

KURNIAWAN
NANANG RUHYAT

INTRODUKSI RANTAI NILAI HIDROGEN



2024

Introduksi Rantai Nilai Hidrogen

**Kurniawan
Nanang Ruhyat**

Bogor, 24 Juni 2024

Penerbit
Perkumpulan Indonesia Fuel Cell and Hydrogen Energy (IFHE)

Introduksi Rantai Nilai Hidrogen

Daftar Penulis:

Kurniawan
Nanang Ruhyat

ISBN : (Dalam Proses)

Desain Sampul dan Tata Letak:
Kurniawan

Penerbit:
Perkumpulan Indonesia Fuel Cell And Hydrogen Energy (IFHE)

Redaksi:
Blok B/28 Bukit Cimanggu City, Tanah Sareal Bogor
Telp: 0822 1052 0510

Distributor Tunggal:
Perkumpulan Indonesia Fuel Cell and Hydrogen Energy (IFHE)

Cetakan pertama, Juni 2024

Hak Cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ke dalam bentuk apapun, secara elektronis maupun mekanis, termasuk fotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit. Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Kata Pengantar

Puji syukur kepada Alloh SWT, atas rahmat dan hidayahnya serta taufiknya sehingga buku ini dapat terwujud dan semoga menjadi amal jariyah kelak.

Sholawat serta salam kepada Nabi besar Muhammad SAW yang telah menjadi penyempurna akhlak manusia menjadi yang beradab.

Buku berjudul "**Introduksi Rantai Nilai Hidrogen**" ini membahas mengenai rantai nilai hidrogen mulai dari proses produksi, penyimpanan hingga aplikasinya. Proses produksi hidrogen dan juga penggunaannya pada kondisi saat ini hingga potensi di masa depan, di detailkan beberapa proses yaitu produksi hidrogen hijau dengan proses elektrolisis.

Untuk aplikasi di titik beratkan pada aplikasi yang ramah lingkungan yaitu hidrogen digunakan dengan teknologi fuel cell dengan tingkat efisiensi yang lebih tinggi daripada dengan cara pembakaran internal. Teknologi fuel cell akan banyak dibahas juga lengkap dengan jenis-jenisnya dan juga komponen pendukungnya terutama PEM fuel cell.

Penulis berharap dengan adanya buku ini pembaca dapat memiliki gambaran tentang bagaimana hidrogen diproduksi dan juga aplikasinya yang ramah lingkungan sehingga dapat membantu sektor-sektor industri dan transportasi menurunkan emisi gas rumah kaca.

Penulis

Daftar Isi

Kata Pengantar	i
Daftar Isi	i
Daftar gambar	ii
Hidrogen	1
A. Definisi	1
B. Sifat-sifat Hidrogen	2
C. Keamanan dasar	3
D. Penggunaan saat ini	5
Produksi Hidrogen	7
E. Steam Reforming	10
F. Termokimia	13
G. Gasifikasi	14
H. Secara Biologi	16
I. Elektrolisis	18
J. Technology Readiness Level (TRL)	24
Penyimpanan Hidrogen	27
1. Penyimpanan Hidrogen Tekanan Tinggi	29
2. Penyimpanan Hidrogen Cair/Kriogenik	31
3. Penyimpanan Hidrogen Cryo-Compressed	32
4. Hidrogen Cair	32
5. Amonia	33
6. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)	33
7. Logam hidrida	34
8. Penyerapan Secara Fisika	36
Transportasi dan distribusi Hidrogen	38
1. Menggunakan truk	39
2. Menggunakan Pipa	39
3. Menggunakan kapal laut	39
K. Hydrogen Refueling Station (HRS)	39
1. Komponen-komponen HRS	40
2. Rantai pasok hidrogen untuk HRS	41
Aplikasi Hidrogen	42
A. Fuel Cell (FC)	42
1. Sejarah Fuel Cell	42
2. Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i>	44
3. Komponen <i>fuel cell</i>	50
B. Sektor Transportasi	52
1. Kendaraan Penumpang	53
2. Truk dan Bus	54
3. Kendaraan khusus	54

4.	Kapal Ferry	55
C.	Sektor Energi Listrik	55
1.	Pembangkit Listrik	55
2.	Penyimpanan Energi.....	56
D.	Sebagai Media Pendingin.....	58
E.	Industri Pupuk	58
F.	Industri Logam	59
G.	Pengolahan Minyak.....	61
H.	Industri Makanan	61
	Masa Depan dan Tantangan Aplikasi Hidrogen	64
A.	Perspektif Masa depan	64
B.	Tantangan.....	65
1.	Produksi Bersih.....	65
2.	Infrastruktur	65
3.	Efisiensi	65
4.	Biaya.....	66
5.	Keamanan	66

Daftar gambar

Gambar 1	Gambar matahari sebagai fusi hidrogen	1
Gambar 2	Hidrogen dalam tabel periodik.....	2
Gambar 3	Batas terbakar hidrogen di udara	3
Gambar 4	Sampul SNI hidrogen	4
Gambar 5	Langkah keselamatan hidrogen	5
Gambar 6	Proyeksi kegutuhan hidrogen dunia	5
Gambar 7	Bauran energi global dan Indonesia 2022	6
Gambar 8	Warna produksi hidrogen dan jejak emisinya	7
Gambar 9	Proses steam methan reforming (SMR)	11
Gambar 10	Proses MSR dengan CCS.....	12
Gambar 11	Metode-metode produksi hidrogen.....	13
Gambar 12	Proses gasifikasi	14
Gambar 13	Proses gasifikasi biomassa	15
Gambar 14	Proses produksi biohidrogen.....	18
Gambar 15	Grafik ilustrai elektrolisi.....	19
Gambar 16	Contoh elektrolizer dalam bentuk kontainer	20
Gambar 17	Block flow diagram of a typical PEM water electrolysis system .	21
Gambar 18	beberapa produsen electrolyzer dari beberapa negara dan jenis teknologinya.....	26
Gambar 19	Bagaimana hidrogen disimpan.....	28
Gambar 20	Penyimpanan hidrogen dan temperaturnya	29
Gambar 21	Hidrogen disimpan pada tabung bertekanan.....	29

Gambar 22	Tampak tabung hidrogen tekanan tinggi	31
Gambar 23	Contoh penyimpanan hidrogen dalam padatan.....	36
Gambar 24	Ilustrasi pengangkutan hidrogen	39
Gambar 25	Rantai pasok hidrogen.....	39
Gambar 26	Sejarah singkat fuel cell	43
Gambar 27	Temperatur operasi fuel cell.....	44
Gambar 28	Ilustrasi ion yang bergerak pada semua jenis fuel cell	45
Gambar 29	Ilustrasi komponen-komponen fuel cell.....	50
Gambar 30	Contoh-contoh kendaraan fuel cell.....	53
Gambar 31	Ilustrasi fuel cell di kendaraan.....	53
Gambar 32	Contoh truk fuel cell.....	54
Gambar 33	Contoh forklift fuel cell	54
Gambar 34	Contoh kapal ferry menggunakan fuel cell	55
Gambar 35	Skema sederhana fuel cell sebagai pembangkit listrik	56
Gambar 36	Hidrogen sebagai penyimpan anergi pada sistem terbarukan ..	57
Gambar 37	Perbandingan sistem rating dan dischrge	57
Gambar 38	Flow diagram pada industri pupuk	59
Gambar 39	Aplikasi hidrogen pada industri baja.....	60
Gambar 40	Aplikasi hidrogen pada pengolahan minyak	61
Gambar 41	Posesn hidrogenasi pada makanan.....	63

Hidrogen

A. Definisi

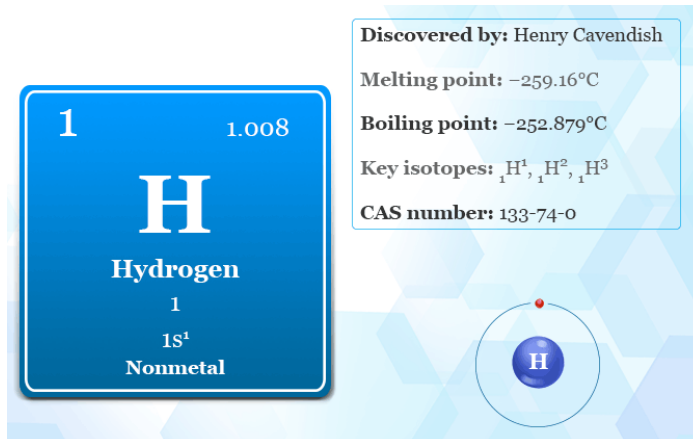
Hidrogen (H), adalah zat gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, mudah terbakar, yang merupakan anggota paling sederhana dari keluarga unsur kimia. Setiap atom hidrogen memiliki hanya satu proton. Hidrogen juga merupakan unsur yang paling melimpah di alam semesta bukan hanya di bumi.

Hidrogen terjadi secara alami di Bumi dalam bentuk senyawa dengan unsur lain dalam berbagai wujud fisik, termasuk cairan, gas, atau padatan. Senyawa hidrogen dapat ditemukan dalam bentuk air (H_2O), hidrokarbon seperti metana (CH_4), dan berbagai senyawa organik dan anorganik lainnya. Hidrogen juga dapat ditemukan dalam gas alam, air tanah, dan mineral tertentu. Dalam atmosfer, hidrogen terdapat dalam jumlah yang sangat kecil, sebagian besar berikatan dengan oksigen dalam bentuk air.



Gambar 1 Gambar matahari sebagai fusi hidrogen

Matahari pada dasarnya adalah bola gas hidrogen raksasa yang mengalami fusi menjadi gas helium. Proses ini menyebabkan matahari menghasilkan jumlah energi yang sangat besar.



Gambar 2 Hidrogen dalam tabel periodik

Henry Cavendish sering diakui sebagai orang yang mengenali hidrogen sebagai substansi yang berbeda pada tahun 1766. Dia menyebutnya "udara yang mudah terbakar" dan melakukan berbagai percobaan untuk mempelajari sifatnya. Antoine Lavoisier, yang sering dianggap sebagai "bapak kimia modern," memberi nama hidrogen pada tahun 1783. Dia mengakui hidrogen sebagai unsur fundamental dan memberinya nama "hidrogen," berasal dari kata Yunani "*hydro*" (air) dan "*genes*" (membentuk), yang berarti "pembentuk air," karena perannya dalam pembentukan air saat terbakar.

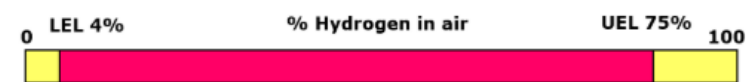
B. Sifat-sifat Hidrogen

Selain sebagai zat gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, mudah terbakar, berikut sifat fisik dan kimia dari hidrogen:

- Keadaan: Hidrogen adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa pada suhu kamar.
- Kepadatan: Ini adalah unsur paling ringan, dengan kepadatan yang sangat rendah dibandingkan dengan unsur lainnya.
- Titik Didih dan Titik Beku: Hidrogen memiliki titik didih yang rendah (-252,87°C atau -423,17°F) dan titik beku (-259,2°C atau -434,6°F).
- Kelarutan: Ini mudah larut dalam air dan pelarut lainnya.
- Isotop: Hidrogen memiliki tiga isotop: protium (yang paling melimpah dan stabil), deuterium, dan tritium.

Sifat Kimia:

- **Flammability:** Hidrogen sangat mudah terbakar dan terbakar di udara atau oksigen dengan nyala yang tidak berwarna, menghasilkan panas dan uap air. H_2 memiliki rentang mudah terbakar yang luas di udara, mulai dari 4% hingga 74,5%. Energi yang diperlukan minimum untuk menyulut sangat rendah, yaitu 0,02 mili joule, yang setidaknya sepuluh kali lebih rendah daripada hidrokarbon seperti metana atau propana. Energi penyulutan ini begitu rendah sehingga kadang-kadang dapat terjadi penyulutan-langsung, pada kecepatan tinggi, ventilasi, atau penurunan tekanan. Temperatur penyulutan-langsung H_2 pada tekanan atmosfer adalah $535^{\circ}C$. H_2 terbakar dengan nyala yang tidak terlihat di siang hari.
- **Reaktivitas:** Ini dengan mudah bereaksi dengan unsur lain untuk membentuk senyawa. Misalnya, ia bereaksi dengan oksigen untuk membentuk air (H_2O) dan dengan halogen untuk membentuk hidrogen halida.
- **Agen Pereduksi:** Hidrogen dapat bertindak sebagai agen pereduksi dalam reaksi kimia dengan mendonasikan elektron. Misalnya, dalam proses Haber, ia mengurangi nitrogen untuk membentuk amonia.
- **Hidrogenasi:** Ini terlibat dalam reaksi hidrogenasi, di mana hidrogen ditambahkan ke senyawa tak jenuh (misalnya, alkena) untuk membentuk senyawa jenuh (misalnya, alkana).
- **Sifat Asam-Basa:** Ion hidrogen (H^+) memainkan peran penting dalam reaksi asam-basa. Di dalam air, ion hidrogen bergabung dengan molekul air untuk membentuk ion hidronium (H_3O^+), membuat larutan menjadi asam.



Gambar 3 Batas terbakar hidrogen di udara¹

C. Keamanan dasar

Indonesia telah mengadopsi standar nasionalnya sendiri untuk mengatur dasar-dasar keselamatan terkait bahan bakar hidrogen, yang secara spesifik dirinci dalam SNI 7928:2013. Standar ini memberikan kerangka kerja yang jelas dan terukur untuk memastikan keamanan dalam penggunaan,

¹ <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC247.pdf>

penyimpanan, dan transportasi bahan bakar hidrogen di seluruh negeri. Dengan adopsi standar ini, Indonesia menunjukkan komitmen dalam memastikan bahwa penggunaan bahan bakar hidrogen di negeri ini dilakukan dengan aman dan bertanggung jawab.



Gambar 4 Sampul SNI hidrogen

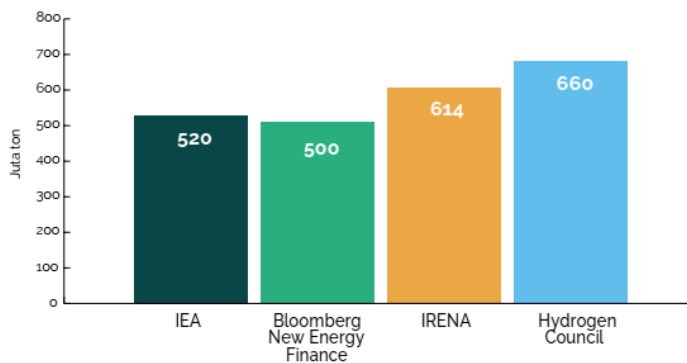




Gambar 5 Langkah keselamatan hidrogen²

D. Penggunaan saat ini

Dalam industri kimia, Hidrogen adalah bahan baku utama dalam produksi amonia melalui proses Haber-Bosch. Amonia digunakan dalam pembuatan pupuk, bahan peledak, dan produk kimia lainnya seperti sikloheksana serta metanol, yang merupakan intermediate dalam produksi plastik dan farmasi. Juga digunakan untuk proses refinery menghilangkan belerang dari bahan bakar selama proses penyulingan minyak. Pada industri makanan jumlah besar hidrogen digunakan untuk menghidrogenasi minyak menjadi lemak, misalnya untuk membuat margarin. Selain itu juga sebagai agen pembersih hidrogen peroksida (H_2O_2), pemutih, desinfektan dan digunakan pada industri elektronik terutama produksi semikonduktor sebagai gas pembilasan. Diperkirakan Proyeksi pasar hidrogen global di tahun 2050

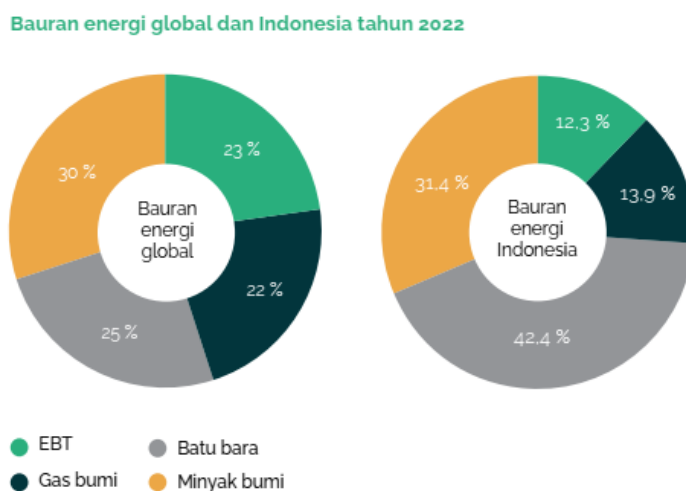


Gambar 6 Proyeksi kekuatan hidrogen dunia

Hidrogen kini sedang dipertimbangkan oleh sebagian besar negara sebagai solusi kunci untuk mencapai target Net Zero Emissions (NZE) pada

² airliquide.com

rentang waktu antara tahun 2040 hingga 2070. Dengan meningkatnya kesadaran akan dampak negatif perubahan iklim, banyak negara telah mengadopsi komitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca hingga mencapai titik netralisasi karbon. Sebagai alternatif yang berpotensi bersih dan ramah lingkungan, hidrogen menawarkan peluang besar dalam transformasi sistem energi global. Dengan memanfaatkan sumber daya terbarukan seperti energi surya dan angin untuk memproduksi hidrogen hijau, negara-negara berupaya menggantikan bahan bakar fosil dengan bahan bakar yang lebih bersih dan berkelanjutan.



Gambar 7 Bauran energi global dan Indonesia 2022³

Meskipun tren penggunaan energi terbarukan terus berkembang pesat di berbagai negara dan menjadi pilihan yang murah dan terjangkau, bauran energi global masih didominasi oleh energi berbahan bakar fosil. Sumber-sumber energi konvensional seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara masih menjadi sumber utama energi dunia. Hingga tahun 2022, minyak bumi tetap mendominasi bauran energi dunia dengan 30%, sementara bauran energi nasional masih didominasi oleh minyak bumi (31,40%), diikuti oleh batubara (42,3%) dan gas alam (13,92%). Sementara itu, andil energi baru terbarukan baru mencapai 12,3%.

³ Strategi Hidrogen Nasional Indonesia

Produksi Hidrogen

Hidrogen dapat diproduksi melalui berbagai macam cara dan teknologi. Hidrogen bukanlah pembawa energi primer sehingga perlu diproduksi dari sumber utama seperti batu bara, gas alam, angin, matahari, dan sumber energi lainnya. Saat ini 97 % hidrogen di dunia diproduksi dari bahan bakar fosil terutama gas alam.

Tiga teknologi utama untuk produksi hidrogen dalam skala kecil adalah SMR, pemecahan metanol, dan elektrolisis. Steam methane reforming dan pemecahan metanol keduanya merupakan teknologi produksi hidrogen berbasis termal, sementara elektrolisis menggunakan listrik sebagai daya penggerak untuk produksi hidrogen.

Bagian ini memberikan gambaran umum tentang proses-proses tersebut. Hidrogen dapat diklasifikasikan berdasarkan: (1) proses produksi; (2) bahan baku; (3) sumber energi; dan (4) emisi yang dihasilkan. Klasifikasi umum yang sering digunakan saat ini adalah berdasarkan sumber energi yang dikategorikan berdasarkan warna seperti pada Tabel 1.

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

* GHG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.

Gambar 8 Warna produksi hidrogen dan jejak emisinya⁴

⁴ <http://dx.doi.org/10.3390/su14031930>

Hidrogen sering diklasifikasikan berdasarkan metode produksinya, yang diberi kode warna untuk menggambarkan sumber energi dan proses yang digunakan. Berikut adalah penjelasan mengenai beberapa jenis hidrogen berdasarkan warna produksinya:

a. Grey Hydrogen

Grey hydrogen yaitu hidrogen yang diproduksi dari bahan bakar fosil, terutama melalui proses reformasi metana dengan uap, *steam methane reforming* (SMR) atau gasifikasi batubara. Proses ini menghasilkan hidrogen, tetapi juga menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) yang dilepaskan ke atmosfer. Grey hydrogen adalah jenis hidrogen yang paling umum diproduksi saat ini diseluruh dunia.

b. Blue Hydrogen

Blue hydrogen juga diproduksi dari bahan bakar fosil menggunakan metode seperti SMR atau gasifikasi batubara. Namun, dalam produksi pembuatan blue hydrogen, CO_2 yang dihasilkan tidak dilepaskan ke atmosfer tetapi CO_2 yang menjadi emisi ditangkap dan disimpan menggunakan teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS). Dengan demikian, blue hydrogen lebih ramah lingkungan dibandingkan grey hydrogen karena emisi karbonnya lebih rendah sehingga menghilangkan dampak buruknya.

c. Green Hydrogen

Green hydrogen atau hydrogen hijau, hidrogen yang diproduksi diproduksi melalui proses elektrolisis Atau pemecahan air, di mana listrik digunakan untuk memisahkan air (H_2O) menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Namun listrik yang digunakan berasal dari sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, atau hidro, atau juga listrik dari grid yang sudah mendapatkan sertifikat hijau yang disebut Renewable Energy Certificate (REC) maka hidrogen yang dihasilkan disebut green hydrogen. Proses ini tidak menghasilkan emisi CO_2 ,

menjadikan green hydrogen sebagai opsi paling ramah lingkungan untuk diproduksi.

d. Turquoise Hydrogen

Turquoise hydrogen yaitu diproduksi melalui proses pirolisis metana, di mana gas alam diuraikan menjadi hidrogen dan karbon padat tanpa menghasilkan CO₂. Proses ini masih dalam tahap pengembangan, tetapi memiliki potensi untuk menghasilkan hidrogen dengan dampak lingkungan yang lebih rendah jika karbon padat yang dihasilkan dapat dikelola dengan baik.

e. Brown/Black Hydrogen

Brown atau *black hydrogen* diproduksi melalui gasifikasi batubara. Brown hydrogen merujuk pada hidrogen yang diproduksi dari batubara lignit (batubara dengan kualitas lebih rendah), sedangkan *black hydrogen* berasal dari batubara bitumen (batubara dengan kualitas lebih tinggi). Proses ini menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan tinggi dan paling berpolusi dibandingkan dengan proses produksi yang lain.

f. Pink Hydrogen

Pink hydrogen diproduksi melalui elektrolisis air yang menggunakan listrik dari tenaga nuklir. Meskipun tidak menghasilkan emisi CO₂ selama proses produksi, penggunaan tenaga nuklir memiliki kontroversi terkait limbah radioaktif dan risiko keselamatan.

g. Yellow Hydrogen

Yellow hydrogen atau hidrogen kuning diproduksi melalui elektrolisis air menggunakan listrik dari sumber yang tidak terbatas pada energi terbarukan, misalnya campuran energi grid yang mencakup energi fosil dan energi

terbarukan. Sifat ramah lingkungannya bergantung pada proporsi energi terbarukan dalam campuran tersebut.

h. White Hydrogen

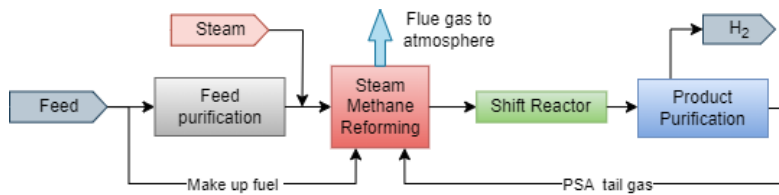
White hydrogen merujuk pada hidrogen yang ditemukan secara alami di bawah tanah. Ini adalah jenis hidrogen yang paling jarang dan belum dieksploitasi secara komersial dan sedang di riset untuk melihat skala keekonomiannya jika diproduksi secara industri.

Berikut penjelasan beberapa proses produksi hidrogen.

E. Steam Reforming

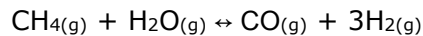
Steam Reforming merupakan teknologi lama yang digunakan untuk memproduksi gas hidrogen dengan bahan baku dari gas alam. Namun proses SMR cocok untuk rentang bahan baku termasuk gas alam cair, refinery off gas, dan hidrokarbon cair ringan hingga nafta.

Proses SMR terdiri dari empat langkah dasar: penyulingan bahan baku, reforming uap, konversi pergeseran, dan penyulingan produk. Penyulingan produk umumnya dilakukan dengan pressure swing adsorption (PSA), yang menghasilkan aliran produk hidrogen (hingga ke kemurnian produk 99,999%) dan waste stream (PSA tail gas). Proses SMR dengan penyulingan PSA diilustrasikan dalam Gambar 1.



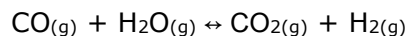
Gambar 9 Proses steam methan reforming (SMR) ⁵

Saat ini, sekitar 95% dari hidrogen yang ada di pasar diproduksi dengan proses ini. Pada proses ini, metana yang terkandung pada gas alam diekstrak dan direaksikan dengan uap untuk menghasilkan hidrogen. Secara umum, reaksi yang terjadi pada proses steam reforming adalah reaksi endotermik yaitu:

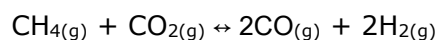


Selain reaksi utama tersebut, ada beberapa reaksi samping yang terjadi dalam proses SMR:

Reaksi Water-Gas Shift Reaction:

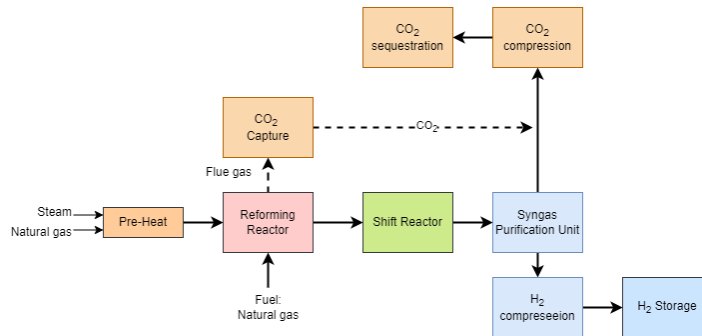


Reaksi Water-Gas Reforming:



Reaksi ini terjadi dalam beberapa tahap dan dalam kondisi operasi yang dikendalikan dengan hati-hati untuk memaksimalkan produksi hidrogen. Untuk mempercepat reaksi dan meningkatkan efisiensi proses proses SMR juga memerlukan katalis, biasanya berbasis nikel.

⁵ EIGA DOC 246

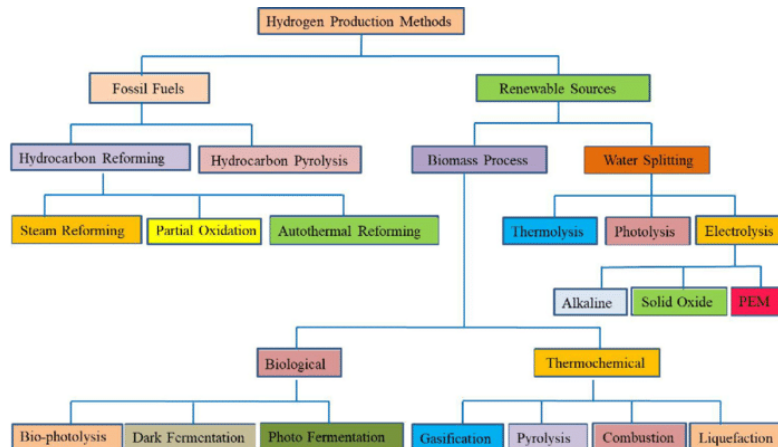


Gambar 10 Proses MSR dengan CCS⁶

SMR with CCS

Seperti dijelaskan secara singkat sebelumnya pada bagian warna-warna Hidrogen bahwa smr dengan CCS prosesnya sama hanya dengan menambahkan komponen penangkap karbon komponen ini digunakan untuk mengurangi ataupun menghilangkan emisi CO₂ dari reaksi tersebut Karbon yang ditangkap tadi dapat juga digunakan untuk keperluan yang lain dan juga memiliki nilai ekonomian yang cukup tinggi

⁶ DOI:10.1016/j.enconman.2022.115245.



Gambar 11 Metode-metode produksi hidrogen⁷

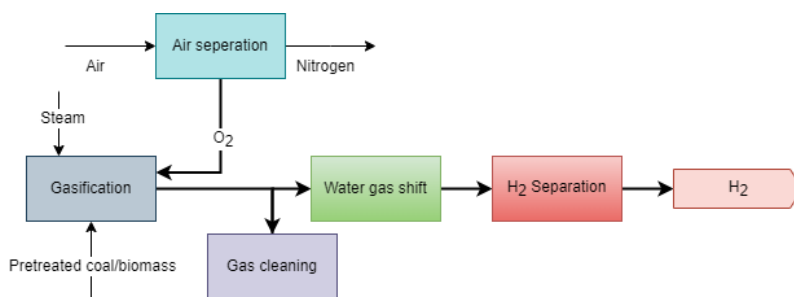
F. Termokimia

Metode termokimia adalah pendekatan dalam produksi hidrogen dengan mengubah biomassa menjadi bentuk gas dan cair. Gas yang dihasilkan, yang merupakan produk biofuel, adalah hidrogen yang dapat digunakan sebagai bahan bakar dan disimpan dalam sistem untuk energi. Teknologi termokimia membagi produksi hidrogen dari biomassa menjadi tiga jenis: gasifikasi, likuifikasi, dan pirolisis. Saat ini, pirolisis dan gasifikasi adalah metode yang paling umum digunakan dalam produksi hidrogen dari biomassa. Diagram alir proses produksi hidrogen dari biomassa menggunakan metode termokimia dapat dilihat pada Gambar

⁷ Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review : <http://dx.doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>

G. Gasifikasi

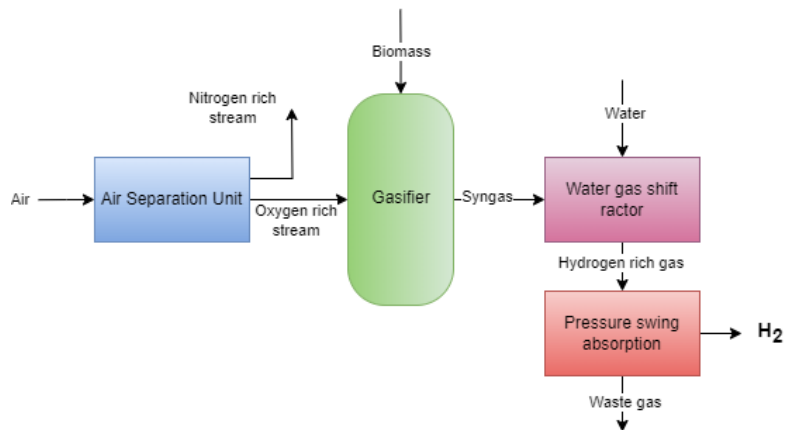
Proses gasifikasi dalam teknologi produksi hidrogen dapat menggunakan bahan baku seperti batu bara atau biomassa. Proses ini melibatkan reaksi antara batu bara atau biomassa dengan oksigen dan uap air untuk menghasilkan gas sintesis. Setelah itu, molekul hidrogen dipisahkan dari gas sintesis menggunakan sistem pemisahan. Penggunaan biomassa sebagai bahan baku dalam proses gasifikasi menjanjikan sebagai sumber energi terbarukan. Namun, hasil produksi dan kualitas hidrogen selama gasifikasi biomassa dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis gasifier, jumlah uap air, jumlah agen gasifikasi, komposisi biomassa, dan lain-lain.



Gambar 12 Proses gasifikasi⁸

Gasifikasi biomassa

⁸ Technoeconomics and Sustainability of Renewable Methanol and Ammonia Productions Using Wind Power-based Hydrogen, <http://dx.doi.org/10.4172/2090-4568.1000128>



Gambar 13 Proses gasifikasi biomassa

Dalam proses gasifikasi, terdapat tiga tahap utama yang harus dilalui, yakni pengeringan biomassa; di mana biomassa yang digunakan harus dikeringkan terlebih dahulu untuk menghilangkan kelembaban. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa biomassa memiliki kadar air yang rendah sehingga reaksi pirolisis dan reduksi dapat berlangsung efisien. Tahap kedua, pirolisis; dimana biomassa yang telah dikeringkan dipanaskan pada suhu tinggi tanpa udara, menyebabkan pemecahan molekul-molekul kompleks menjadi komponen-komponen sederhana, seperti gas, cairan, dan padatan. Reaksi pirolisis menghasilkan gas volatil, termasuk hidrokarbon, karbon monoksida, karbon dioksida, dan hidrogen. Kemudian diikuti oleh tahap pembakaran; di mana gas volatil yang dihasilkan dari pirolisis bereaksi dengan agen pengurang, biasanya karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂), untuk menghasilkan gas sintesis, yang terutama terdiri dari hidrogen dan karbon monoksida.

Bahan Biomassa + Udara → H₂ + CO₂ + CH₄ + CO + N₂ + Tar + Char + H₂O + Hidrokarbon

Pirolisis

Pirolisis adalah proses di mana biomassa padat, seperti karbon atau biomassa organik lainnya, dipanaskan tanpa adanya oksigen, sehingga menghasilkan senyawa gas, bahan bakar cair, dan arang padat. Teknologi pirolisis ini berkembang karena kemudahannya dalam pengoperasian. Jenis biomassa

padat yang cocok untuk teknologi ini meliputi limbah lumpur, sisa-sisa hutan, sampah organik perkotaan, dan sisa-sisa panen. Proses pirolisis terdiri dari empat tahap utama:

- Pengeringan (100°C – 200 °C): Pada tahap ini, uap air dihilangkan dari biomassa untuk meningkatkan efisiensi proses.
- Pirolisis (200 °C – 500 °C): Biomassa dipanaskan pada suhu tinggi, menyebabkan dekomposisi menjadi senyawa gas, bahan bakar cair, dan arang padat.
- Pembakaran (Combustion): Tahap ini melibatkan pembakaran gas-gas yang dihasilkan selama pirolisis untuk mempertahankan suhu tinggi dalam reaktor.
- Reduksi (Reduction): Pada tahap ini, arang padat yang dihasilkan dari pirolisis direduksi menjadi produk akhir yang diinginkan.

Proses pirolisis memiliki variasi tergantung pada beberapa karakteristik, seperti suhu reaksi, laju pemanasan, waktu reaksi, dan lain-lain. Oleh karena itu, pirolisis dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama:

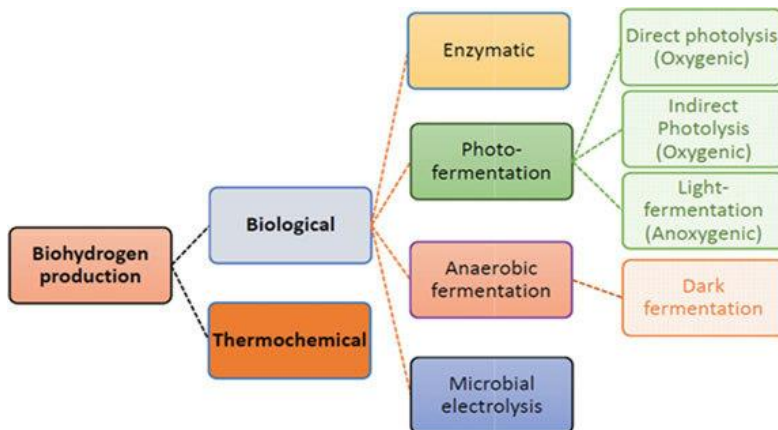
- Fast Pyrolysis: Pirolisis cepat adalah jenis di mana biomassa dipanaskan pada suhu tinggi dengan cepat, menghasilkan sebagian besar bahan bakar cair dan gas.
- Slow Pyrolysis: Pirolisis lambat terjadi pada suhu yang lebih rendah dan berlangsung dalam waktu yang lebih lama, menghasilkan jumlah yang lebih besar dari arang padat daripada bahan bakar cair.
- Flash Pyrolysis: Pirolisis kilat adalah metode di mana biomassa dipanaskan dalam waktu yang sangat singkat di bawah kondisi tekanan tinggi, menghasilkan sebagian besar bahan bakar cair.

H. Secara Biologi

Saat upaya pengurangan penggunaan energi dari bahan bakar fosil dilakukan, energi yang berasal dari hidrogen menjadi alternatif menarik yang dapat

digunakan sebagai pengganti. Namun, tantangannya adalah hampir 95% dari sumber hidrogen diproduksi dari bahan bakar fosil seperti gas alam, batu bara, nafta, dan sebagainya. Ironisnya, ini justru dapat meningkatkan tingkat pencemaran udara daripada menjadikannya sebagai sumber energi bersih. Oleh karena itu, pengembangan teknologi alternatif untuk produksi hidrogen yang menggunakan sumber energi terbarukan dan memiliki emisi nol menjadi sangat penting untuk menciptakan masa depan yang berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah produksi hidrogen menggunakan mikroba seperti bakteri dan mikroalga.

Mikroba ini mampu menghasilkan hidrogen melalui reaksi biologis yang menggunakan energi matahari atau materi organik sebagai sumbernya. Hidrogen yang dihasilkan melalui proses ini dikenal sebagai biohidrogen. Produksi hidrogen menggunakan teknologi ini memanfaatkan air limbah sebagai bahan bakunya, yang kemudian akan mengalami proses fermentasi melalui beberapa rute yang dapat diilustrasikan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 14 Proses produksi biohidrogen. Dengan memanfaatkan mikroba dan sumber energi terbarukan, teknologi biohidrogen menawarkan solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk kebutuhan energi masa depan dan perlu penelitian lebih lanjut untuk skala industri.



Gambar 14 Proses produksi biohidrogen⁹

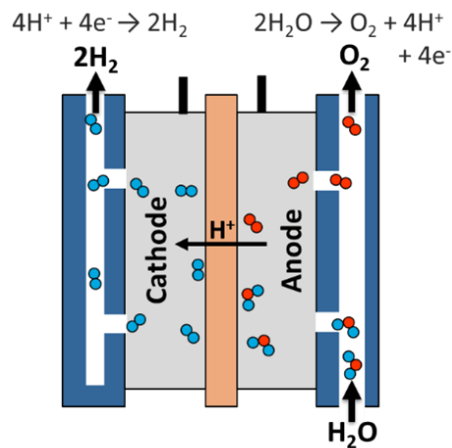
I. Elektrolisis

Metode ini melibatkan pemecahan air (H₂O) menjadi hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) menggunakan listrik. Proses ini dapat dilakukan dengan elektrolisis bertenaga listrik dari sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, tenaga angin, atau hidroelektrik. Elektrolisis air adalah salah satu cara paling umum dan ramah lingkungan untuk memproduksi hidrogen. Reaksi ini berlangsung dalam unit yang disebut electrolyzer. Electrolyzer sangat cocok untuk produksi hidrogen terdistribusi dalam skala kecil hingga skala besar. Reaksi dasar dari elektrolisis air adalah pada persamaan berikut.



Selama dua abad terakhir, elektrolisis dari air adalah teknologi yang terkenal dan umum, untuk produksi hidrogen hijau (*green hydrogen*), namun hanya 4 % secara global atau sekitar 65 juta ton yang dapat diproduksi dari air. Teknologi ini terus menerus dikembangkan dan digunakan dalam aplikasi riset dan industri.

⁹ Biohydrogen Production: Integrated Approaches to Improve the Process Efficiency, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-52666-9_9



Gambar 15 Grafik ilustrai elektrolisi

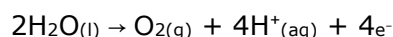
Pada buku ini akan dibahas 4 teknologi elektroliser yang dibedakan berdasarkan berdasarkan elektrolit, operasi kondisi, dan agen ioniknya, yaitu: *Alkaline Electrolysis Cell (AEC)*, *Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell (PEMEC)*, *Anion Exchange Membrane (AEM) water electrolysis*, dan *Solid oxide water electrolysis (SOEC)*.

1. *Alkaline Electrolysis Cell (AEC)*

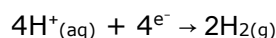
Alkaline Electrolysis Cell (AEC) menggunakan larutan basa sebagai elektrolitnya biasanya kalium hidroksida (KOH) atau natrium hidroksida (NaOH).

Dalam prosesnya, air direaksikan di anoda untuk membentuk oksigen dan ion hidrogen (H^+). Elektron yang terbentuk dari reaksi ini mengalir melalui rangkaian eksternal, sedangkan ion hidrogen bergerak melintasi elektrolit basa menuju katoda. Di katoda, ion hidrogen bereaksi dengan elektron dari rangkaian eksternal untuk membentuk gas hidrogen (H_2).

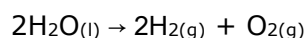
Reaksi anoda:

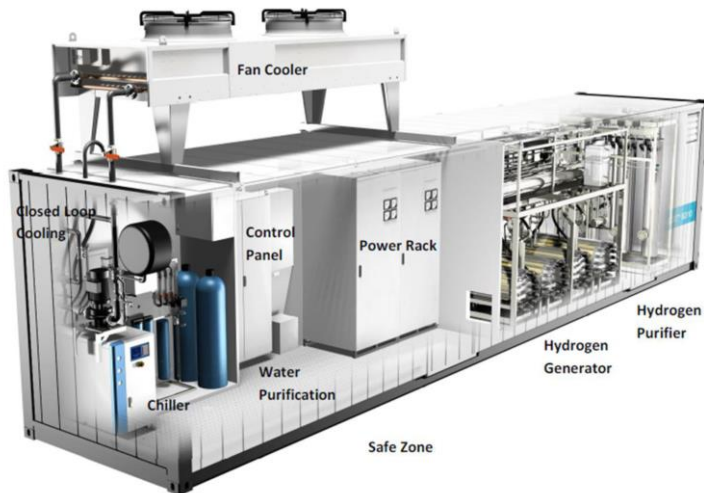


Reaksi katoda:



Secara keseluruhan, reaksi kimia sebagai berikut:





Gambar 16 Contoh elektrolyzer dalam bentuk kontainer

Keuntungan AEC

- Biaya Rendah: Teknologi AEC biasanya lebih murah dibandingkan dengan teknologi elektrolisis lainnya, seperti Proton Exchange Membrane (PEM) elektrolisis.
- Material tersedia: Menggunakan material yang relatif murah dan tahan lama seperti elektrolit basa.
- Keandalan dan Ketahanan: AEC dikenal karena ketahanan dan keandalannya dalam operasi jangka panjang.

Tantangan AEC

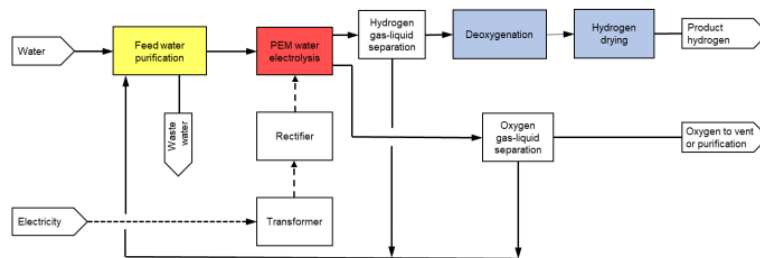
- Efisiensi Energi: AEC umumnya memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan teknologi elektrolisis lainnya seperti PEM, terutama pada skala kecil.
- Densitas Arus Rendah: Biasanya beroperasi pada densitas arus yang lebih rendah, sehingga memerlukan area elektrode yang lebih besar untuk produksi hidrogen yang sama.
- Korosi: Elektrolit basa bisa menyebabkan korosi pada komponen sel, meskipun ini biasanya dapat diatasi dengan bahan yang sesuai.

2. Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell (PEMEC)

Dalam elektroliser membran elektrolit polimer (PEM), elektrolitnya adalah bahan plastik khusus padat. Air bereaksi di anoda untuk membentuk oksigen dan ion hidrogen bermuatan positif (proton). Elektron mengalir melalui rangkaian eksternal dan ion hidrogen bergerak selektif melintasi PEM ke katoda. Di katoda, ion hidrogen bergabung dengan elektron dari rangkaian eksternal untuk membentuk gas hidrogen.

Reaksi Anoda: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

reaksi Katoda: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$



Gambar 17 Block flow diagram of a typical PEM water electrolysis system

Langkah pertama dari proses elektrolisis air PEM adalah membersihkan air masukan dengan reverse-osmosis, setelah itu disimpan dalam tangki khusus. Langkah awal ini diperlukan untuk menghilangkan kontaminan dan ion dari air sebelum memasok proses dengan air deionized tipe II ASTM ini. Segala kotoran dalam air umpan akan berkonsentrasi di dalam sel elektrolisis dan menyebabkan korosi serta penumpukan pada permukaan.

Tekanan dalam unit elektrolisis air PEM dapat lebih tinggi dibandingkan dengan unit elektrolisis alkalin. Bagian produksi gas hidrogen dapat mencapai tekanan hingga 3500 kPa (500 psi) dalam aplikasi industri tanpa kompresi gas eksternal. Elektrolisis air dilakukan di bawah tegangan rendah namun amperase tinggi. Arus listrik yang diterapkan pada sel langsung berkorelasi

dengan laju aliran hidrogen dan oksigen yang dihasilkan. Tegangan operasi sel elektrolisis air PEM biasanya berkisar antara 1,8 VDC hingga 2,2 VDC. Dibandingkan dengan elektrolisis air alkalin, sistem elektrolisis air PEM dapat beroperasi pada kerapatan arus yang jauh lebih tinggi. Sebagian besar sistem elektrolisis air PEM komersial yang tersedia di pasaran beroperasi dalam rentang 1A cm⁻² hingga 3A cm⁻².

Keuntungan PEMEC

- Efisiensi Tinggi: PEMEC memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi elektrolisis lainnya, seperti AEC.
- Kepadatan Daya Tinggi: Dapat beroperasi pada kepadatan daya yang lebih tinggi, sehingga menghasilkan lebih banyak hidrogen per unit area elektrode.
- Startup Cepat dan Respons Dinamis: PEMEC memiliki waktu startup yang cepat dan dapat merespons perubahan beban listrik dengan lebih baik, yang membuatnya cocok untuk integrasi dengan sumber energi terbarukan yang berfluktuasi seperti tenaga surya dan angin.

Tantangan PEMEC

- Biaya Tinggi: Material yang digunakan dalam PEMEC, seperti membran penukar proton dan katalis berbasis logam mulia (misalnya, platinum (Pt) dan iridium), relatif mahal.
- Operasional: Meski memiliki performa yang tinggi, tantangan terkait umur pakai membran dan stabilitas jangka panjang masih ada.
- Sensitivitas terhadap Kemurnian Air: Membran penukar proton sangat sensitif terhadap kemurnian air yang digunakan. Air harus sangat murni untuk menghindari degradasi membran dan komponen sel.

3. *Anion Exchange Membrane Electrolyzer (AEM)*

AEM dalam konteks produksi hidrogen merujuk pada Anion Exchange Membrane Electrolyzer (Elektroliser Membran Penukar Anion). AEM adalah teknologi elektrolisis yang relatif baru yang menggabungkan beberapa keuntungan dari sistem elektrolisis alkali (AEC) dan proton exchange membrane (PEM) dengan menggunakan membran yang memungkinkan ion negatif (anion) untuk bergerak melintasi sel.

Reaksi katoda: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

Reaksi Anoda: $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

Keuntungan AEM Electrolyzer

- Biaya Rendah: Menggunakan material yang lebih murah dibandingkan dengan PEM, seperti katalis non-logam mulia (misalnya, nikel dan besi) dan membran yang lebih terjangkau.
- Tahan Lama: Material yang digunakan dalam AEM lebih tahan terhadap korosi dibandingkan dengan material yang digunakan dalam PEM.
- Efisiensi yang Baik: Meskipun belum setinggi PEM, efisiensi AEM semakin meningkat seiring dengan perkembangan teknologi.

Tantangan

- Pengembangan Teknologi: AEM masih dalam tahap pengembangan dan penelitian aktif, sehingga belum komersial dan seandal seperti PEM dan AEC.
- Kehidupan Membran: Membran penukar anion masih perlu ditingkatkan untuk mencapai umur operasional yang panjang dan kinerja yang stabil.
- Kemurnian Air: Seperti PEM, AEM juga memerlukan air yang sangat murni untuk mencegah kontaminasi dan degradasi membran.

4. *Solid oxide water electrolysis (SOEC)*

Solid Oxide Electrolysis Cell adalah teknologi elektrolisis yang menggunakan oksida padat sebagai elektrolit untuk memproduksi hidrogen dari air. SOEC beroperasi pada suhu yang sangat tinggi, biasanya antara 700°C hingga 1.000°C, yang membedakannya dari teknologi elektrolisis lainnya seperti PEM dan AEM. Jenis membran yang menggunakan adalah keramik yang dapat menghantarkan ion oksida (O^{2-}) sebagai elektrolit untuk memproduksi hidrogen dari uap air (H_2O) melalui proses elektrolisis pada suhu tinggi.

(Elektrode Negatif): Uap air (H_2O) masuk ke katoda, di mana ia menerima elektron dan terurai menjadi hidrogen (H_2) dan ion oksida (O^{2-}).

Reaksi Katoda : $H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$

Reaksi Anoda : $O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$

Keuntungan SOEC

- Efisiensi Tinggi: SOEC memiliki potensi efisiensi yang sangat tinggi karena operasi pada suhu tinggi dan dapat memanfaatkan panas

berlebih dari proses industri atau sumber panas lainnya, meningkatkan efisiensi keseluruhan.

- Kapasitas Produksi Besar: Karena beroperasi pada suhu tinggi, SOEC mampu menghasilkan hidrogen dalam jumlah besar.

Tantangan SOEC

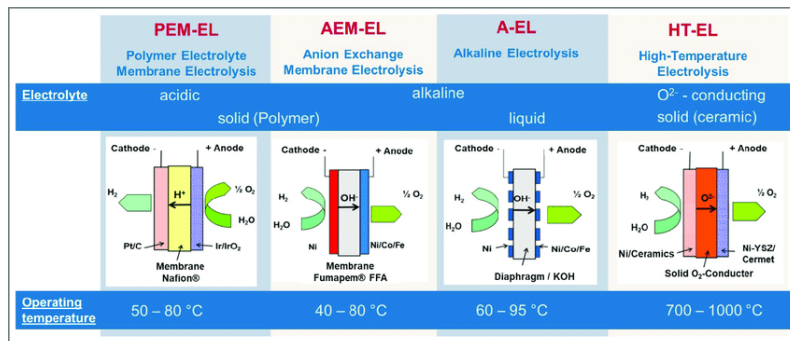
- Kebutuhan Suhu Tinggi: Operasi pada temperatur yang sangat tinggi membutuhkan material dan sistem yang tahan panas serta mampu menahan degradasi termal.
- Biaya Material: Material keramik dan komponen yang digunakan dalam SOEC cenderung mahal.
- Kompleksitas Sistem: Sistem SOEC membutuhkan manajemen termal yang canggih untuk operasi temperatur tinggi.

J. Technology Readiness Level (TRL)

Technology Readiness Level (TRL) atau sering disebut tingkat kesiapan teknologi (TKT) adalah sistem yang digunakan untuk mengukur kematangan teknologi pada berbagai tahap perkembangannya, dari penelitian dasar hingga penerapan komersial. dan untuk TRL dari 4 teknologi elektrolyzer ditampilkan pada Tabel 1 TRL dari berbagi elektroliser

Tabel 1 TRL dari berbagi elektroliser

Teknologi	AEC	PEMEC	AEM	SOEC
TRL	9	9	6	5-6



Selain teknologi yang telah disebutkan diatas ada berbagai cara memproduksi hidrogen berikut deatilnya¹⁰:

- 1) Steam Methane Reforming (SMR):
- 2) Coal/ Biomass Gasification:
- 3) Partial Oxidation:
- 4) Autothermal Reforming (ATR):
- 5) Thermochemical Water Splitting (TCWS):
- 6) Methane pyrolysis:
- 7) Direct air electrolysis (DAE):
- 8) Natural hydrogen (H₂):
- 9) Carbon capture, utilization, and storage (CCUS):
- 10) Proton Exchange Membrane (PEM):
- 11) Alkaline Hydrogen Electrolyzer (AL):
- 12) Molten Carbonate Electrolysis Cell (MCEC):
- 13) Anion Exchange Membranes (AEM):
- 14) Solid Oxide Electrolysers Cell (SOEC):
- 15) Acidic/Alkaline Amphoteric
- 16) Microbial Electrolysis Cells (MECs)
- 17) Capillary-Fed Electrolysis cell (CFE).
- 18) E-TAC Hydrogen Electrolyser.
- 19) SunHydrogen Photoelectrosynthetically Active Heterostructures (PAH).
- 20) Photo-Electrochemical Catalysis (PEC).
- 21) Particulate Photocatalysis (PC).
- 22) Biophotolytic Processes.
- 23) Fermentation-based Processes.
- 24) Ammonia cracking.
- 25) Methanol reformation.
- 26) High-Temperature Electrolysis (HTE).
- 27) Photobiological Water Splitting.
- 28) Chlor-alkali electrolysis.
- 29) The Alkalium process.
- 30) The GenHydro™ reactor system.
- 31) PuriFire Labs hydrothermal gasification and carbon capture.
- 32) Solhyd Hydrogen panels.

¹⁰ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.202000197>

Perusahaan	Negara	Teknologi
		
		
		
		
		
		
		 
		
		

Perusahaan	Negara	Teknologi
		
		
		
		 
		 
		
		
		
		

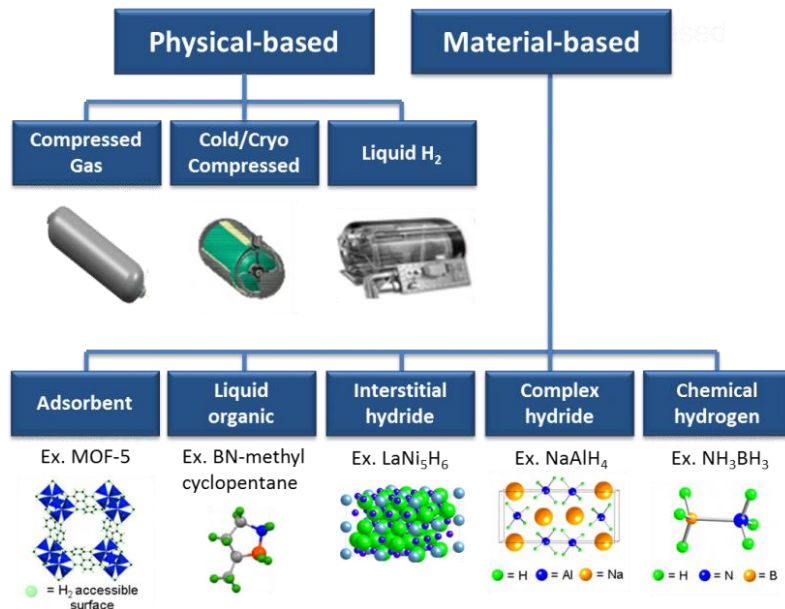
Gambar 18 beberapa produsen electrolyzer dari beberapa negara dan jenis teknologinya¹¹

¹¹ IFHE

Penyimpanan Hidrogen

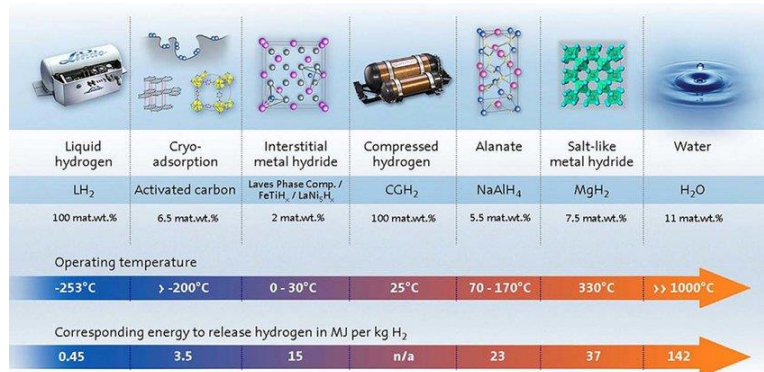
Teknologi penyimpanan hidrogen merupakan teknologi kunci dalam pengembangan sistem energi hidrogen. Penyimpanan hidrogen yang efektif dan efisien sangat penting untuk memastikan pasokan energi yang stabil dan andal. Teknologi ini memungkinkan hidrogen, yang dihasilkan dari berbagai sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin, untuk disimpan dalam jumlah besar dan digunakan saat dibutuhkan. Selain itu, kemampuan menyimpan hidrogen dengan aman dan dalam jangka waktu lama membantu mengatasi tantangan yang terkait dengan fluktuasi produksi energi terbarukan. Pengembangan teknologi penyimpanan hidrogen juga mendukung transisi ke ekonomi berbasis hidrogen, yang diharapkan dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Dengan demikian, teknologi ini memainkan peran yang sangat penting dalam menciptakan sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

How is hydrogen stored?



Gambar 19 Bagaimana hidrogen disimpan

Hidrogen dapat disimpan secara fisik baik sebagai gas maupun cair. Penyimpanan hidrogen sebagai gas biasanya membutuhkan tangki bertekanan tinggi (tekanan tangki 350–700 bar [5.000–10.000 psi]). Penyimpanan hidrogen sebagai cair memerlukan suhu kriogenik karena titik didih hidrogen pada tekanan satu atmosfer adalah $-252,8^{\circ}\text{C}$. Hidrogen juga dapat disimpan pada permukaan padatan (dengan cara adsorpsi) atau di dalam padatan (dengan cara absorpsi).



Gambar 20 Penyimpanan hidrogen dan temperaturnya

1. Penyimpanan Hidrogen Tekanan Tinggi

Terdapat 4 tipe bejana tekan yang dapat digunakan untuk menyimpan hidrogen:

	V1	V2	V3	V4
composition	 All Metal	 Metal Liner + GFRP layer (hoop lap)	 Metal Liner + CFRP layer (full lap)	 Plastic Liner + CFRP layer (full lap)

Gambar 21 Hidrogen disimpan pada tabung bertekanan¹²

Tipe I: Bejana tekan yang terbuat dari *full* logam

bejana tekan tipe I adalah jenis tangki penyimpanan yang paling konvensional dan biasanya terbuat dari baja paduan. Mereka memiliki tekanan kerja yang tinggi dan biasanya digunakan untuk aplikasi industri yang membutuhkan penyimpanan hidrogen dalam jumlah besar. Tangki tipe I memiliki dinding yang tebal dan kuat untuk menahan tekanan

¹² Su Y, Lv H, Zhou W, Zhang C. Review of the Hydrogen Permeability of the Liner Material of Type IV On-Board Hydrogen Storage Tank. *World Electric Vehicle Journal*. 2021; 12(3):130. <https://doi.org/10.3390/wevj12030130>

hidrogen yang tinggi, hingga sampai 50 Mpa dan karena itu, mereka cenderung memiliki berat yang lebih besar daripada jenis tangki lainnya.

Tipe II: Baja bejana tekan terbuat dari komposit serat gelas sebagai pembungkus

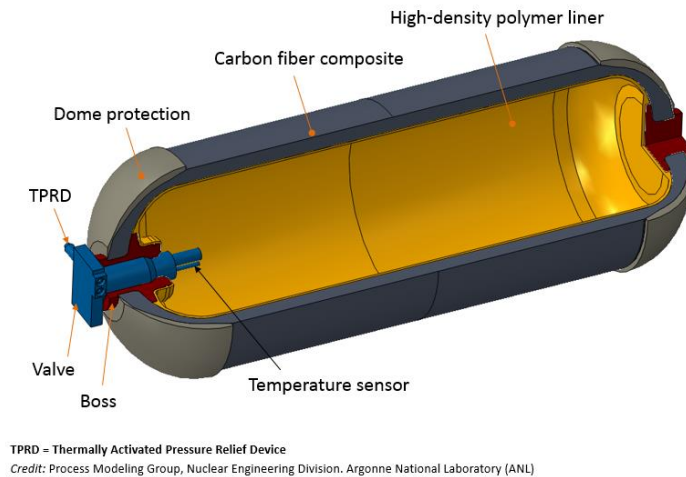
Tangki Tipe 2 umumnya memiliki dinding logam sebagai lapisan luar untuk menahan tekanan, sementara serat karbon atau material penguat lainnya digunakan sebagai lapisan tambahan untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap tekanan hidrogen. Hal ini memungkinkan tangki Tipe 2 untuk menawarkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan berat yang lebih ringan dibandingkan dengan tangki logam konvensional. Secara nilai lebih mahal dibandingkan dengan Tipe I, tetapi memiliki berat 30-40% lebih ringan dibandingkan dengan Tipe I.

Tipe III: *Full* komposit di bagian luar dengan material logam di bagian dalam

Beban struktur ditopang oleh struktur komposit (serat karbon), sementara bagian dalam (aluminium) hanya berfungsi sebagai penyegel. Bejana tekan tipe ini mampu menahan tekanan hingga 45 MPa, namun masih menghadapi masalah pada tekanan 70 MPa. Beratnya berkisar antara 0,75-1 lb/L, yaitu setengah dari berat tipe 2, tetapi harganya bisa mencapai dua kali lipat dari harga bejana tekan tipe II.

Tipe IV: *Full* komposit

Biasanya, pada bagian dalam digunakan polimer jenis high density polyethylene (HDPE), sedangkan pada bagian luar menggunakan komposit serat karbon atau karbon-glass komposit yang berfungsi untuk menahan beban strukturnya. Bejana tekan tipe ini adalah yang paling ringan, tetapi juga yang paling mahal. Bejana tekan ini mampu menahan tekanan hingga 100 MPa.



Gambar 22 Tampak tebung hidrogen tekanan tinggi¹³

2. Penyimpanan Hidrogen Cair/Kriogenik

Pencairan hidrogen dilakukan pada suhu yang sangat rendah (-253°C), dan menjaga hidrogen tetap berada pada suhu ini merupakan tantangan terbesar dalam penyimpanan hidrogen kriogenik. Proses pencairan menyebabkan hilangnya energi hingga 40%, sedangkan pada proses kompresi, hilangnya energi mencapai 10%. Oleh karena itu, teknik penyimpanan ini lebih cocok untuk skala menengah hingga besar dengan pengiriman melalui truk atau kapal hidrogen antar benua (Gambar I.100). Biasanya, truk tangki dapat mengangkut sekitar 5.000 kg hidrogen, setara dengan lima kali kapasitas trailer tabung gas hidrogen terkompresi. Salah satu perusahaan yang mengembangkan Sistem Penahanan Kargo (CCS) untuk pengangkutan hidrogen cair adalah Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Perusahaan ini mengembangkan CCS dengan kapasitas terbesar di dunia (40.000 m^3 per tangki), seperti yang ditunjukkan pada Gambar I.100. Selain itu, bejana kriogenik untuk truk trailer juga dikembangkan oleh Air Liquid.

¹³ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>

Gambar I.101 memperlihatkan skema bejana kriogenik dan truk pengangkut hidrogen cair.

3. Penyimpanan Hidrogen Cryo-Compressed

Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Aceves dan rekan. Teknik penyimpanan ini adalah kombinasi antara penyimpanan hidrogen bertekanan dan penyimpanan hidrogen kriogenik. Hidrogen cryo-compressed berbentuk gas kriogenik superkritikal, di mana hidrogen tidak mencair dan gasnya dikompresi pada suhu sekitar -253°C . Teknologi ini mampu mengatasi hambatan yang ada pada teknologi sebelumnya. Oleh karena itu, teknologi penyimpanan hidrogen ini dianggap sangat menjanjikan dari segi penyimpanan dan keamanan. Penyimpanan cryo-compressed memiliki densitas tinggi, yaitu 80 g/L, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan penyimpanan kriogenik yang hanya 10 g/L. Selain itu, teknologi ini cepat dan sangat efisien dalam hal pengisian serta memiliki tingkat keamanan tinggi berkat sistem vacuum enclosure. Meskipun teknologi ini sangat menjanjikan, ada masalah terkait ketersediaan dan harga infrastruktur yang sangat mahal.

4. Hidrogen Cair

Secara Kimiawi

Amonia, LOHC (toluene), asam format, dan metal hydride saat ini telah mencapai tahap industri atau R&D. Dalam metode ini, molekul hidrogen dipecah menjadi atom-atom dan diintegrasikan dengan struktur kimia material lainnya.

5. Amonia

Amonia adalah senyawa alkali yang tidak berwarna dan memiliki bau yang sangat menyengat. Tabel I.18 menunjukkan rincian karakteristik sifat fisik dari amonia. Senyawa ini merupakan kandidat potensial untuk penyimpanan hidrogen karena memiliki densitas hidrogen yang cukup tinggi (17,8 wt%) serta pengaplikasian yang sangat mudah. Amonia dapat dimanfaatkan dengan mengekstraksi hidrogen yang tersimpan atau digunakan langsung sebagai bahan bakar. Saat ini, amonia digunakan sebagai pupuk pertanian, gas pendingin, serta bahan baku dalam pembuatan bahan peledak, pestisida, dan bahan kimia lainnya. Oleh karena itu, infrastruktur untuk produksi, penyimpanan, pengangkutan, dan pemanfaatan amonia telah ditetapkan secara global.

6. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)

LOHC adalah senyawa organik yang berbentuk cairan atau padatan dengan titik leleh rendah di bawah kondisi penyimpanan ambien. Sistem ini berpotensi sebagai material penyimpanan hidrogen yang aman dan relatif murah. Sistem LOHC terdiri dari sepasang molekul yaitu molekul kaya hidrogen (H_2^+) dan molekul miskin hidrogen (H_2^-). Dalam sistem ini, hidrogen disimpan oleh molekul H_2^- melalui hidrogenasi katalitik (eksotermik), dan hidrogen dilepaskan oleh molekul H_2^+ melalui reaksi dehidrogenasi katalitik (endotermik) pada suhu dan tekanan optimal. Penyimpanan hidrogen secara gravimetrik dan volumetrik yang tinggi dalam molekul organik kecil menunjukkan performa signifikan karena memiliki banyak kelebihan, seperti penyimpanan energi yang mudah dan bersih tanpa kebocoran, kompatibilitas dengan infrastruktur transportasi dan pengisian bahan bakar saat ini, serta operasi di bawah kondisi ambien (tekanan atau suhu). Beberapa senyawa LOHC yang efisien telah dikembangkan, tetapi penelitian terhadap pengembangan dan penggunaannya masih dalam tahap awal. Berdasarkan literatur, sistem LOHC harus memenuhi karakteristik berikut agar dapat digunakan dalam kehidupan sehari-hari:

- Tidak beracun dan aman, dengan profil ekotoksikologi yang baik selama pengiriman dan pemakaian
- Memiliki titik leleh di bawah -30°C
- Titik didih lebih dari 300°C
- Memiliki kapasitas penyimpanan volumetrik ($>56 \text{ kg/m}^3$) dan gravimetrik ($>6 \text{ wt\%}$)
- Memiliki entalpi pengikatan hidrogen $40\text{-}54 \text{ kJ/mol H}_2$
- Dapat menghasilkan hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi
- Kompatibel dengan sistem bahan bakar yang ada dan memiliki biaya produksi yang rendah

7. Logam hidrida

Penyimpanan hidrogen dalam logam hidrida seperti MgH_2 , AlH_3 , dan BH_3 dapat dengan mudah menyerap hidrogen, tetapi pelepasannya sulit karena pembentukan ikatan kimia antara logam hidrida dan gas hidrogen [131, 138]. Akibatnya, diperlukan suhu tinggi untuk melepaskan hidrogen yang terserap. Selain itu, logam hidrida memiliki densitas yang tinggi, sehingga proses pelepasan hidrogen menjadi sulit [131, 139]. Penyimpanan hidrogen menggunakan hidrida kimia memiliki kepadatan energi lebih tinggi dibandingkan logam hidrida karena mengandung unsur-unsur lebih ringan seperti LiBH_4 , NaBH_4 , dan NH_3BH_3 . Namun, hidrida kimia masih memerlukan regenerasi off-board dalam penyimpanan hidrogen [140]. Di antara semua

metode, logam hidrida merupakan cara penyerapan kimia yang paling populer. Lebih lanjut, hidrida ringan seperti MgH_2 dan LiBH_4 banyak diteliti karena densitas penyimpanan hidrogennya yang sangat tinggi. Meskipun teknologi ini sangat menjanjikan, ada beberapa masalah yang harus diatasi, yaitu menurunkan biaya produk, mengurangi berat dan suhu operasinya, serta memperbaiki proses kinetik charge-discharge dan kontrol gas yang dihasilkan. Berikut adalah beberapa strategi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan karakteristik penyimpanan hidrogen dari logam hidrida.

1. Reactive hydride composites

Pada metode ini, dua atau lebih hidrid reaktif digabungkan untuk membentuk material komposit hidrid reaktif. Misalnya, Luo dan rekan-rekannya [141] mengembangkan material hidrid kompleks berbasis $\text{LiBH}_4\cdot\text{NH}_3\text{BH}_3$ dengan menggunakan penggilingan mekanis bahan NH_3BH_3 dan LiBH_4 dalam rasio molar yang sama. Hasil pencampuran tersebut menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan hidrogen mencapai 15,7 wt% dengan pemanasan pada 450°C .

2. Nanoconfinement of hydride materials

Meskipun beberapa material hidrid (seperti LiBH_4 dan MgH_2) memiliki densitas energi teoretis yang tinggi, secara termodinamik dan kinetik mereka kurang mendukung jika digunakan pada kondisi tekanan dan suhu moderat. Oleh karena itu, peningkatan sifat-sifat ini sangat diperlukan, salah satunya adalah melalui proses nanoconfinement. Proses ini dapat meningkatkan reaktivitas permukaan hidrid dengan mengurangi ukuran partikel hidrid. Gambar I.108 menunjukkan proses utama nanoconfinement yang melibatkan material berpori dengan ukuran pori yang seragam, digunakan sebagai scaffold. Ukuran pori scaffold membatasi pertumbuhan partikel dan aglomerasi material hidrid



Gambar 23 Contoh penyimpanan hidrogen dalam padatan¹⁴

8. Penyerapan Secara Fisika

Material berpori merupakan sistem penyimpanan yang sangat potensial untuk menghasilkan kapasitas dan unit penyimpanan yang andal. Di antara semua material berpori, metal organic frameworks (MOFs) dan material berpori karbon sangat menjanjikan untuk digunakan sebagai sistem penyimpanan hidrogen. Metode ini dapat menghasilkan luas permukaan yang tinggi, ikatan hidrogen yang rendah, kecepatan kinetik charge dan discharge yang cepat, dengan biaya material yang relatif murah. Selain itu, sistem ini dapat mengurangi isu manajemen termal selama proses charge dan discharge. Namun, kelemahan dari sistem ini adalah beban material yang berat dan membutuhkan kerja pada suhu rendah dan tekanan tinggi, serta densitas hidrogen secara gravimetrik dan volumetrik yang cenderung masih rendah .

¹⁴ Dokumentasi pribadi

MOF merupakan arsitektur berpori yang dibangun dari ion/gugus logam dan penghubung organik. Luas permukaannya yang tinggi hingga 6000 m²/g, porositas permanen, ukuran pori yang dapat disetel, kekakuan, fleksibilitas struktural, dan stabilitas termal menjadikannya bahan yang sangat menjanjikan untuk penyimpanan hidrogen. Dimensi pori MOF sangat sesuai dengan diameter kinetik hidrogen (2,89 Å), sehingga hidrogen dapat dengan mudah masuk ke dalam strukturnya. Banyak penghubung organik seperti dikarboksilat (asam malonat, asam suksinat, asam oksalat, asam glutarat, asam tereftalat, dll.), trikarboksilat (asam trimesat, asam sitrat, dll.), dan azol (pirrodiazol, 1,2,3-triazol, dll.) yang biasa digunakan dalam sintesis MOF. Modifikasi penghubung organik, suhu reaksi, dan rasio logam/ligan memberikan MOF yang berbeda dengan kerangka dimensi tinggi dan struktur pori yang disesuaikan. Penghapusan molekul pelarut yang terperangkap dari pori-pori melalui proses aktivasi menghasilkan pusat logam yang tidak terkoordinasi, yang meningkatkan interaksi pengikatan antar hidrogen. Jumlah MOFs baru yang dilaporkan untuk penyimpanan hidrogen meningkat dari tahun ke tahun. Gambar I.111 menunjukkan modifikasi MOF untuk aplikasi penyimpanan hidrogen. Beberapa MOF seperti MOF-5 (Zn₄O(1,4-benzenedicarboxylate)₃), MOF-177 (Zn₄O(1,3,5-benzenetribenzoate)₂), MIL-53 (Al(OH)), dan MIL-101 (Cr₃O(F/OH)(H₂O)₂(1,4-benzenedicarboxylate)₃) telah menunjukkan kapasitas penyimpanan hidrogen yang signifikan. Namun, ketidakstabilan kelembaban, kesulitan peningkatan skala, dan keterbatasan penyimpanan untuk aplikasi seluler, memerlukan perbaikan lebih lanjut. MOF telah menunjukkan kemampuan penyimpanan hidrogen di suhu kriogenik (77 K), tetapi penyimpanan pada tekanan yang dapat diterima dan suhu lingkungan masih menjadi tantangan.

Tranportasi dan distribusi Hidrogen

Distribusi hidrogen ke titik penggunaan dapat dilakukan melalui wadah bertekanan tinggi atau melalui pipa. Penyimpanan dan distribusi hidrogen dalam tangki bertekanan tinggi menghadapi tantangan serupa seperti yang terlihat pada penyimpanan bejana bertekanan tinggi. Hal ini dapat difasilitasi melalui transportasi darat, kereta api, atau laut, yang menawarkan fleksibilitas dan kemampuan menjangkau berbagai tujuan tanpa memerlukan infrastruktur baru yang ekstensif.

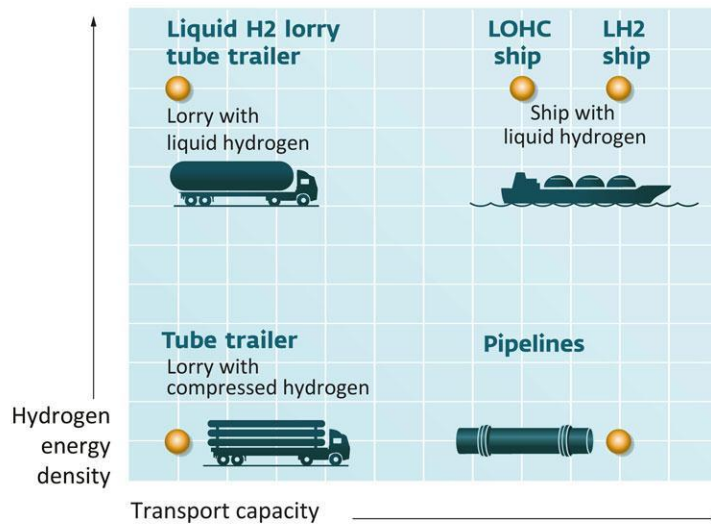
Transmisi hidrogen melalui pipa menjadi solusi yang tepat ketika sejumlah besar hidrogen harus didistribusikan. Pipa gas mampu menyalurkan energi dalam jumlah besar dengan biaya lebih rendah dibandingkan dengan transmisi listrik melalui saluran listrik overhead. Infrastruktur pipa gas yang ada di negara-negara seperti Jerman dapat diadaptasi untuk transportasi hidrogen dengan sedikit modifikasi.

Secara teori, pipa metana dapat digunakan untuk mengangkut energi dalam jumlah yang sama dengan menggunakan hidrogen. Namun hal ini bergantung pada integritas komponen pipa, termasuk fitting dan pipa. Ada kemungkinan bahwa hidrogen dapat mempercepat pembentukan retakan, sehingga berpotensi memperpendek umur pipa. Faktor-faktor lain seperti stres dinamis dan patah tulang yang sudah ada sebelumnya juga perlu dipertimbangkan.

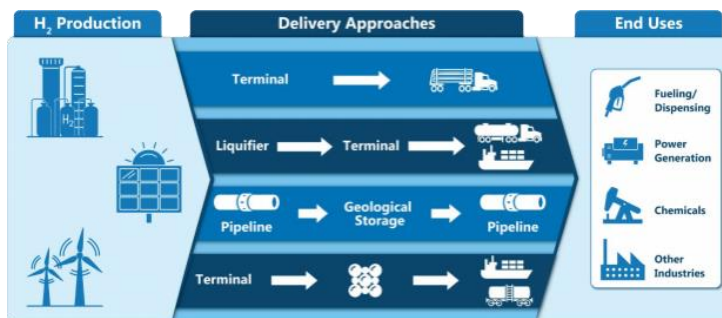
Pendekatan alternatif untuk memitigasi risiko ini adalah dengan mencampurkan hidrogen dengan gas alam, sehingga mengurangi modifikasi yang diperlukan pada saluran pipa. Namun, jika kandungan hidrogen melebihi 40%, komponen seperti kompresor dan turbin mungkin perlu diganti untuk menangani peningkatan aliran volume hidrogen.

Tranportasi atau pengangkutan hidrogen dapat menggunakan:

1. Menggunakan truk
2. Menggunakan Pipa
3. Menggunakan kapal laut



Gambar 24 Ilustrasi pengangkutan hidrogen



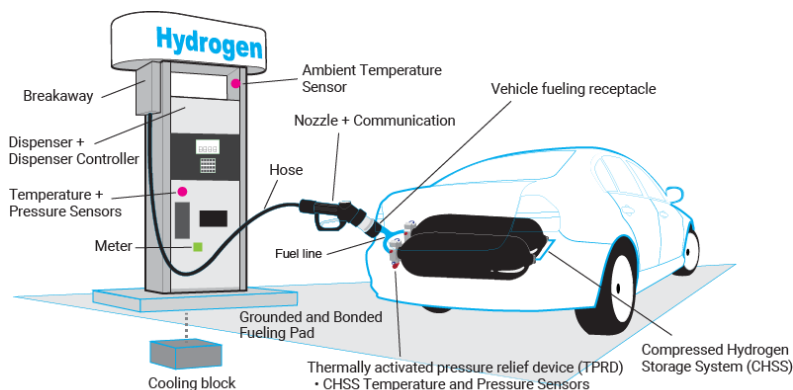
Gambar 25 Rantai pasok hidrogen¹⁵

K. Hydrogen Refueling Station (HRS)

Hydrogen Refueling Station (HRS) atau Stasiun Pengisian Bahan Bakar Hidrogen (SPBH) adalah fasilitas yang dirancang khusus untuk mengisi ulang kendaraan yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar yaitu *fuel cell*

¹⁵ <https://cleanh2.org/>

electric vehicle (FCEV). Stasiun ini dilengkapi dengan perangkat dan sistem yang memungkinkan pengisian kendaraan hidrogen dengan aman dan efisien. Tekanan yang biasanya digunakan dalam pengisian bahan bakar di stasiun ini berkisar antara 35 hingga 70 mpa namun di masa depan diharapkan dapat mengisi hingga 100 mpa sehingga kapasitas bahan bakar hidrogen dapat lebih banyak, hal ini dapat menciptakan kondisi yang diperlukan untuk menyimpan hidrogen dalam kendaraan dengan kapasitas yang optimal. Dengan menggunakan tekanan ini, stasiun pengisian bahan bakar hidrogen memungkinkan kendaraan untuk diisi dengan cepat, meminimalkan waktu henti dan memungkinkan mobilitas yang nyaman bagi pengguna kendaraan hidrogen.



1. Komponen-komponen HRS

- Tabung penyimpanan

tabung penyimpanan pada HRS terdapat dua buah yaitu tabung tekanan biasa hingga 200 bar dan tabung tekanan tinggi diatas 350 bar

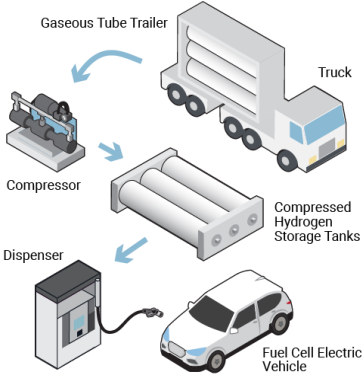
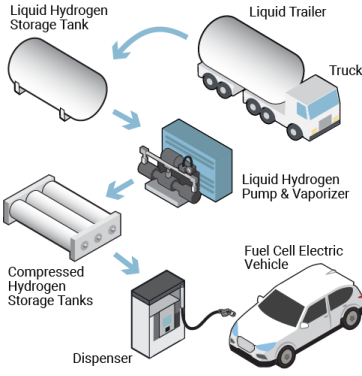
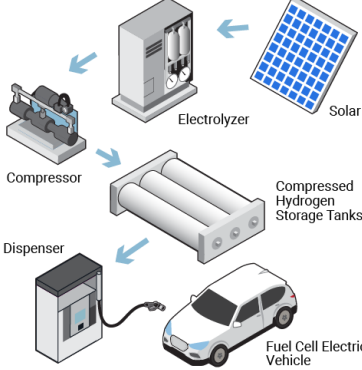
- Sistem pendingin

sistem pendingin dapat berupa chiller ataupun cooling block, komponen ini diperlukan untuk menjaga temperatur gas yang masuk ke kendaraan pada saat pengisian cepat.

- Dispenser gas

Dispenser terdiri dari selang pengisian dan juga alat komunikasi antara dispenser dan kendaraan yang akan diisi.

2. Rantai pasok hidrogen untuk HRS

 Gaseous Tube Trailer Truck Compressor Compressed Hydrogen Storage Tanks Dispenser Fuel Cell Electric Vehicle	Proses rantai pasok hidrogen dalam bejana bertekanan diangkut dengan truk atau <i>tube trailer</i> melalui jalur darat
 Liquid Hydrogen Storage Tank Liquid Trailer Truck Liquid Hydrogen Pump & Vaporizer Compressed Hydrogen Storage Tanks Dispenser Fuel Cell Electric Vehicle	Proses rantai pasok hidrogen dalam bentuk cair, diangkut dan diantarkan dengan menggunakan truk menuju lokasi.
 Solar Electrolyzer Compressor Compressed Hydrogen Storage Tanks Dispenser Fuel Cell Electric Vehicle	Proses rantai pasok produksi hidrogen di tempat atau on site, untuk mengurangi biaya transportasi.

Aplikasi Hidrogen

Gambarkan beragam aplikasi hidrogen dalam berbagai industri seperti transportasi, pembangkit listrik, industri kimia, dan lainnya. Jelaskan keuntungan dan tantangan dari masing-masing aplikasi.

A. Fuel Cell (FC)

Fuel cell adalah perangkat yang menghasilkan listrik melalui reaksi elektrokimia oksidasi-reduksi, bukan melalui proses pembakaran seperti pada internal combustion engine (ICE). Singkatnya, FC mengubah energi kimia dari bahan bakar, seperti hidrogen atau metana, langsung menjadi energi listrik dengan menggabungkannya dengan oksigen.

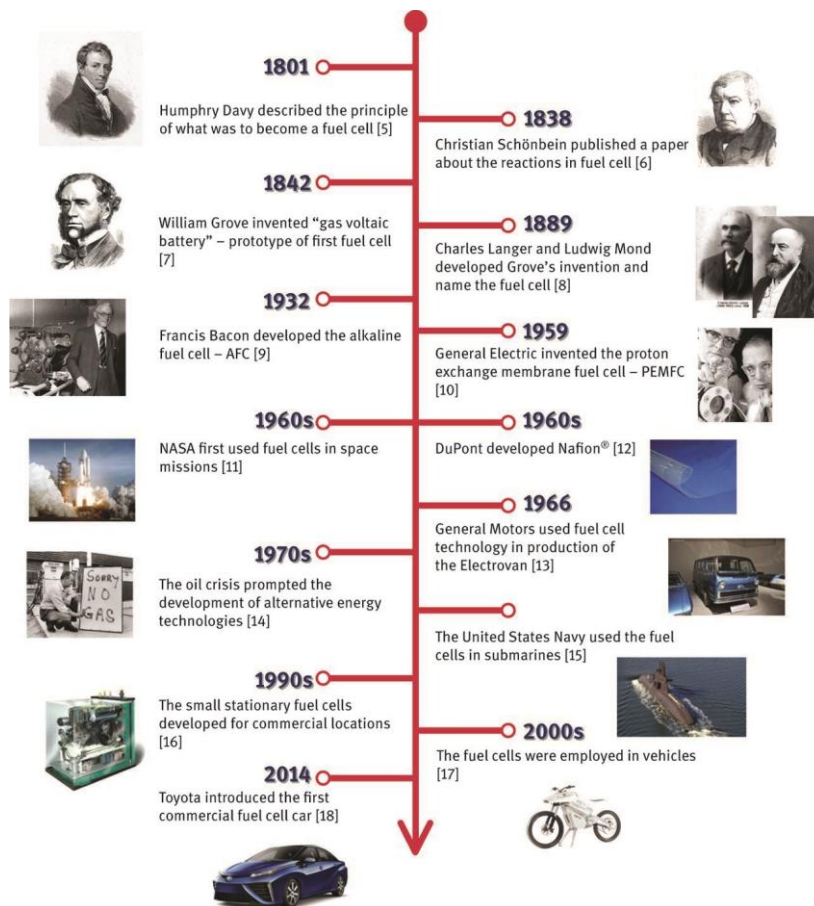
Karena energi kimia yang menjadi bahan bakar tidak perlu dikonversi menjadi energi termal dan energi mekanik terlebih dahulu, hal ini menjadikannya sangat efisien. Selain meminimalkan kerugian energi, sel bahan bakar juga lebih sedikit polusi dibandingkan dengan pembakaran pada umumnya.

Tanpa pembakaran bahan bakar secara langsung, emisi polutan seperti nitrogen oksida (NO_x), partikulat, dan karbon dioksida (CO_2) dapat dikurangi secara signifikan. Hal ini membuat FC menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan dan berpotensi mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan juga kesehatan.

1. Sejarah Fuel Cell

William Nicholson dan Anthony Carlisle telah melakukan penelitian elektrolisis pada tahun 1800, yang merupakan tonggak awal dalam pemahaman tentang elektrokimia dan reaksi redoks, Humphry Davy memiliki peran penting dalam eksperimen awal yang berkaitan dengan elektrokimia, tetapi dia tidak secara khusus terlibat dalam pengembangan sel bahan bakar. Pada tahun 1838, Christian Friedrich Schönbein mengembangkan konsep sel hidrogen-oksigen pertama, yang memberikan landasan awal untuk pengembangan teknologi fuel cell. Pada tahun 1960-an, penelitian intensif oleh General Electric dan NASA mengarah pada pengembangan sel bahan bakar Proton Exchange Membrane (PEM), yang menggunakan membran proton untuk menghantarkan ion hidrogen dan memisahkan oksigen dan hidrogen. Ini menjadi salah satu

teknologi sel bahan bakar paling umum yang digunakan saat ini. Pada tahun yang sama pula Dupont(R) mengembangkan membran yang dikenal hingga saat ini yaitu Nafion. Sejak akhir abad ke-20 hingga awal abad ke-21, fuel cell telah digunakan secara komersial dalam aplikasi seperti pembangkit listrik, transportasi, dan industri. Penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan biaya teknologi fuel cell.

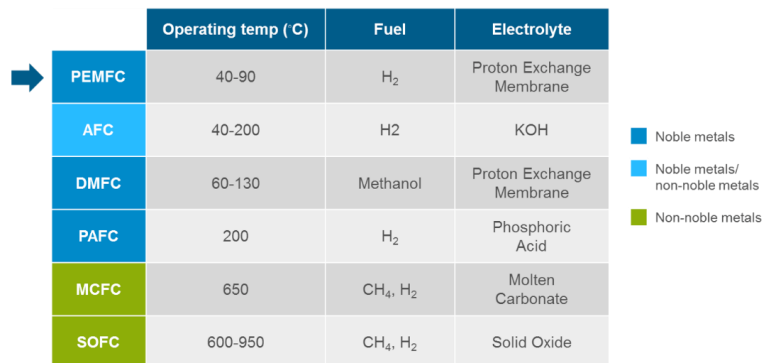


Gambar 26 Sejarah singkat fuel cell

2. Jenis-Jenis *Fuel Cell*

Ada beberapa jenis fuel cell, yang dibedakan berdasarkan jenis elektrolit yang memisahkan bahan bakar dari oksigen. Klasifikasi ini menentukan jenis reaksi elektrokimia yang terjadi di dalam sel, katalis yang diperlukan, temperatur operasi, dan faktor-faktor lainnya.

Salah satu jenis sel bahan bakar yang umum adalah proton exchange membrane (PEM) fuel cell, di mana elektrolitnya adalah membran proton yang memungkinkan ion hidrogen untuk bergerak dari anoda ke katoda sementara memisahkan oksigen dan hidrogen. Jenis fuel cell lainnya solid oxide fuel cell (SOFC), yang menggunakan elektrolit padat seperti oksida zirkonia stabilized dengan itria (YSZ), dan direct methanol fuel cell (MCFC), yang menggunakan elektrolit berbentuk larutan basa.



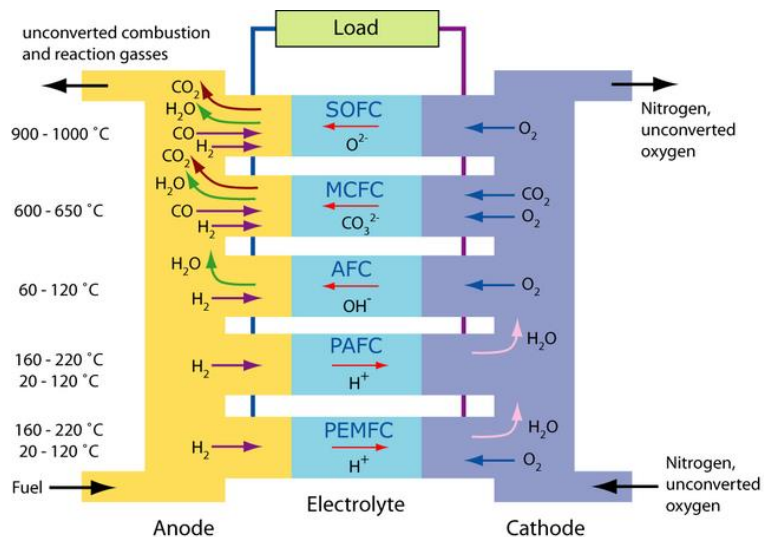
	Operating temp (°C)	Fuel	Electrolyte
→ PEMFC	40-90	H ₂	Proton Exchange Membrane
AFC	40-200	H ₂	KOH
DMFC	60-130	Methanol	Proton Exchange Membrane
PAFC	200	H ₂	Phosphoric Acid
MCFC	650	CH ₄ , H ₂	Molten Carbonate
SOFC	600-950	CH ₄ , H ₂	Solid Oxide

■ Noble metals
■ Noble metals/non-noble metals
■ Non-noble metals

Gambar 27 Temperatur operasi fuel cell¹⁶

Setiap jenis sel bahan bakar memiliki karakteristiknya sendiri, seperti efisiensi, keandalan, biaya, dan aplikasi yang cocok untuk kapasitasnya. Misalnya, sel bahan bakar PEM umumnya memiliki efisiensi tinggi pada temperatur operasi rendah dan cocok untuk aplikasi seperti kendaraan listrik, sementara SOFC memiliki efisiensi tinggi pada suhu operasi tinggi dan cocok untuk pembangkit listrik skala besar. Dengan memahami perbedaan antara jenis-jenis sel bahan bakar ini, kita dapat memilih teknologi yang paling sesuai dengan kebutuhan spesifik dan lingkungan tempat operasinya.

¹⁶ <https://zestas.org/technologies/>



Gambar 28 Ilustrasi ion yang bergerak pada semua jenis fuel cell

i. Polymer electrolyte membrane fuel cells

Polymer electrolyte membrane fuel cells (PEM) atau disebut juga sel bahan bakar membran penukar proton, menghasilkan kepadatan daya yang tinggi dan menawarkan keunggulan bobot dan volume yang rendah dibandingkan dengan sel bahan bakar lainnya. Sel bahan bakar PEM menggunakan polimer padat sebagai elektrolit dan elektroda karbon berpori yang mengandung katalis platina (Pt) atau paduan platina. Beroperasi hanya membutuhkan hidrogen, oksigen dari udara, dan air untuk beroperasi. Biasanya berbahan bakar hidrogen murni yang dipasok dari tangki penyimpanan atau reformer.

PEMFC beroperasi pada suhu yang relatif rendah, sekitar 80°C (176°F). Pengoperasian pada suhu rendah memungkinkannya memulai dengan cepat dikarenakan waktu pemanasan lebih sedikit dan mengurangi keausan pada komponen sistem karena tidak ada komponen bergerak, sehingga menghasilkan daya tahan yang lebih baik. Namun, hal ini mengharuskan katalis logam mulia, biasanya platinum digunakan untuk memisahkan elektron dan proton hidrogen, sehingga menambah biaya sistem. Katalis platina juga sangat sensitif terhadap keracunan karbon monoksida (CO), sehingga perlu menggunakan reaktor tambahan untuk mereduksi karbon monoksida dalam bahan bakar gas jika hidrogen berasal dari bahan bakar hidrokarbon. Reaktor ini juga menambah biaya.

PEM digunakan terutama untuk aplikasi sektor transportasi dan beberapa aplikasi stasioner seperti tenaga cadangan pada stasiun telekomunikasi dan PEM sangat cocok untuk digunakan pada aplikasi kendaraan, seperti mobil, bus, dan truk tugas berat¹⁷.

ii. Direct methanol fuel cells

Sebagian besar fuel cell berbahan bakar hidrogen, yang dapat diumpankan ke sistem sel bahan bakar secara langsung atau dapat dihasilkan dalam sistem sel bahan bakar dengan mereformasi bahan bakar kaya akan hidrogen seperti metanol, etanol, dan bahan bakar hidrokarbon. Fuel cell ini disebut Direct methanol fuel cell (DMFC), ditenagai oleh metanol murni, yang biasanya dicampur dengan air dan diumpankan langsung ke anoda sel dan bereaksi dengan bantuan katalis.

DMFC tidak memiliki banyak masalah penyimpanan bahan bakar yang umum terjadi pada beberapa sistem sel bahan bakar karena metanol memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi dibandingkan hidrogen dalam bentuk gas, meskipun lebih sedikit dibandingkan bahan bakar bensin atau solar. Metanol juga lebih mudah diangkut dan disuplai ke masyarakat menggunakan infrastruktur yang ada saat ini karena berbentuk cair, seperti bensin. DMFC sering digunakan untuk menyediakan daya untuk aplikasi sel bahan bakar portabel seperti ponsel atau komputer laptop atau aplikasi yang rendah daya lainnya.

iii. Alkaline fuel cells

Sel bahan bakar alkali (AFC) adalah salah satu teknologi sel bahan bakar pertama yang dikembangkan, dan merupakan jenis pertama yang banyak digunakan dalam program luar angkasa AS untuk menghasilkan energi listrik dan air di pesawat ruang angkasa. Sel bahan bakar ini menggunakan larutan kalium hidroksida dalam air sebagai elektrolit dan dapat menggunakan berbagai logam tidak mulia sebagai katalis di anoda dan katoda. Dalam beberapa tahun terakhir, AFC baru yang menggunakan membran polimer sebagai elektrolit telah dikembangkan. Sel bahan bakar ini terkait erat dengan sel bahan bakar PEM konvensional, hanya saja sel bahan bakar ini

¹⁷ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>

menggunakan membran basa dan bukan membran asam. Tingginya kinerja AFC disebabkan oleh laju reaksi elektrokimia yang terjadi di dalam sel. Mereka juga menunjukkan efisiensi di atas 60% dalam aplikasi luar angkasa.

Tantangan utama untuk jenis sel bahan bakar ini adalah rentannya terhadap keracunan karbon dioksida (CO_2). Faktanya, bahkan sejumlah kecil CO_2 di udara dapat secara dramatis mempengaruhi kinerja dan daya tahan sel akibat pembentukan karbonat. Sel alkali dengan elektrolit cair dapat dijalankan dalam mode resirkulasi, yang memungkinkan regenerasi elektrolit untuk membantu mengurangi efek pembentukan karbonat dalam elektrolit, namun mode resirkulasi menimbulkan masalah dengan arus shunt. Sistem elektrolit cair juga mengalami masalah tambahan termasuk keterbasahan, peningkatan korosi, dan kesulitan dalam menangani tekanan diferensial. Sel bahan bakar membran alkali (AMFC) mengatasi masalah ini dan memiliki kerentanan yang lebih rendah terhadap keracunan CO_2 dibandingkan AFC cair-elektrolit. Namun, CO_2 masih mempengaruhi kinerja, dan kinerja serta daya tahan AMFC masih tertinggal dibandingkan PEMFC. AMFC sedang dipertimbangkan untuk aplikasi dalam skala W hingga kW. Tantangan bagi AMFC mencakup toleransi terhadap karbon dioksida, konduktivitas dan daya tahan membran, pengoperasian suhu lebih tinggi, pengelolaan air, kepadatan daya, dan elektrokatalisis anoda.

iv. Phosphoric acid fuel cells

Sel bahan bakar asam fosfat (PAFC) menggunakan asam fosfat cair sebagai elektrolit—asam tersebut terkandung dalam matriks silikon karbida berikat Teflon—dan elektroda karbon berpori yang mengandung katalis platinum. Reaksi elektrokimia yang terjadi di dalam sel ditunjukkan pada diagram di sebelah kanan.

PAFC dianggap sebagai "generasi pertama" sel bahan bakar modern. Ini adalah salah satu jenis sel paling matang dan yang pertama digunakan secara komersial. Jenis sel bahan bakar ini biasanya digunakan untuk pembangkit listrik stasioner, namun beberapa PAFC telah digunakan untuk menggerakkan kendaraan besar seperti bus kota.

PAFC lebih toleran terhadap kotoran dalam bahan bakar fosil yang telah diubah menjadi hidrogen dibandingkan sel PEM, yang mudah "diracuni" oleh karbon

monoksida karena karbon monoksida berikatan dengan katalis platinum di anoda, sehingga menurunkan efisiensi sel bahan bakar. PAFC memiliki efisiensi lebih dari 85% bila digunakan untuk pembangkitan listrik dan panas secara bersamaan, namun kurang efisien dalam menghasilkan listrik saja (37%–42%). Efisiensi PAFC hanya sedikit lebih tinggi dibandingkan pembangkit listrik berbasis pembakaran, yang biasanya beroperasi pada efisiensi sekitar 33%. PAFC juga kurang bertenaga dibandingkan sel bahan bakar lainnya, mengingat berat dan volumenya sama. Akibatnya, sel bahan bakar ini biasanya berukuran besar dan berat. PAFC juga mahal. Sel bahan bakar ini memerlukan katalis platinum yang mahal dan jauh lebih banyak dibandingkan jenis sel bahan bakar lainnya, sehingga meningkatkan biaya.

v. Molten carbonate fuel cells

Sel bahan bakar karbonat cair (MCFC) saat ini sedang dikembangkan untuk pembangkit listrik berbasis gas alam dan batubara untuk keperluan listrik, industri, dan militer. MCFC adalah sel bahan bakar suhu tinggi yang menggunakan elektrolit yang terdiri dari campuran garam karbonat cair yang tersuspensi dalam matriks litium aluminium oksida keramik berpori dan inert secara kimia. Karena beroperasi pada suhu tinggi 650°C (kira-kira 1.200°F), logam tidak 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 sel bahan bakar asam fosfat. Sel bahan bakar karbonat cair, bila digabungkan dengan turbin, dapat mencapai efisiensi mendekati 65%, jauh lebih tinggi dibandingkan efisiensi 37%–42% pada pabrik sel bahan bakar asam fosfat. Ketika panas buangan ditangkap dan digunakan, efisiensi bahan bakar secara keseluruhan bisa mencapai lebih dari 85%.

Tidak seperti sel bahan bakar basa, asam fosfat, dan PEM, MCFC tidak memerlukan reformer eksternal untuk mengubah bahan bakar seperti gas alam dan biogas menjadi hidrogen. Pada suhu tinggi saat MCFC beroperasi, metana dan hidrokarbon ringan lainnya dalam bahan bakar ini diubah menjadi hidrogen di dalam sel bahan bakar itu sendiri melalui proses yang disebut reformasi internal, yang juga mengurangi biaya. Kerugian utama dari teknologi MCFC saat ini adalah daya tahannya. Suhu tinggi di mana sel-sel ini beroperasi dan elektrolit korosif yang digunakan mempercepat kerusakan komponen dan korosi, sehingga mengurangi umur sel. Para ilmuwan saat ini sedang mengeksplorasi bahan tahan korosi untuk komponen serta desain sel bahan

bakar yang menggandakan umur sel dari 40.000 jam saat ini (~5 tahun) tanpa mengurangi kinerja.

vi. Solid oxide fuel cells

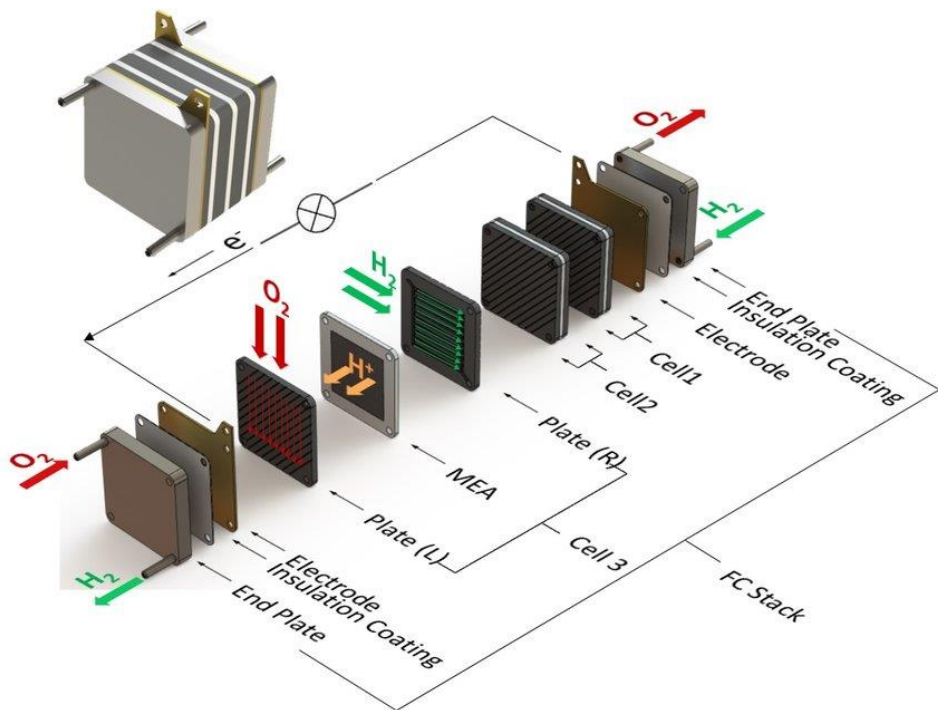
Sel bahan bakar oksida padat (SOFC) menggunakan senyawa keramik yang keras dan tidak berpori sebagai elektrolitnya. SOFC memiliki efisiensi sekitar 60% dalam mengubah bahan bakar menjadi listrik. Dalam aplikasi yang dirancang untuk menangkap dan memanfaatkan limbah panas sistem (co-generasi), efisiensi penggunaan bahan bakar secara keseluruhan bisa mencapai 85%.

SOFC beroperasi pada suhu yang sangat tinggi—hingga 1.000°C (1.830°F). Pengoperasian pada suhu tinggi menghilangkan kebutuhan akan katalis logam mulia, sehingga mengurangi biaya. Hal ini juga memungkinkan SOFC untuk mereformasi bahan bakar secara internal, sehingga memungkinkan penggunaan berbagai jenis bahan bakar dan mengurangi biaya yang terkait dengan penambahan reformer ke dalam sistem.

SOFC juga merupakan jenis sel bahan bakar yang paling tahan sulfur; mereka dapat mentolerir belerang beberapa kali lipat lebih banyak dibandingkan jenis sel lainnya. Selain itu, mereka tidak diracuni oleh karbon monoksida, yang bahkan bisa digunakan sebagai bahan bakar. Properti ini memungkinkan SOFC menggunakan gas alam, biogas, dan gas yang terbuat dari batu bara. Pengoperasian suhu tinggi memiliki kelemahan. Hal ini mengakibatkan permulaan yang lambat dan memerlukan perlindungan termal yang signifikan untuk menahan panas dan melindungi personel, yang mungkin dapat diterima untuk aplikasi utilitas tetapi tidak untuk transportasi. Temperatur pengoperasian yang tinggi juga memberikan persyaratan ketahanan yang ketat pada material. Pengembangan material berbiaya rendah dengan daya tahan tinggi pada suhu pengoperasian sel merupakan tantangan teknis utama yang dihadapi teknologi ini.

Para ilmuwan saat ini sedang menjajaki potensi untuk mengembangkan SOFC bersuhu rendah yang beroperasi pada atau di bawah 700°C yang memiliki lebih sedikit masalah daya tahan dan biaya lebih murah. Namun, SOFC bersuhu lebih rendah belum dapat menandingi kinerja sistem bersuhu lebih tinggi, dan material tumpukan yang akan berfungsi pada kisaran suhu lebih rendah ini masih dalam pengembangan.

3. Komponen *fuel cell*



Gambar 29 Ilustrasi komponen-komponen fuel cell

i. Membrane Electrode Assembly

Membran, lapisan katalis (anoda dan katoda), dan media difusi bersama-sama membentuk rakitan elektroda membran (MEA) dari sel bahan bakar PEM.

ii. Polymer Electrolyte Membrane

Membran elektrolit polimer, atau PEM (juga disebut membran penukar proton)—bahan yang diperlakukan secara khusus dan terlihat seperti bungkus plastik dapur biasa—hanya menghantarkan ion bermuatan positif dan menghalangi elektron. PEM adalah kunci teknologi sel bahan bakar; itu harus mengizinkan hanya ion-ion yang diperlukan untuk lewat antara anoda dan katoda. Zat lain yang melewati elektrolit akan mengganggu reaksi kimia. Untuk aplikasi transportasi, membrannya sangat tipis—dalam beberapa kasus di bawah 20 mikron.

iii. Catalyst Layers

Lapisan katalis ditambahkan pada kedua sisi membran—lapisan anoda di satu sisi dan lapisan katoda di sisi lain. Lapisan katalis konvensional mencakup partikel platinum berukuran nanometer yang tersebar pada penyangga karbon dengan luas permukaan tinggi. Katalis platina yang didukung ini dicampur dengan polimer penghantar ion (ionomer) dan diapit di antara membran dan GDL. Di sisi anoda, katalis platina memungkinkan molekul hidrogen dipecah menjadi proton dan elektron. Di sisi katoda, katalis platina memungkinkan reduksi oksigen dengan bereaksi dengan proton yang dihasilkan oleh anoda, menghasilkan air. Ionomer yang tercampur ke dalam lapisan katalis memungkinkan proton melakukan perjalanan melalui lapisan ini.

iv. Gas Diffusion Layers

GDL berada di luar lapisan katalis dan memfasilitasi pengangkutan reaktan ke dalam lapisan katalis, serta penghilangan air produk. Setiap GDL biasanya terdiri dari selembur kertas karbon yang sebagian serat karbonnya dilapisi dengan polytetrafluoroethylene (PTFE). Gas berdifusi dengan cepat melalui pori-pori di GDL. Pori-pori ini tetap terbuka oleh PTFE hidrofobik, yang mencegah penumpukan air berlebihan. Dalam banyak kasus, permukaan bagian dalam GDL dilapisi dengan lapisan tipis karbon dengan luas permukaan tinggi yang dicampur dengan PTFE, yang disebut lapisan mikropori. Lapisan mikropori dapat membantu mengatur keseimbangan antara retensi air (diperlukan untuk menjaga konduktivitas membran) dan pelepasan air (diperlukan untuk menjaga pori-pori tetap terbuka sehingga hidrogen dan oksigen dapat berdifusi ke dalam elektroda).

v. Bipolar Plates

Setiap MEA menghasilkan kurang dari 1 V pada kondisi operasi tertentu, namun sebagian besar aplikasi memerlukan tegangan lebih tinggi. Oleh karena itu, beberapa MEA biasanya dihubungkan secara seri dengan menumpuknya di atas satu sama lain untuk menghasilkan tegangan keluaran yang dapat digunakan. Setiap sel dalam tumpukan diapit di antara dua pelat bipolar untuk memisahkannya dari sel tetangga. Pelat ini, yang mungkin terbuat dari logam, karbon, atau komposit, memberikan konduksi listrik antar sel, serta memberikan kekuatan fisik pada tumpukan. Permukaan pelat biasanya berisi "bidang aliran", yang merupakan serangkaian saluran yang dibuat atau dicap ke dalam pelat untuk memungkinkan gas mengalir melalui MEA. Saluran tambahan di dalam setiap pelat dapat digunakan untuk mensirkulasikan cairan pendingin.

vi. Gaskets

Setiap MEA dalam tumpukan sel bahan bakar diapit di antara dua pelat bipolar, namun gasket harus ditambahkan di sekitar tepi MEA untuk membuat segel kedap gas. Gasket ini biasanya terbuat dari polimer karet.

B. Sektor Transportasi

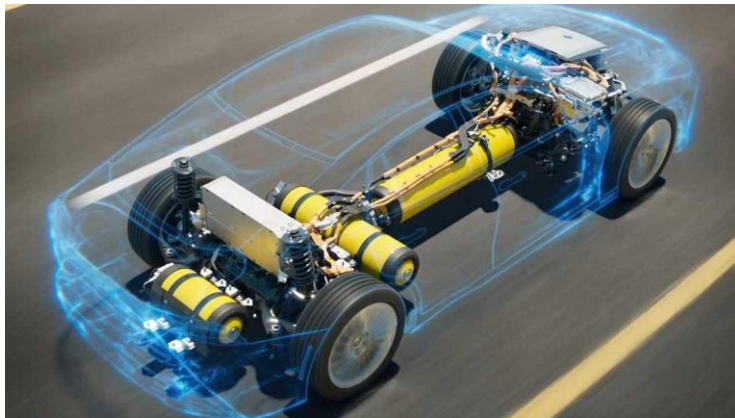
Contoh kendaraan hidrogen adalah Toyota Mirai, Honda Clarity Fuel Cell, dan Hyundai Nexo. Kendaraan ini menggunakan sel bahan bakar untuk menghasilkan listrik dari hidrogen dan oksigen di udara, memberikan kinerja yang serupa dengan kendaraan berbahan bakar konvensional tanpa menghasilkan emisi karbon.

Kendaraan Komersial: Contoh aplikasi komersial termasuk bus hidrogen seperti Hyundai H350 Fuel Cell Electric Bus dan truk hidrogen seperti Nikola Tre dan Toyota Project Portal.



Gambar 30 Contoh-contoh kendaraan fuel cell

1. Kendaraan Penumpang



Gambar 31 Ilustrasi fuel cell di kendaraan

2. Truk dan Bus



Gambar 32 Contoh truk fuel cell

3. Kendaraan khusus



Gambar 33 Contoh forklift fuel cell

4. Kapal Ferry

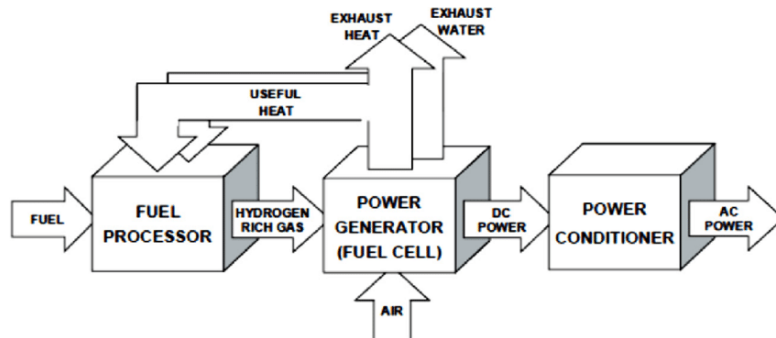


Gambar 34 Contoh kapal ferry menggunakan fuel cell

C. Sektor Energi Listrik

1. Pembangkit Listrik

Hidrogen bisa menjadi pembangkit listrik melalui sebuah alat yang disebut *fuel cell*. Di dalam sel bahan bakar, hidrogen bertemu dengan oksigen dari udara untuk menghasilkan listrik, bersamaan dengan air sebagai hasil sampingnya. Proses ini terjadi melalui reaksi kimia di dalam sel bahan bakar. Ketika hidrogen melewati sel bahan bakar, proton (partikel positif) dari hidrogen bereaksi dengan oksigen dan elektron (partikel negatif) di dalam sel, menghasilkan listrik dan air. Listrik yang dihasilkan bisa digunakan untuk memasok energi ke peralatan atau kendaraan listrik. Proses ini bersih dan tidak menghasilkan emisi polusi udara, sehingga menjadi pilihan yang ramah lingkungan untuk pembangkit listrik di masa depan. Selain itu, hidrogen juga bisa digunakan dalam pembangkit listrik konvensional dengan cara membakarnya, mirip dengan pembakaran bahan bakar fosil, namun hanya menghasilkan air sebagai hasil sampingnya, bukan emisi CO₂.

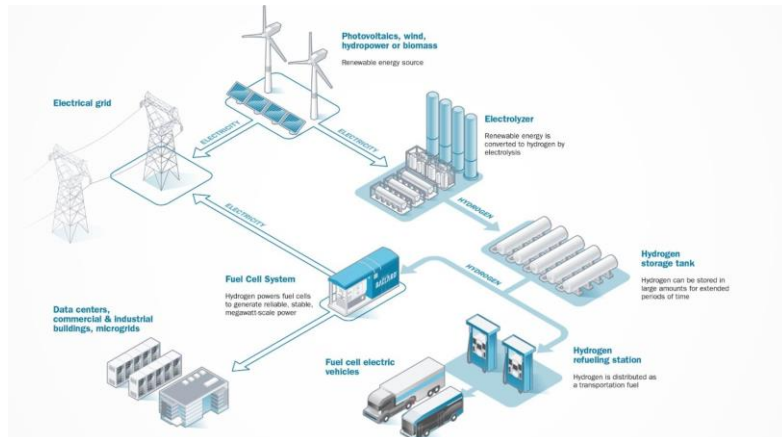


Gambar 35 Skema sederhana fuel cell sebagai pembangkit listrik¹⁸

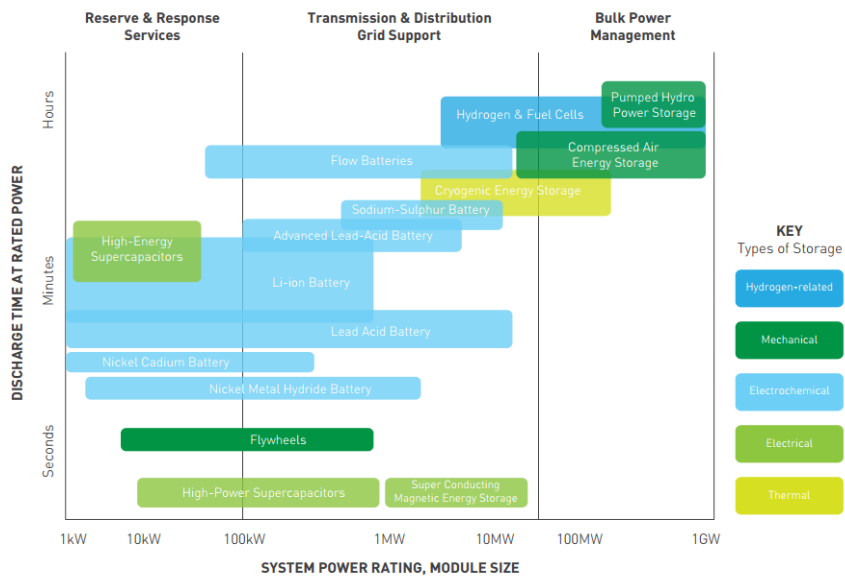
2. Penyimpanan Energi

Hidrogen dapat menjadi penyimpan energi dengan cara mengubahnya menjadi bentuk kimia yang mudah disimpan dan diubah kembali menjadi energi saat dibutuhkan. Misalnya, hidrogen dapat diproduksi dari air melalui proses elektrolisis menggunakan listrik dari sumber terbarukan seperti matahari atau angin. Kemudian, hidrogen yang dihasilkan dapat disimpan dalam tangki atau infrastruktur penyimpanan lainnya. Ketika energi diperlukan, hidrogen dapat diubah kembali menjadi listrik atau panas melalui reaksi kimia dengan menggunakan fuel cell atau digunakan dalam mesin pembakaran internal, menghasilkan energi tanpa emisi karbon.

¹⁸ https://www.researchgate.net/figure/Power-generation-in-fuel-cell-stacks-Brouwer-2020-Principally-gas-turbine-power_fig3_348356169



Gambar 36 Hidrogen sebagai penyimpan anergi pada sistem terbarukan¹⁹



Gambar 37 Perbandingan sistem rating dan dischrge²⁰

¹⁹ <https://blog.ballard.com/powergen/renewable-energy-storage>

²⁰ Centre For Low Carbon Futures – “Pathways for energy storage in the UK”(2012) (p. 22)
<http://www.lowcarbonfutures.org/sites/default/files/Pathways%20for%20Energy%20Storage%20in%20the%20UK.pdf>

D. Sebagai Media Pendingin

Hidrogen pertama kali diusulkan sebagai media pendingin untuk memutar mesin listrik pada tahun 1925. Mesin berpendingin hidrogen pertama, kondensor sinkron 12,5 MVA, mulai digunakan pada tahun 1928. Hampir satu dekade kemudian, pada tahun 1937, generator turbo berpendingin hidrogen pertama ditugaskan oleh Dayton Power and Light di Dayton, Ohio – unit General Electric 31,25 MVA, 3,600 RPM. Secara kebetulan, ini adalah tahun yang sama ketika zeppelin penumpang Jerman, Hindenburg, mengalami kematian yang membara.

Jadi mengapa menggunakan hidrogen untuk mendinginkan generator? Terlepas dari reputasinya, gas hidrogen memiliki kualitas yang menjadikannya sebagai media perpindahan panas dan atmosfer internal yang unggul untuk generator. Hidrogen jauh lebih padat dibandingkan udara. Kipas pendingin dapat memindahkan hidrogen hingga empat belas (14) kali lebih banyak daripada udara dengan menggunakan jumlah daya yang sama. Gabungkan hal ini dengan fakta bahwa hidrogen menghantarkan panas tujuh (7) kali lebih banyak daripada udara. Pada saat yang sama, hidrogen memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi; artinya lebih baik dalam menangkap panas dari permukaan yang panas. Hidrogen juga mempunyai karakteristik kalor jenis yang kurang lebih sama dengan udara, karena keduanya dapat membawa jumlah kalor yang sama.

E. Industri Pupuk

Industri pupuk seperti Yara International menggunakan hidrogen sebagai bahan baku untuk produksi amonia yang digunakan dalam pembuatan pupuk nitrogen.

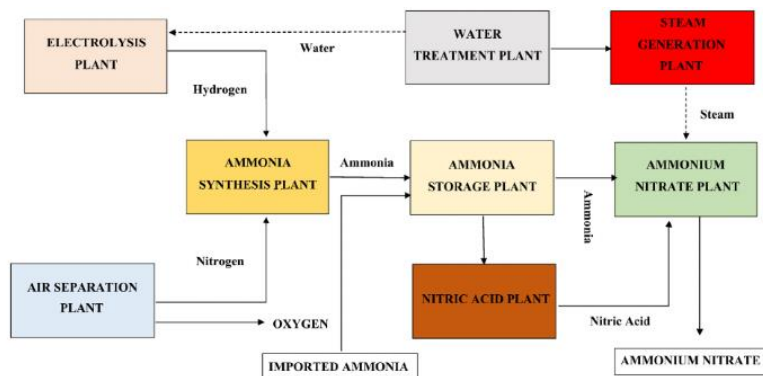


Figure 3. Process flow diagram the fertilizer plant.

Gambar 38 Flow diagram pada industri pupuk²¹

F. Industri Logam

Pemurnian Logam: Proses pemurnian logam seperti pemurnian aluminium menggunakan hidrogen sebagai gas pelindung dan agen reduktor.

Karena kepadatan energinya yang tinggi dan reaktivitasnya dengan bijih besi, hidrogen sangat ideal untuk digunakan dalam pembuatan besi dan baja. Pembuatan baja adalah industri padat energi, yang sulit untuk didekarbonisasi karena panas yang dibutuhkan untuk mereduksi bijih besi dalam pembuatan baja. Proses ini secara historis bergantung pada batu bara untuk menghasilkan panas, yang kemudian melepaskan karbon monoksida dan dioksida. Hidrogen menawarkan alternatif untuk mengurangi emisi karbon dari proses ini, sebagian besar menggantikan batu bara untuk pembakaran dan reaksi langsung.

Ada dua cara penggunaan hidrogen dalam produksi baja:

²¹ <http://dx.doi.org/10.4236/ait.2021.112005>

Hidrogen dapat digunakan sebagai zat pereduksi tambahan pada rute BF-BOF (H2-BF)

Hidrogen dapat digunakan sebagai satu-satunya zat pereduksi dalam proses yang disebut reduksi besi langsung atau DRI (H2-DRI)

Penggunaan hidrogen pada rute Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace (BF-BOF)

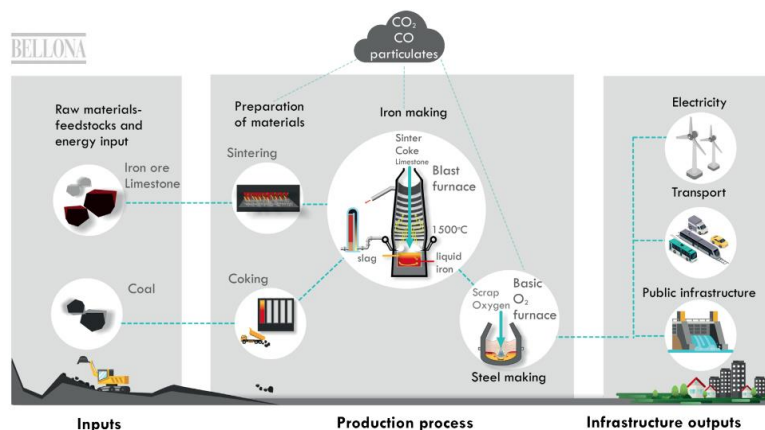


Figure 5: The steel making process creates emissions both during the preparation of materials and iron and steelmaking.

Gambar 39 Aplikasi hidrogen pada industri baja

Rute BF-BOF, juga dikenal sebagai jalur produksi utama, menyumbang 60% produksi baja di Eropa. Mayoritas emisi berasal dari tanur sembur dan pabrik kokas. Pabrik kokas menghasilkan batubara kokas, yang digunakan dalam tanur sembur baik sebagai sumber panas maupun untuk mereduksi zat besi. H2-BF berpotensi mengurangi emisi baik di pabrik kokas maupun tanur sembur karena mengurangi jumlah batu bara yang dibutuhkan dan hanya membentuk air setelah bereaksi dengan bijih besi, bukan karbon dioksida. Saat ini, zat pereduksi tambahan yang paling umum adalah batu bara bubuk (PC), minyak

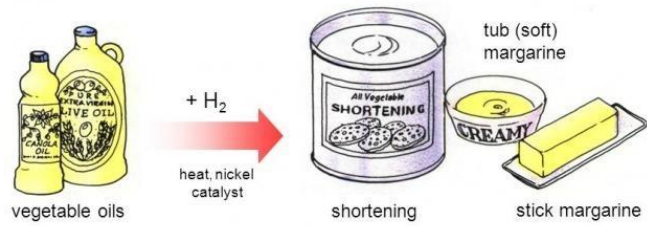
Hidrogenasi adalah proses penambahan hidrogen pada ikatan rangkap dari rantai atom karbon minyak atau asam lemak sehingga mengurangi tingkat ketidakjenuhan minyak atau asam lemak tersebut. Pada hidrogenasi terjadi perubahan jumlah ikatan rangkap dalam suatu asam lemak oleh gas hidrogen (H_2).

Minyak kelapa terhidrogenasi lebih terjangkau dibandingkan dengan minyak kelapa murni (VCO) dan seharusnya relatif lebih mudah untuk dicampur dengan berbagai bahan industri yang berbeda.

Ada dua jenis minyak kelapa terhidrogenasi, satu terhidrogenasi sebagian dan yang lainnya terhidrogenasi penuh. Metode hidrogenasi mengurangi kandungan asam lemak tak jenuh yang sudah kecil dalam minyak kelapa. Titik leleh dinaikkan dari $25^\circ C$ untuk minyak kelapa menjadi $30-36^\circ C$ untuk minyak kelapa terhidrogenasi. Hasil dari proses hidrogenasi ini adalah menjadi bentuk padat putih seperti kristal dengan bau khas.²⁴

²⁴ <https://sarimas.com/post/detail/understanding-and-benefits-of-hydrogenated-coconut-oil#:~:text=Metode%20hidrogenasi%20mengurangi%20kandungan%20asam,sudah%20kecil%20dalam%20minyak%20kelapa.>

Hydrogenation



Gambar 41 Proses hidrogenasi pada makanan

Masa Depan dan Tantangan Aplikasi Hidrogen

A. Perspektif Masa depan

Berikan gambaran tentang bagaimana Anda melihat peran hidrogen berkembang di masa depan, serta potensi dampaknya terhadap ekonomi dan lingkungan.

Hidrogen telah menjadi fokus utama dalam perdebatan energi masa depan karena berbagai alasan, termasuk potensinya sebagai sumber energi bersih dan berkelanjutan. Berikut adalah beberapa poin tentang masa depan hidrogen:

Energi Bersih: Hidrogen dianggap sebagai salah satu alternatif terbaik untuk mengurangi emisi karbon dalam sektor energi. Ketika digunakan dalam sel bahan bakar atau sebagai bahan bakar untuk kendaraan listrik berteknologi hidrogen, hidrogen hanya menghasilkan air sebagai hasil samping, bukan emisi CO₂ atau polutan lainnya.

Pembangkit Energi: Hidrogen bisa menjadi elemen penting dalam infrastruktur energi masa depan, baik sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik, industri, atau transportasi. Dengan teknologi sel bahan bakar yang terus berkembang, hidrogen dapat digunakan untuk menghasilkan listrik secara efisien dan dapat diintegrasikan dengan jaringan listrik yang ada.

Penyimpanan Energi: Salah satu tantangan dalam mengintegrasikan energi terbarukan seperti angin dan surya adalah fluktuasi dalam pasokan. Hidrogen dapat berperan sebagai penyimpan energi yang efisien, karena dapat dihasilkan saat pasokan energi berlebih (misalnya, dari pembangkit listrik angin yang berlebih) dan digunakan ketika dibutuhkan.

Transportasi: Teknologi kendaraan listrik berteknologi hidrogen sedang dikembangkan dan diadopsi. Kendaraan ini memiliki keunggulan seperti waktu

pengisian cepat dan jangkauan yang lebih besar dibandingkan dengan kendaraan listrik baterai. Selain itu, industri penerbangan dan maritim juga sedang mengeksplorasi penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar untuk mengurangi emisi karbon.

Produksi dan Distribusi: Salah satu tantangan utama dalam mengadopsi hidrogen secara luas adalah produksi yang bersih dan efisien. Saat ini, sebagian besar hidrogen diproduksi dari bahan bakar fosil, yang menghasilkan emisi karbon. Namun, produksi hidrogen dari sumber terbarukan seperti elektrolisis air menggunakan energi terbarukan sedang mengalami perkembangan pesat. Distribusi dan infrastruktur juga harus dikembangkan untuk mendukung penggunaan hidrogen secara luas.

B. Tantangan

1. Produksi Bersih

Produksi hidrogen bersih merupakan salah satu tantangan utama. Saat ini, sebagian besar hidrogen diproduksi dari bahan bakar fosil, yang menghasilkan emisi karbon. Meningkatkan produksi hidrogen dari sumber energi terbarukan seperti energi surya dan angin adalah kunci untuk mengurangi jejak karbon hidrogen.

2. Infrastruktur

Pengembangan infrastruktur yang diperlukan untuk produksi, penyimpanan, distribusi, dan penggunaan hidrogen merupakan tantangan besar. Hal ini memerlukan investasi besar dalam pembangunan pabrik-pabrik produksi hidrogen, jaringan pipa, terminal penyimpanan, stasiun pengisian, dan lainnya.

3. Efisiensi

Efisiensi dalam produksi, penyimpanan, dan penggunaan hidrogen harus terus ditingkatkan untuk membuatnya lebih kompetitif dengan sumber energi lainnya. Selain itu, teknologi sel bahan bakar dan infrastruktur terkait harus ditingkatkan untuk memastikan efisiensi yang optimal.

4. Biaya

Biaya produksi hidrogen bersih saat ini masih relatif tinggi dibandingkan dengan bahan bakar fosil konvensional. Pengurangan biaya produksi dan penggunaan hidrogen menjadi salah satu tantangan utama untuk mengubahnya menjadi pilihan yang lebih ekonomis.

5. Keamanan

Penggunaan hidrogen juga menimbulkan pertimbangan keamanan yang perlu diatasi. Hidrogen merupakan bahan yang sangat mudah terbakar dan dapat membentuk campuran yang sangat mudah meledak dengan udara, sehingga perlu dikelola dengan hati-hati.