enrichment with hydrogen on combustion process and emission characteristic of a dual fuel diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 9088–9097. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.080>.
33. K. Winangun, A. Setiyawan, and B. Sudarmanta, “The combustion characteristics and performance of a Diesel Dual-Fuel (DDF) engine fueled by palm oil biodiesel and hydrogen gas,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 42, no. November 2022, p. 102755, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102755.
34. K. Winangun, A. Setiyawan, B. Sudarmanta, I. Puspitasari, and E. L. Dewi, “Investigation on the properties of a biodiesel-hydrogen mixture on the combustion characteristics of a diesel engine,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 8, p. 100445, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100445>.

GLOSARIUM

Autothermal	Proses pembentukan syngas dimana gas alam direaksikan dengan oksigen dan uap air dalam satu reaktor.
Aquifer	Lapisan batuan jenuh Air Tanah yang dapat menyimpan dan mengalirkan Air dalam jumlah yang cukup dan ekonomis.
Anoda	Elektroda yang melepaskan elektron ke sirkuit eksternal dan mengalami oksidasi selama reaksi elektrokimia
Biokatalis	Proses kimiawi yang menggunakan katalis biologis
Cryogenic	Ilmu yang mempelajari materi dengan temperatur sangat rendah (di bawah $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-238\text{ }^{\circ}\text{F}$ atau 123 K)
Disosiasi	Proses ketika senyawa ionik (kompleks atau garam) terpisah menjadi partikel, ion, atau radikal yang lebih kecil, dan biasanya dapat dikembalikan seperti semula.
Difusi	Peristiwa mengalirnya atau berpindahnya molekul-molekul zat dari bagian yang berkonsentrasi tinggi kebagian yang berkonsentrasi rendah
Detonasi	Proses pembakaran pada mesin yang tidak tepat pada waktunya, yaitu api yang tiba-tiba menjadi besar dalam proses pembakaran, sehingga proses pembakaran yang tidak sempurna.
Elektroliser	Sel elektrokimia yang memecah air menjadi hidrogen dan oksigen

Evaporit	Istilah untuk sedimen mineral yang larut dalam air yang dihasilkan dari pemekatan dan kristalisasi melalui penguapan larutan airnya
Eksotermik	Kaidah pembahasan termodinamika menjelaskan suatu proses atau reaksi yang melepaskan energi panas atau energi cahaya (contohnya percikan api atau ledakan), energi listrik (contohnya pada baterai), atau bisa juga energi suara
Elektode	Penghantar listrik yang terhubung dengan larutan elektrolit dari sebuah rangkaian listrik
Fase	Semua perubahan yang terjadi berturut-turut daripada sebuah proses. wujud atau rupa sebuah benda.
Flammability	Kemudahan Terbakar
Gravimetric	Penentuan jumlah zat berdasarkan pada pengukuran berat
Galvanik	Fenomena yang terjadi akibat reaksi elektrokimia antara dua bahan yang berbeda, yang menghasilkan aliran listrik
Hidrida	Senyawa kimia yang terbentuk ketika hidrogen (H) bergabung dengan elemen lain, biasanya logam atau metaloid
Insulasi	Proses atau bahan yang digunakan untuk menghambat atau mengurangi aliran panas, listrik, atau suara
Kovalen	Jenis ikatan kimia yang terbentuk ketika dua atom saling berbagi pasangan elektron.
Kokas	Bahan padat yang terbentuk dari proses pemanasan batubara dalam kondisi tanpa udara (pirolisis) pada suhu tinggi
Katalitik	Suatu proses atau reaksi yang melibatkan penggunaan katalis, yaitu zat yang mempercepat laju suatu reaksi kimia tanpa ikut terkonsumsi atau berubah dalam proses tersebut

Komposit	Material yang terbentuk dari dua atau lebih bahan yang berbeda, yang digabungkan untuk menghasilkan sifat-sifat yang lebih baik atau lebih sesuai untuk aplikasi tertentu daripada bahan penyusunnya sendiri.
Katalis	Zat yang mempercepat laju reaksi kimia tanpa ikut dikonsumsi atau berubah dalam proses tersebut
Karbonat	Senyawa kimia yang mengandung ion karbonat (CO_3^{2-}) sebagai bagian dari struktur molekulnya. Ion karbonat terdiri dari satu atom karbon yang terikat dengan tiga atom oksigen dalam suatu bentuk yang disebut struktur trigonal planar, dan memiliki muatan negatif dua (-2). Karbonat biasanya terbentuk ketika gas karbon dioksida (CO_2) larut dalam air atau bereaksi dengan basa.
Katoda	Elektroda tempat reduksi (proses penerimaan elektron) terjadi dalam sebuah reaksi elektrokimia, baik dalam sel elektrokimia (seperti dalam baterai) maupun dalam proses elektrolisis.
Mikroreaktor	Perangkat yang dirancang untuk menjalankan reaksi kimia dalam skala kecil, sering kali dengan volume sangat kecil (mikroskopik) dan menggunakan aliran fluida melalui saluran sempit. Mikroreaktor sering digunakan untuk mempercepat reaksi kimia, meningkatkan efisiensi, dan mengurangi penggunaan bahan kimia dan energi.
Oksidasi	Proses kimia di mana suatu zat kehilangan elektron. Dalam reaksi oksidasi, atom atau ion yang terlibat dalam reaksi tersebut mengalami peningkatan bilangan oksidasi (biasanya karena kehilangan elektron)

Orbital	Daerah dalam ruang di sekitar inti atom di mana kemungkinan menemukan elektron sangat tinggi. Setiap orbital menggambarkan probabilitas lokasi elektron pada suatu tingkat energi tertentu, dan bentuk serta orientasinya tergantung pada jenis orbital tersebut.
Proton	Partikel subatom yang memiliki muatan positif dan terdapat di dalam inti atom, bersama dengan neutron
Plasma	Salah satu dari empat materi utama (selain padat, cair, dan gas), yang terbentuk ketika gas dipanaskan atau diberikan energi dalam bentuk listrik hingga cukup kuat untuk memisahkan elektron dari atom-atomnya, menghasilkan ion positif dan elektron bebas.
Polimer	Molekul besar yang terdiri dari banyak unit kecil yang disebut monomer, yang bergabung melalui ikatan kimia untuk membentuk rantai panjang. Polimer dapat ditemukan dalam berbagai bentuk dan aplikasi, baik yang alami (seperti protein dan DNA) maupun sintetis (seperti plastik dan karet).
Pirolisis	Proses pemecahan bahan organik, seperti plastik, biomassa, atau bahan organik lainnya, menjadi produk-produk yang lebih sederhana melalui pemanasan pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen (atau dengan sedikit oksigen)
Properties	Ciri-ciri atau karakteristik yang dimiliki oleh suatu zat atau objek. Dalam konteks sains, terutama kimia dan fisika, properties digunakan untuk menggambarkan bagaimana suatu materi berperilaku atau bereaksi di bawah kondisi tertentu.

Slush	Slush juga merujuk pada campuran cairan dan bahan padat yang digunakan dalam berbagai aplikasi teknis
Syngas	Gas yang terdiri dari campuran karbon monoksida (CO), hidrogen (H ₂), dan sejumlah kecil karbon dioksida (CO ₂) dan metana (CH ₄). Syngas diproduksi melalui proses konversi bahan bakar fosil, biomassa, atau sampah menjadi gas dengan tujuan untuk digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku industri kimia.
Turbocharge	Perangkat yang digunakan untuk meningkatkan kinerja mesin pembakaran internal, seperti pada kendaraan atau mesin industri, dengan cara meningkatkan jumlah udara (oksigen) yang masuk ke dalam ruang bakar mesin

BIOGRAFI PENULIS



Betty Ariani adalah seorang Dosen dan Periset di Universitas Muhammadiyah Surabaya. Mendapatkan gelar Sarjana, Master dan Doktor dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember ITS Surabaya pada bidang Teknologi Kelautan. Saat ini menjadi salah satu Dosen Tetap di Program Studi Teknik Perkapalan dengan keahlian bidang Sistem Energi dan Permesinan Kapal. Ketertarikan riset pada bidang Teknologi Hijau Maritim yang meliputi pengembangan bahan bakar alternatif di kapal, efisiensi energi dan teknologi control emisi kapal. Menjadi penerima beberapa *Research Grant* dari Kemdikbudristek, LPDP, BRIN maupun Diktilitbang PP Muhammadiyah pada topik terkait energi dan permesinan kapal. Untuk korespondensi via email betty.ariani@ft.um-surabaya.ac.id



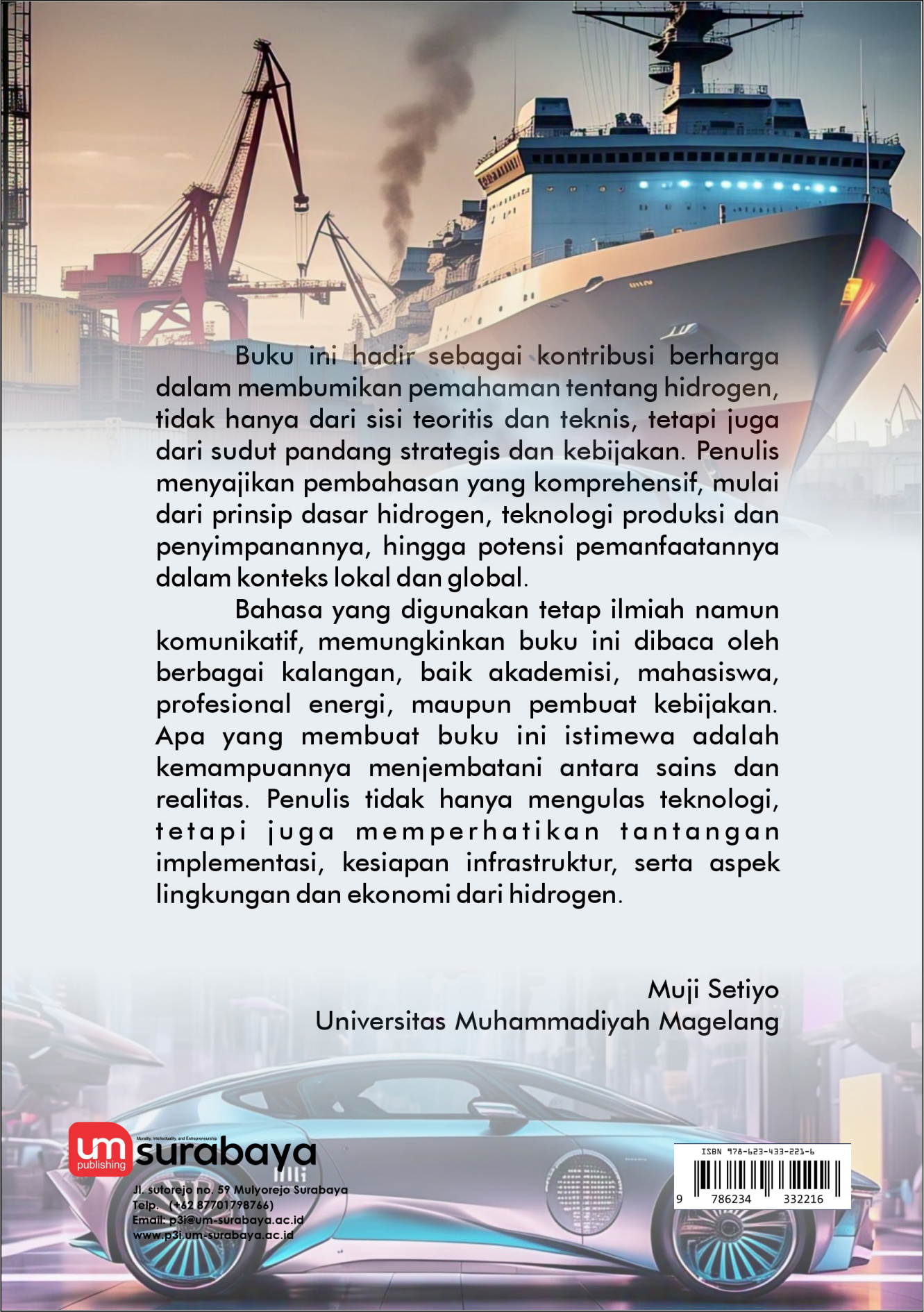
Frengki Mohamad Felayati adalah seorang Dosen dan Periset di Universitas Hang Tuah Surabaya. Lulus Sarjana di Teknik Sistem Perkapalan dan merupakan salah satu Awardee PMDSU dan meraih gelar Doktor dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember bidang Ilmu Teknik Kelautan pada 2021. Riset – riset beliau banyak terkait dengan system bahan bakar di kapal, mesin dual fuel dan energi Sandwich PMDU, Kemenristekdikti, University of Manitoba pada topik terkait energi dan permesinan kapal. Untuk korespondensi via email frengki@hangtuah.ac.id



Moh. Arif Batutah, Dosen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya, lulusan Sarjana Teknik Kimia di Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, program Magister dan Doktor dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya bidang Teknologi Proses. Beberapa tulisan dan penelitian saat ini berfokus pada pembakaran, bahan bakar dan energi terbarukan, email korespondensi arifbatutah@ft.um-surabaya.ac.id



Kuntang Winangun adalah seorang Dosen dan Periset di Universitas Muhammadiyah Ponorogo. Mendapatkan gelar Sarjana dan Master dari Universitas Negeri Surabaya, dan Doktor dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember ITS Surabaya pada bidang Konversi Energi. Saat ini menjadi salah satu Dosen Tetap di Program Studi Teknik Mesin dengan keahlian bidang Konversi Energi, Teknologi Otomotif, dan Biofuel. Ketertarikan riset pada bidang Teknologi Hijau yang meliputi pembakaran, bahan bakar dan energi terbarukan. Menjadi penerima beberapa *Research Grant* dari Kemdikbudristek, LPDP, BRIN maupun Diktilitbang PP Muhammadiyah pada topik terkait energi terbarukan. Untuk korespondensi via email kuntang@umpo.ac.id



Buku ini hadir sebagai kontribusi berharga dalam membumikan pemahaman tentang hidrogen, tidak hanya dari sisi teoritis dan teknis, tetapi juga dari sudut pandang strategis dan kebijakan. Penulis menyajikan pembahasan yang komprehensif, mulai dari prinsip dasar hidrogen, teknologi produksi dan penyimpanannya, hingga potensi pemanfaatannya dalam konteks lokal dan global.

Bahasa yang digunakan tetap ilmiah namun komunikatif, memungkinkan buku ini dibaca oleh berbagai kalangan, baik akademisi, mahasiswa, profesional energi, maupun pembuat kebijakan. Apa yang membuat buku ini istimewa adalah kemampuannya menjembatani antara sains dan realitas. Penulis tidak hanya mengulas teknologi, tetapi juga memperhatikan tantangan implementasi, kesiapan infrastruktur, serta aspek lingkungan dan ekonomi dari hidrogen.

Muji Setiyo
Universitas Muhammadiyah Magelang



Monthly, Industriality, and Entrepreneurship

surabaya

Jl. sutorejo no. 59 Mulyorejo Surabaya
Telp. (+62 87701798766)
Email: p3i@um-surabaya.ac.id
www.p3i.um-surabaya.ac.id

ISBN 978-623-433-221-6



9

786234

332216

