FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Air sebagai Bahan Bakar, Mungkinkah?

Kontribusi ITB untuk Bangsa

Editor:

Edy Tri Baskoro
Mindriany Syafila
Benyamin Sapiie
Wika Maulany Fatimah

Penulis:

Robert Manurung
Yogi Wibisono Budhi
Tri Yuswidjajanto Zaenuri

Air Sebagai Bahan Bakar, Mungkinkah?
Kontribusi ITB untuk Bangsa

Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Penulis:
Robert Manurung
Yogi Wibisono Budhi
Tri Yuswidjajanto Zaenuri

Editor:
Edy Tri Baskoro
Mindriany Syafila
Benyamin Sapiie
Wika Maulany Fatimah

Hak cipta pada penulis dan dilindungi Undang-Undang
Hak penerbit pada Forum Guru Besar ITB

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

Judul: **Serial ITB untuk Bangsa**
Air sebagai Bahan Bakar, Mungkinkah ?

Penerbit : Forum Guru Besar ITB
Penanggung Jawab : Edy Tri Baskoro
Mindriany Syafila
Editor : Edy Tri Baskoro
Mindriany Syafila
Benyamin Sapiie
Wika Maulany Fatimah
Penulis : Robert Manurung
Yogi Wibisono Budhi
Tri Yuswidjajanto Zaenuri

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2022
vi+70 h., 17,5 x 25 cm
ISBN

KATA PENGANTAR KETUA FGB ITB

Buku ini merupakan salah satu hasil rekomendasi yang diperoleh dari penyelenggaraan webinar **Serial ITB untuk Bangsa**. Topik tentang kemungkinan air dapat dijadikan suatu bahan bakar dibahas pada webinar tersebut, yang diselenggarakan oleh Forum Guru Besar ITB pada tanggal 25 Mei 2022 yang lalu. Pembicara pada saat itu adalah Prof. Robert Manurung dari SITH ITB, Prof. Yogi Wibisono Budhi dari FTI ITB, dan Dr. Tri Yuswidjajanto dari (FTMD ITB).

Buku ini berisi tentang pemikiran dari ketiga pakar tersebut berkaitan dengan kemungkinan air dapat dijadikan sebagai bahan bakar serta hasil diskusi tentang hal tersebut. Selain rekaman video dari acara ini yang tersimpan dalam kanal Youtube FGB ITB, kami sangat berharap bahwa kehadiran buku ini dapat memberikan pencerahan dan tambahan wawasan yang komprehensif kepada kita semua terhadap topik hangat di atas yang sering muncul berkali-kali dibincangkan di ruang publik.

Kami mengucapkan banyak terima kasih kepada Komisi III FGB ITB “Solusi Permasalahan Bangsa” yang diketuai oleh Prof. Ir. Benyamin Sapiie, Ph.D atas terselenggaranya acara webinar tersebut. Kami juga memberikan apresiasi yang tinggi kepada Prof. Robert, Prof. Yogi dan Dr. Tri Yus atas perkenannya untuk berbagi ilmu dan pemikiran yang saya yakin akan banyak memberikan manfaat bagi masyarakat dan bangsa.

Bandung, 19 Desember 2022

Ketua Forum Guru Besar ITB
Prof. Edy Tri Baskoro, MSc., Ph.D

KATA PENGANTAR EDITOR

Kebutuhan energi di Indonesia semakin meningkat, dimana sumber energi utama saat ini adalah energi *fossil* (*non-renewable*). Ketersediaan energi fossil dunia saat ini sudah sangat menipis walaupun usaha eksplorasi terus menerus dilakukan dengan menggunakan teknologi yang sudah semakin canggih. Selain itu energi *fossil* juga dianggap sebagai energi kotor yang menghasilkan CO2 yang dapat membahayakan kehidupan manusia dimasa depan. Sehingga diperlukan alternatif energi lain yang bersifat *renewable* dan juga bersih (*green energy*). Untuk mencapai ini usaha eksplorasi, inovasi dan pengembangan sumber energi lain yang bersifat energi baru terbarukan (EBT*)* berkembang sangat pesat termasuk di Indonesia. Jenis EBT yang akan dikembangkan diharapkan untuk menggantikan energi *fossil* sebagai bahan bakar di masa depan yang selain berlimpah, murah dan bersih. Saat ini ada berbagai jenis EBT yang dikenal antara lain surya, angin, geothermal, bioenergi dan Hydrogen (H_2). Walaupun tidak semua EBT dapat menggantikan energi *fossil* dalam hal bahan bakar untuk kendaraan bermotor terutama dalam hal teknologi murah. Tetapi Mobil listrik akan pasti merupakan kendaraan masa depan dimana sumber energinya rencana sepenuhnya berasal dari EBT.

Air adalah salah bahan baku yang paling berlimpah di alam, sehingga timbul usaha-usaha untuk mengunakan air sebagai bahan bakar termasuk di Indonesia antara lain kasus Blue Energy (2008) dan Nikuba (2022). Isu air sebagai bahan bakar merupakan hal utama yang akan dbahas dan dikupas dalam buku ini sebagai hasil buah pikiran para ahli di ITB yang telah dipresentasikan dalam Serial webinar **ITB untuk Bangsa** dari Komisi III FGB ITB, dengan judul: Air sebagai bahan bakar, mungkinkah?

Air bukanlah unsur yang dapat terbakar, selain itu molekul air (H_2O) adalah molekul yang sangat stabil yang terikat sangat kuat sehingga akan diperlukan energi yang sangat besar untuk memisahkannya yang akan jauh lebih besar dari pada energi yang dihasilkan. Apakah ada harapan air bisa menjadi sumber energi untuk bahan bakar? Salah satu kemungkinannya adalah H_2 yang merupakan salah satu alternatif EBT masa depan yang saat ini sudah banyak penelitian dan percobaannya. Sehingga mungkin saja air akan menjadi sumber bahan bakar secara tidak langsung yaitu sumber penghasil H_2, yang jika ini bisa terjadi akan dapat memberikan suatu alternatif energi murah, berlimpah dan bersih di masa depan.

Dalam buku ini disajikan tiga isu utama yang pembahasannya berkaitan dengan air sebagai bahan bakar; antara lain termasuk pembahasan berkaitan dengan peran air dalam energi surya, teknologi pemisahan molekul air menjadi energi mekanik, air sebagai sumber H_2 untuk bahan bakar, dan H_2 sebagai bahan bakar kendaran bermotor masa depan. Besar harapan kami pembahasan dan diskusi yang disajikan dalam buku ini dapat berguna sebagai bahan rujukan bagi kita semua dan untuk masyarakat Indonesia umumnya dalam kaitannya dengan kebutuhan energi masa depan.

Bandung, 19 Desember 2022

Editor

Edy Tri Baskoro
Mindriany Syafila
Benyamin Sapiie
Wika Maulany Fatimah

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR KETUA FGB ITB iv

KATA PENGANTAR EDITOR v

DAFTAR ISI vii

1 MEMANEN ENERGI SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI BERKELANJUTAN BAGI KEHIDUPAN 1

I. PENDAHULUAN 2

II. MEMANEN ENERGI SURYA DAN SIMBIOSIS INDUSTRIAL: PERAN AIR DALAM KONVERSI BIO-KIMIA 4

III. PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN KONVERSI (GASIFIKASI) BIOMASSA DI ITB 12

IV. PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN LANJUT KONVERSI TERMOKIMIA DAN BIOKIMIA BIOMASA 15

V. PERAN AIR DALAM KONVERSI TERMOKIMIA DAN ELEKTROKIMIA 17

VI. KESIMPULAN 23

2 INTENSIFIKASI PROSES PRODUKSI H_2 SEBAGAI ENERGI BERSIH MASA DEPAN 26

I. LATAR BELAKANG 27

II. INTENSIFIKASI PROSES 29

III. HIDROGEN SEBAGAI SUMBER ENERGI 30

IV. PENGEMBANGAN DI ITB 38

V. KESIMPULAN 41

3 PEMANFAATAN HIDROGEN UNTUK BAHAN BAKAR KENDARAAN BERMOTOR 42

I. LATAR BELAKANG 43

II. PEMANFAATAN HIDROGEN 45

III. PENGGUNAAN H_2 PADA *FUEL CELL* 50

IV. KESIMPULAN 56

1

MEMANEN ENERGI SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI BERKELANJUTAN BAGI KEHIDUPAN

Peran Air dalam Konversi Bio-kimia, Termo-kimia, dan Elektro-kimia

ROBERT MANURUNG

Guru Besar Rekayasa Hayati

Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati ITB

- PENDAHULUAN
- MEMANEN ENERGI SURYA DAN SIMBIOSIS INDUSTRIAL: PERAN AIR DALAM KONVERSI BIO-KIMIA
- PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN KONVERSI (GASIFIKASI) BIOMASSA DI ITB
- PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN LANJUT KONVERSI TERMOKIMIAN DAN BIOKIMIA BIOMASSA
- PERAN AIR DALAM KONVERSI TERMOKIMIAN DAN ELEKTROKIMIA
- KESIMPULAN

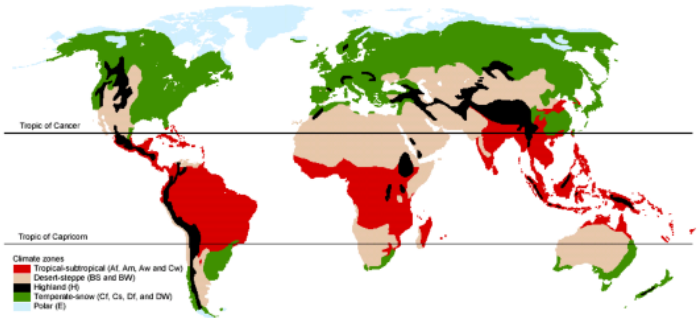
I. PENDAHULUAN

Materi ini disampaikan pada pertemuan Forum Guru Besar (FGB) ITB dengan tujuan memberi pendapat terhadap wacana yang muncul berulang kali di masyarakat terkait pernyataan 'air sebagai bahan bakar'. Untuk memahami wacana terkait air dan bahan bahan bakar, pertama perlu disampaikan bahwa bahan bakar adalah zat yang melepas energi pada proses oksidasi, dan kehidupan dapat dipandang sebagai transformasi energi dengan air berperan sentral di dalamnya.

"*Life must be regarded, at the deepest level, as a matter as much of energy transformation as of genetic replication*" – Wicken, 1987

Kutipan ini disampaikan untuk memahami bahwa sama halnya kehidupan yang dipandang ada dan berlangsung karena adanya replikasi genetika, kehidupan juga pada tingkat yang lebih mendasar dapat dipandang ada dan berlangsung karena adanya transformasi energi. Setiap kegiatan dalam kehidupan membutuhkan energi, seperti bergerak atau berjalan, saat bernafas, berpikir, bahkan saat mengedipkan mata. Meski pernyataan "melakukan segala hal memerlukan energi" terasa sangat sederhana, namun pemahaman terhadap yang sederhana dan mendasar seperti energi, dan juga seperti perihal '*value*' lainnya, sering menjadi batu sandungan dan menimbulkan wacana yang menyimpang justru dikarenakan peran penting energi yang krusial dalam kehidupan. Perdebatan air sebagai bahan bakar muncul karena wacana didasari pengertian yang tidak lengkap dan tidak utuh tentang esensi air dan esensi bahan bakar bagi kehidupan. Pemahaman tentang air dan energi secara utuh dan lengkap (komprehensif) sangat penting karena merupakan landasan dan kunci untuk memajukan ilmu pengetahuan, invensi dan inovasi dalam upaya penghijauan kembali lahan tandus dan terlantar demi keberlangsungan kehidupan di bumi.

"*The trouble with simple things is that one must understand them very well*", - Anonimus

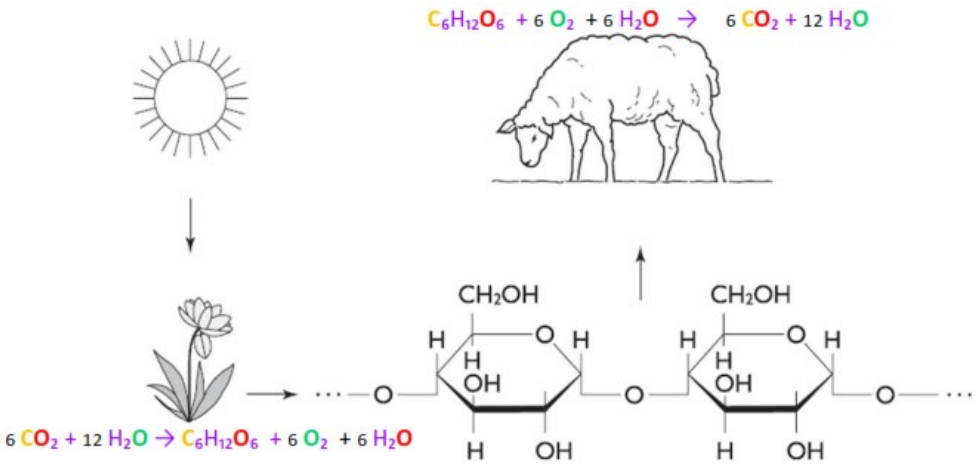


Gambar 1.1 Peta jenis iklim berdasarkan temperatur dan geografis

Bagian awal materi paparan ini tidak serta merta merespon langsung pertanyaan atau pernyataan terkait wacana 'air sebagai bahan bakar', namun terlebih dahulu akan disampaikan peran air dalam **transformasi energi** yang jauh lebih mendasar dan penting dari segi (aspek) utama kehidupan pada lingkungan hidup alami. Pemahaman peran air yang terlibat dalam transformasi energi juga sangat penting dalam menggali potensi alam Indonesia sebagai satu dari banyak negara yang terletak di sabuk khatulistiwa (selain negara di Afrika dan Amerika Selatan) seperti dapat dilihat pada Gambar 1.1. Indonesia yang berada di sabuk khatulistiwa, diberkati dengan potensi energi surya dan air yang melimpah. Air memiliki peran yang amat menentukan (*crucial*) dalam pemanfaatan energi surya yang tidak dimiliki setiap negara yang berada disabuk katulistiwa. Ketersediaan energi surya dan air merupakan sumber daya alam utama yang diperlukan dalam pemeliharaan kehidupan berkelanjutan pada lingkungan hidup alami. Pemanfaatan energi surya tidak hanya dengan menggunakan *solar panel* yang belakangan ini diminati sebagai salah satu pilihan utama dalam penyediaan energi. Namun, materi presentasi ini mengedepankan peran penting tanaman dalam sistem pertanian dan perkebunan dan kehutanan bagi kehidupan, yakni keterikatan tumbuhan yang melakukan transformasi energi elektromagnetik dari sinar matahari (surya) melalui fotosintesis menjadi energi biokimia yang terkandung dalam biomasa tanaman dalam mendukung berbagai segi kehidupan pada lingkungan hidup alami di bumi yang telah berlangsung sejak miliar tahun yang lalu.

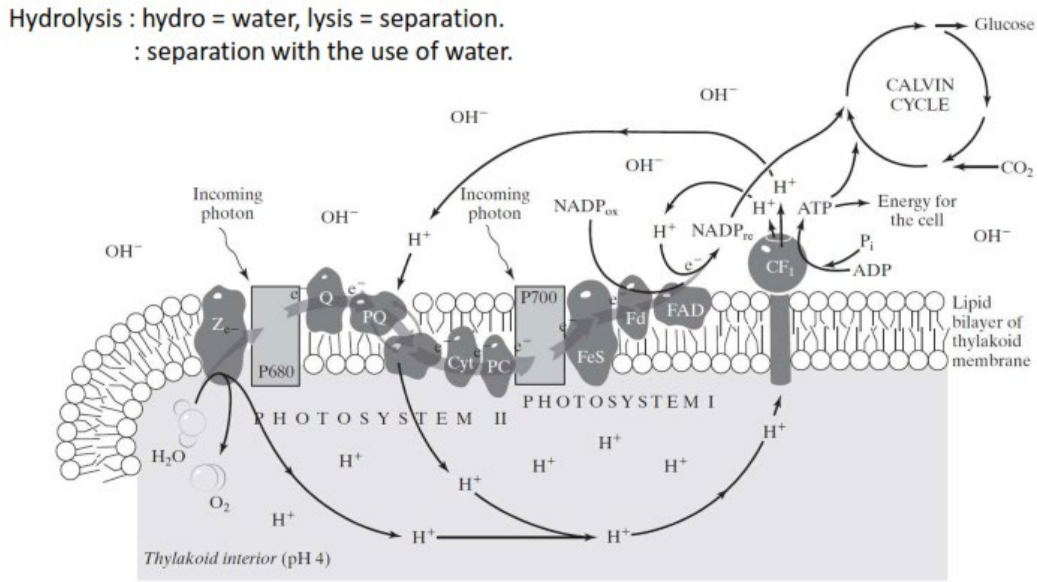
II. MEMANEN ENERGI SURYA DAN SIMBIOSIS INDUSTRIAL: PERAN AIR DALAM KONVERSI BIO-KIMIA

Pada Pertanian-Perkebunan berlangsung transformasi energi elektromagnetik sinar matahari menjadi energi kimiawi yang diwadahi oleh tanaman seperti dapat dilihat pada Gambar 1.2. Transformasi ini dikenal sebagai fotosintesis, dimana tanaman dan semua organisme autotrof memanfaatkan (memanen) energi matahari dengan menggunakan bahan (reaktan) CO_2 dan H_2O untuk membentuk (*biosynthesis*) karbohidrat (polimer molekul glukosa). Perlu dicatat di sini bahwa proses fotosintesis tidak hanya membentuk karbohidrat (glukosa) sebagaimana sudah umum diketahui, tapi juga melakukan pertukaran atom oksigen dari semula ada pada struktur molekul CO_2 menjadi bagian struktur molekul karbohidrat dan H_2O, sementara oksigen yang semula ada pada struktur molekul H_2O menjadi molekul O_2. Dari reaksi sederhana fotosintesis ini, dapat dilihat disamping berlangsung proses memanen energi surya, juga berlangsung pemurnian oksigen dan pemurnian air pada tanaman. Di sisi lain, makhluk hidup memerlukan energi, sehingga reaksi sebaliknya yaitu penguraian karbohidrat (polimer molekul glukosa) akan berlangsung. Makhluk hidup menggunakan oksigen (O_2) dan air (H_2O) untuk penguraian karbohidrat menjadi energi yang diperlukan untuk hidup, dan melepas gas CO_2, dan uap air (H_2O). Dari kedua reaksi pada Gambar 1.2, terlihat peran penting air (H_2O), sebagai media yang berperan penting dalam memanen energi surya melalui fotosintesis dan dalam pemanfatan produk fotosintesis oleh hewan, manusia dan semua organisme lain pengguna tanaman (bukan organisme autotrof). Menarik disimak secara rinci kedua reaksi pada Gambar 1.2, bahwa pada proses fotosintesis maupun pada proses penguraian karbohidrat oleh makhluk hidup, air (H_2O) diperlukan sebagai reaktan reaksi dan dihasilkan pada produk reaksi.



Gambar 1.2 Skema konversi energi pada tanaman dan makhluk hidup pengguna tanaman

Proses fotosintesis yang dikenal umum dengan reaksi kimia sederhana seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2, pada hakikatnya berlangsung jauh lebih kompleks dan melibatkan berbagai proses hidrolisis dengan tahapan yang panjang dan kompleks seperti dapat dilihat pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3 Fotosintesis dengan reaksi gelap dan terang (*light and dark reactions*)

Pada Gambar 1.3, ditunjukkan peran air sebagai *charge-carrier* yang sangat menentukan dalam transformasi energi surya melalui mekanisme induksi foton dari sinar matahari yang kemudian digunakan pada biosintesis *adenosine triphosfat* (ATP). ATP selanjutnya berperan sebagai *energy carrier* dalam memenuhi kebutuhan energi bagi keberlangsungan hidup trilunan sel tubuh satu makhluk hidup dan dalam menggerakkan siklus Calvin untuk melangsungkan biokonversi glukosa menjadi berbagai senyawa melalui reaksi biokimia yang berlangsung setiap saat dalam sel tersebut. Peran air pada "kehidupan", lebih spesifik pada tubuh makhluk hidup dapat dilihat dari air yang digunakan pada ribuan reaksi biokimia untuk melangsungkan proses metabolisme (katabolisme-pemecahan molekul kompleks jadi molekul sederhana, maupun dalam anabolism–menyusun senyawa yang lebih kompleks dari molekul sederhana). Beberapa contohnya dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Nilai ΔG pada reaksi biokimia

Table 4.4. *Values of $\Delta G^{\circ\prime}$ for some important biochemical reactions*

Reaction	$\Delta G^{\circ\prime}$ (kcal mol^{-1})
HYDROLYSIS	
Acid anhydrides:	
Acetic anhydride + $H_2O \rightarrow$ 2 acetate	−21.8
$PP_i + H_2O \rightarrow 2P_i$	−8.0
$ATP + H_2O \rightarrow ADP + 2P_i$	−7.3
Esters:	
Ethylacetate + $H_2O \rightarrow$ ethanol + acetate	−4.7
Glucose-6-phosphate + $H_2O \rightarrow$ glucose + P_i	−3.3
Amides:	
Glutamine + $H_2O \rightarrow$ glutamate + NH_4^+	−3.4
Glycylglycine + $H_2O \rightarrow$ 2 glycine (a peptide bond)	−2.2
Glycosides:	
Sucrose + $H_2O \rightarrow$ glucose + fructose	−7.0
Maltose + $H_2O \rightarrow$ 2 glucose	−4.0
ESTERIFICATION	
Glucose + $P_i \rightarrow$ glucose-6-phosphate + H_2O	+3.3
REARRANGEMENT	
Glucose-1-phosphate → glucose-6-phosphate	−1.7
Fructose-6-phosphate → glucose-6-phosphate	−0.4
Glyceraldehyde-3-phosphate → dihydroxyacetone phosphate	−1.8
ELIMINATION	
Malate → fumarate + H_2O	+0.75
OXIDATION	
Glucose + $6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	−686
Palmitic acid + $23O_2 \rightarrow 16CO_2 + 16H_2O$	−2338
PHOTOSYNTHESIS	
$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow$ six-carbon sugars + $6O_2$	+686

The data are from p. 397 of Lehninger, A.L. (1975) *Biochemistry*, 2nd edn. New York: Worth.

Dari **tabel 1.1** di atas terlihat peran penting air (H_2O) dalam proses penguraian dan pembentukan molekul. Lebih jauh lagi, air sangat berperan untuk memungkinkan suatu rekasi berlangsung ke arah pelepasan energi termal, **$\Delta q \geq 0$** (atau energi bebas Gibbs yang harus memiliki nilai negatif, **$\Delta G \leq 0$**). Bila ΔG positif, reaksi di dalam tubuh makhluk hidup akan dipasangkan (*coupling*) dengan reaksi yang memiliki ΔG negatif, khususnya dipasangkan dengan hidrolisis ATP. Peran penting air bagi kehidupan dapat dilihat dari reaksi biosintesis yang hanya dapat berlangsung dengan memanfaatkan energi yang terkandung pada ATP yang dilepas melalui proses hidrolisis menggunakan air.

Dapat direfleksikan dari peran penting air pada mahluk hidup, perkembangan peradaban kehidupan di bumi, selalu dimulai pada lokasi yang dekat dengan ketersediaan air atau mendekati sumber air.

Dalam konteks 'memamen' energi surya, ide yang diajukan adalah "memanen" energi surya dengan menggunakan tanaman singkong (yang sudah pernah dilakukan di Sudan). Tantangan utama di daerah sub-sahara seperti Sudan adalah ketersediaan air. Dengan analisis lokasi sungai Nil, kami berkeyakinan bahwa ada air permukaan tersedia melimpah di Sudan, dengan ketersedian air yang akan makin dalam dari permukaan sebanding dengan jarak yang semakin jauh dari sungai Nil. Kemudian, dengan mencampur lumpur sungai Nil sebanyak 10 truk (sekitar 10 ton/truk) per hektar dalam upaya peningkatan daya ikat air (*water holding capacity)*, dan dilanjutkan menanam alfalfa (*medicago sativa*) sebagai tanaman pionir, telah berhasil ditanaman singkong dengan produktivitas 15 kg/pohon, dan populasi 10.000 pohon/ha, atau setara dengan 150 ton per ha, tanpa penambahan pupuk sintetik (foto dapat dilihat pada Gambar 1.4). Yang ingin digaris bawahi di sini adalah keberhasilan tanaman singkong di daerah gurun pasir Sudan hanya dimungkinkan dengan adanya ketersediaan air yang di pompa ke permukaan dari kedalaman 20 meter menggunakan energi dari Panel Tenaga Surya.

Gambar 1.4 Memanen energi surya di gurun pasir Sudan dengan tanaman singkong

Singkong merupakan tanaman yang dapat dengan mudah ditemukan di penjuru Indonesia dan merupakan salah satu tanaman yang paling efisien dalam memanen energi surya. Perbandingan efektivitas pemanenan energi surya antara singkong, sawit, dan beras cukup signifikan. Dalam luasan satu hektar tanah yang ditanami tumbuhan per tahun, jenis singkong dapat menghasilkan sebesar 540 MJ (mega Joule) energi, sawit dapat menghasilkan sebesar 190 MJ, dan beras dapat menghasilkan energi sebesar 108 MJ. Apabila dibandingkan antara singkong : sawit : beras, maka dapat diketahui bahwa perbandingan efektivitas pemanenan energi surya oleh ketiga tananaman dengan menggunakan komoditas pati singkong: lipida buah sawit : pati beras adalah 15 : 5 : 3, dengan pati dari singkong memiliki nilai pemanenan energi dengan efektivitas paling tinggi.

Nilai energi yang terhitung didapat dengan menggunakan beberapa pertimbangan konversi nilai produktivitas pati/karbohidrat pada singkong dan padi serta produktivitas lipida pada kelapa sawit menjadi nilai kalor pati dan lipida dari data yang dimiliki, yakni:

- Produktivitas karbohidrat singkong : 20 – 40 Ton/ha/tahun
- Produktivitas karbohidrat padi (beras) : 5 – 7 Ton/ha/tahun (dua kali panen per tahun)
- Produktivitas lipida kelapa sawit : 4 – 6 Ton/ha/tahun

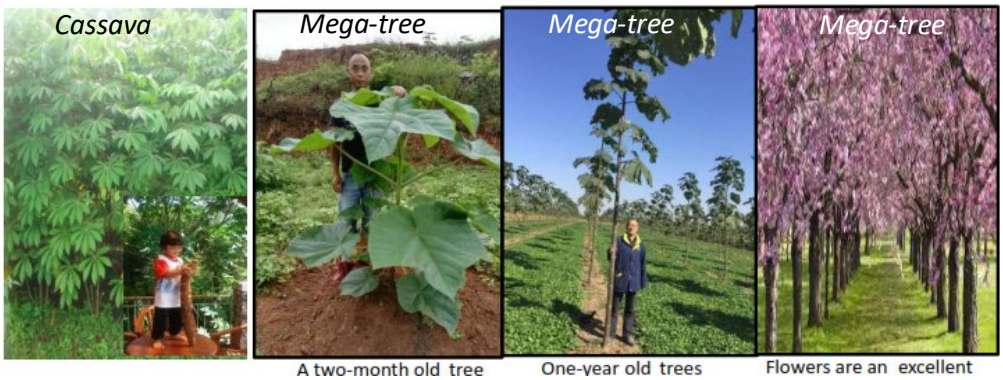
Kemudian, dengan mengetahui bahwa nilai kalor pati adalah 4400 kkal/kg atau setara 18 MJ/Ton dan nilai kalor lipida adalah 9200 kkal/kg atau setara 38 MJ/Ton, maka dapat dihitung energi yang dihasilkan oleh masing-masing tanaman per hektar per tahun dengan durasi dan intensitas pemberian energi surya yang sama.

Dalam konteks menelusuri tumbuhan tahunan (*perennial*) yang dapat memanen energi surya secara sinambung dan efektif, telah diidentifikasi tanaman yang diberi label *mega flora tree*, atau *we-grow tree*. Tanaman tersebut merupakan hasil hibridisasi dari beberapa tanaman induk yang keefektifannya memanfaatkan energi surya sangat tinggi yang dikaji dari kecepatan pertumbuhan pohon tersebut. Pohon ini disamping pertumbuhan yang sangat cepat dan menghasilkan produktivitas biomasa tinggi, juga di klaim menghasilkan bunga yang banyak pada rentang waktu pertumbuhan tertentu. Di Indonesia direncanakan akan ditanam pohon *mega floral tree* atau *we-grow tree* pada lahan percobaan setelah mendapat perizinan dari Kementerian Kehutanan dan kementerian terkait. Keuntungan penanaman *mega flora tree* atau *we-grow tree* adalah tanaman tersebut yang bukan invasive, daun yang memilik nutrisi sebagai pakan ternak dan bunga tanaman yang merupakan sumber nectar yang sangat baik bagi serangga pengumpul nectar seperti *trigona sp*.

Berkaitan dengan pemanasan global *(Global Warming),* penanaman pohon jenis *mega flora tree* telah didukung (*endorsed*) oleh PBB sebagai upaya penghijauan bumi. Upaya ini juga penting bagi Indonesia, karena dapat mencegah daratan sejumlah wilayah Indonesia yang akan tenggelam karena kenaikan permukaan air laut apabila pemanasan global dibiarkan berlangsung pada jangka waktu yang lama.

Dalam jangka pendek keinginan menaman pohon tahunan juga dalam upaya menciptakan kawasan perkebunan singkong yang ramah lingkungan. Dengan pola pertanaman campuran (*polyculture*) antara tanaman singkong dan tanaman jenis *mega flora tree*, diharapkan akan dibangun suatu ekosistem yang harmonis yang memungkinkan ketersedian sumber pangan karbohidrat dan protein (dari daun

singkong) serta sumber energi dari konversi biomasa tanaman pohon *mega flora tree* secara berkelanjutan.

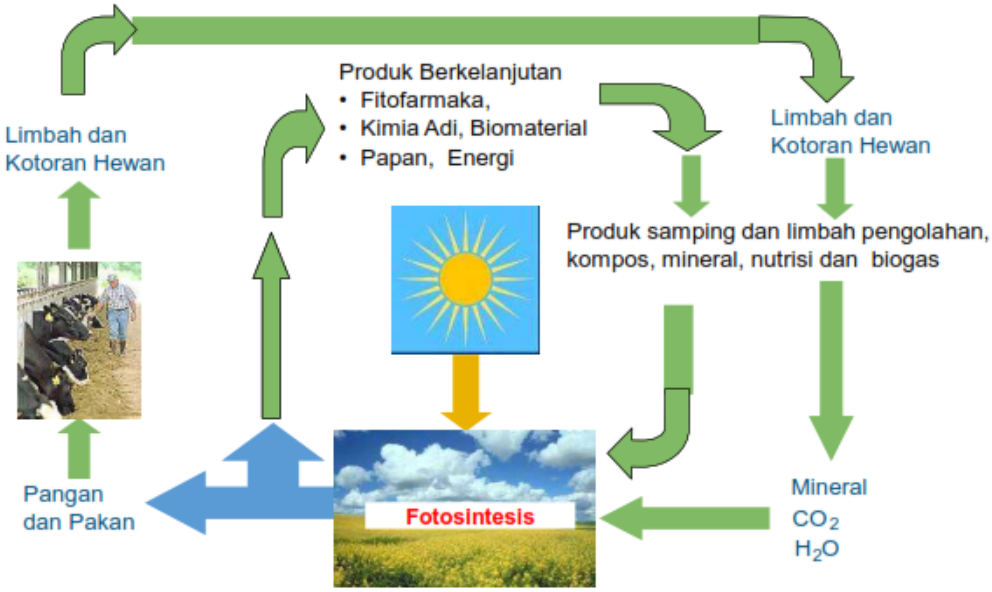


Gambar 1.5. Contoh tanaman singkong dan *mega flora tree* yang potensial dikembangkan pada pertanaman campuran (*polyculture*)

Dalam suatu areal ekosistem yang harmonis, akan ditemukan rangkaian hubungan simbiosis antara organisme yang terdapat didalamnya yang bersifat beragam (tidak hanya satu jenis simbiosis) dan seimbang (tidak ada ledakan populasi dari satu organisme tertentu). Dalam kondisi seperti ini, akan terjadi daur ulang zat ketika transformasi energi berlangsung, dikarenakan terdapat keseimbangan peran antara produser, consumer, dan decomposer pada ekosistem tersebut.

Konsep yang disampaikan bernama "Valorisasi Biomassa Sumber Daya Hayati dengan Penerapan Simbiosis Industrial dan Strategi *Biocascading*" (Gambar 1.6). Seperti telah disampaikan sebelumnya, bahwa ketika organisme dalam suatu ekosistem melakukan perannya, sebagai produsen, konsumen, dan dekomposer, terjadi aliran transformasi energi. Konsep simbiosis industrial pada hakikatnya meniru (*mimicking*) rangkaian hubungan simbiosis antara organisme: produser, konsumer, dan dekomposer pada suatu ekosistem alam. Pada simbiosis industrial yang disampaikan di sini menggarisbawahi transformasi keseluruhan materi dan energi secara optimal dimana materi dan energi berupa produk samping ataupun limbah dari suatu kegiatan industri pengolahan dimanfaatkan oleh industri pengolahan lainnya dan berlangsung secara simbiosis. Sebagai contoh seperti dapat dilihat pada gambar,

proses fotosintesis tumbuhan menggunakan tenaga surya dalam kegiatan pertanian yang menghasilkan biomassa, dapat dijadikan sebagai bahan pangan manusia dan pakan hewan oleh satu industri. Setelah konsumsi, akan muncul residu dari biomassa pangan maupun pakan, melalui ekskresi dan defekasi, yang menyebabkan timbulnya limbah. Selain untuk konsumsi secara langsung oleh manusia dan hewan sebagai pangan dan pakan, biomassa hasil fotosintesis juga dapat digunakan oleh industri lainnya sebagai bahan untuk menghasilkan bio-produk berkelanjutan seperti: fitofarmaka, kimiawi, biomaterial, komponen bahan bangunan atau perlengkapan rumah, maupun bio-energi. Semua proses ini, pada akhirnya juga akan menghasilkan produk samping serta limbah pengolahan.



Gambar 1.6 Skema valorisasi Sumber Daya Hayati

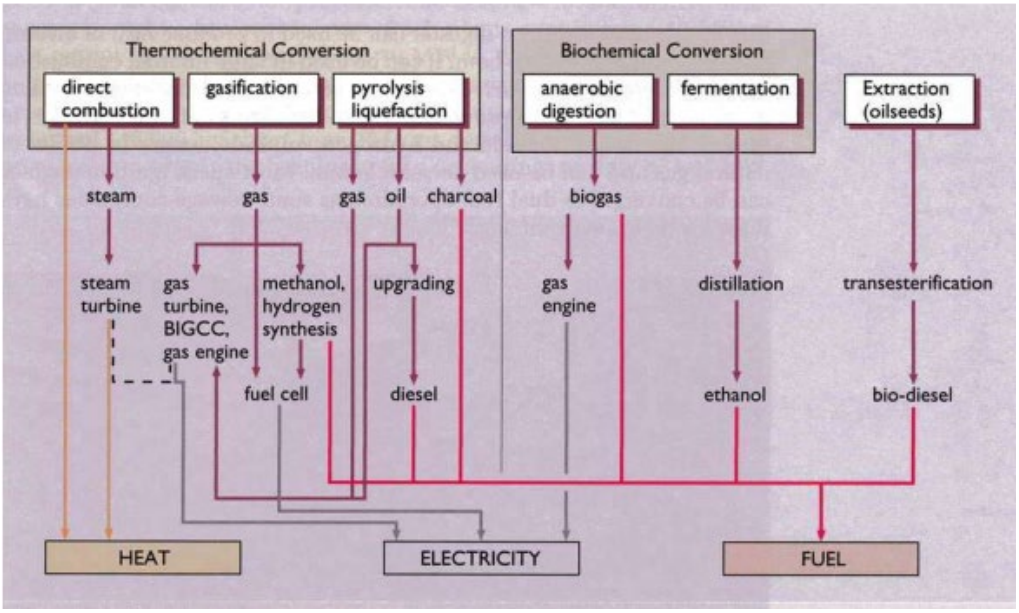
Limbah yang terbentuk dari konsumsi produk fotosintesis secara langsung maupun tidak langsung dapat diolah kembali oleh suatu industri menjadi produk turunan yang dapat dimanfaatkan, seperti kompos, mineral, nutrisi, dan biogas. Kompos dan mineral, bersamaan dengan air dan karbondioksida, kemudian akan kembali digunakan pada proses fotosintesis, menutup lingkaran aliran transformasi energi.

Perlu disampaikan di sini bahwa bahan bakar fosil yang tersedia saat ini adalah hasil proses fotosintesis jutaan tahun yang lalu. Proses fotosintesis tersebut berlangsung dalam rentang waktu jutaan tahun oleh organisme autotrof dan biomasa organisme tersebut kemudian mengalami proses konversi sejalan dengan proses yang terjadi di bumi secara alami sehingga terbentuk dan terakumulasi bahan bakar fosil: batu bara, minyak mentah dan gas alam fosil yang kita kenal saat ini. Proses pembentukan bahan bakar tersebut memerlukan waktu jutaan tahun, namun diperkirakan bahan bakar fosil akan habis dalam rentang waktu ratusan tahun. Pemakaian bahan fosil dalam rentang waktu yang pendek secara masif telah menyebabkan pemanasan global oleh kontribusi gas rumah kaca dari gas hasil pembakarannya.

Peran ITB dalam pengembangan simbiosis industrial adalah pada inovasi rangkaian teknologi pengolahan sebagai landasan membangun struktur industri yang dapat bekerjasama secara simbiosis untuk mengoptimalkan pemanfatan materi dan energi yang mengalir saat transformasi materi dan energi tersebut berlangsung di dalam siklus.

III. PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN KONVERSI (GASIFIKASI) BIOMASSA DI ITB

Teknologi konversi biomasa untuk memproduksi energi dalam bentuk panas, listrik, dan bahan bakar (*fuel*) dapat ditempuh melalui alur konversi termokimia (pembakaran langsung/*direct combustion*, gasifikasi, atau pirolisis) atau alur konversi biokimia (fermentasi atau proses anaerobic/*anaerobic digestion*), maupun melalui alur ekstraksi langsung (skema lengkap dapat dilhat pada Gambar 1.7).



Gambar 1.7 Teknologi konversi biomasa untuk menghasilkan bio-energi

Konversi biomassa melalui alur Gasifikasi pertama kali dikembangkan oleh ITB pada sekitar tahun 1976 dalam kerjasama Project JTA-9a yang melibatkan ITB dari Indonesia dan TH Delft dan University of Twente (serta belakang ikut bergabung University of Groningen) dari Belanda. Gasifikasi, yang dikembangkan oleh Prof. Robert Manurung, berfokus pada konversi biomasa sekam padi menjadi bahan bakar gas. Konversi biomasa melalui gasifikasi pada intinya adalah mengubah unsur karbon, hidrogen dan oksigen dalam molekul ligno-sellulosa sekam padi menjadi sintesis gas (*syngas*) yang terdiri dari gas yang mudah terbakar (*combustible gas*) berupa gas hidrogen (H_2), gas karbon monoksida (CO) dan gas methana (CH_4). Pada tahun 1985, reaktor gasifikasi biomasa yang dikembangkan dan dibuat di ITB mendapat perhatian dari Kementerian Perindustrian, Kementerian Kehutanan dan Kementerian Pertanian dan diundang sebagai peserta Pameran Industri tahun 1985 di Jakarta yang secara khusus di kunjungi Presiden Indonesia saat itu, Jenderal Soeharto. Unit gasifikasi yang dipamerkan adalah gasifikasi sekam padi stasioner (Gambar 1.8) dan gasifikasi biomasa kayu yang dirancang dapat bergerak berpindah-pindah (*mobile*), (Gambar 1.9). Saat itu, deskripsi unit gasifikasi disampaikan Prof. Suhadi Reksowardoyo, guru besar Teknik Kimia ITB, ketua Project JTA-9a Indonesia – Belanda.

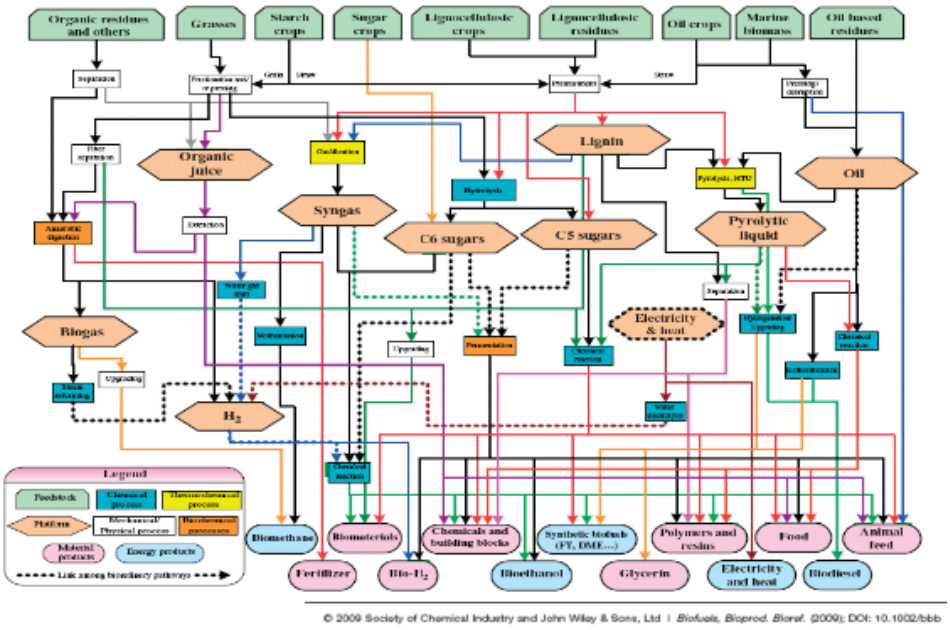
Gambar 1.8 Presiden Suharto Mengunjungi Prototipe Gasifikasi, 1985

Gambar 1.9 Presiden Suharto Mengunjungi Unit Gasifikasi Bergerak (*mobile*), 1985

Teknologi gasifikasi biomasa yang dikembangkan di ITB kemudian diadopsi berbagai institusi Kementerian dan BUMN untuk diimplementasikan pada berbagai daerah di Indonesia untuk berbagai kegiatan produktif. Rancangan integrasi unit konversi sekam dengan “gen-set” untuk pembangkit energi listrik di desa Jayi, Kecamatan Sukahaji, Kabupaten Majalengka, diuji coba pada tahun 1985 hingga tahun 1990.

IV. PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN LANJUT KONVERSI TERMOKIMIA DAN BIOKIMIA BIOMASA

Dalam perkembangannya, teknik konversi biomassa dari tanaman dan limbah biomassa menjadi semakin beragam, dan produk antara (*intermediate product*) dan produk akhir yang ingin dihasilkan juga tidak hanya berfokus pada energi tapi juga berbagai bahan kimiawi yang bernilai tambah tinggi seperti dapat dilihat pada Gambar 1.10. Dalam kaitannya dengan produksi energi dari biomassa, sangat penting memanfaatkan keseluruhan komponen bahan biomasa untuk menghasilkan berbagai produk bernilai tinggi, karena dengan konsep konversi seperti ini, yang dikenal dengan konsep *biorefinery*, dapat dilakukan subsidi silang, sehingga salah satu produk, misalnya energi yang dihasilkan dapat dijual lebih murah.



Gambar 1.10 Bioproduk dari Tanaman dan Limbah Biomasa

Dari berbagai produk antara dan produk akhir yang bisa dihasilkan dari biomasa, telah ada penelitian dan kajian yang mengidentifikasi secara rinci komponen struktur kimia yang bisa digunakan sebagai, "balok bangunan" (*building block*) untuk

membangun struktur kimia dari hampir semua bahan kimiawi yang saat ini diperoleh dari sumber fosil. Terdapat 12 komponen utama berbasis gula (*sugar-derived building blocks*) dalam proses konversi biomasa, yang dikelompokkan berdasarkan jumlah rantai karbon yang terdapat di dalamnya, yang dapat dilihat pada Tabel **1.2**.

Tabel 1.2 *The top 12 sugar-derived building blocks*

Building Blocks	
C3	Glycerol
	3-hydroxypropionic acid
C4	1,4 di-acids (succinic, fumaric, and malic acid)
	Aspartic acid
	3-hydroxybutyrolactone
C5	Levulinic acid
	Glutamic acid
	Itaconic acid
	Xylitol/Arabinitol
C6	Sorbitol
	Glucaric acid
	2,5-furan-di-carboxylic acid

T. Werpy, G. Petersen, Top Value Added Chemicals from Biomass

Secara umum, Pati (starch) merupakan sumber bahan baku utama yang sangat potensial dan menjanjikan untuk menghasilkan 12 senyawa kimia "*building blocks*" yang ditunjukkan pada Tabel 1.2. Dengan konteks pemikiran valorisasi dengan penerapan *platform biorefinery* melalui alur '*biological platform*' dan '*thermochemical platform*', kegiatan penelitian dan pengembangan yang telah dilakukan dalam kerjasama riset ITB dengan institusi internasional adalah:

i. '*Valorisation of Indonesian renewable resources and particularly Jatropha curcas using the biorefinery concept*' (2006-2010) yang mendapat dana dari The Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW) dalam program kerjasama riset ITB – University of Groningen (RuG) dan melibatkan Wageningen University (WUR) NL, dan BPPT.

ii. '*Breakthrough in Biofuels: Mobile Technology for Biodiesel Production from Indonesian Resources*' (2009 – 2014) yang mendapat dana dari Netherlands

Organization for Scientific Research (NWO), dalam program kerjasama riset ITB– RuG dan melibatkan WUR dan UGM.

Dalam lingkup riset nasional, valorisasi sumber daya hayati fokus pada peran penting kehadiran agen hayati yang direkayasa secara genetik untuk menghasilkan produk yang diinginkan pada topik (i), dan dalam perlakuan awal (*pretreatment*) untuk meningkatkan efisiensi biokonversi oleh lalat BSF pada topik (ii) serta integrasi kedua konversi biomasa untuk menghasilkan berbagai bioproduk.

i. Perancangan sistem produksi terintegrasi isobutanol atau ethanol, dan bioproduk lainnya dari Tanaman Singkong, (1 orang program S3, 1 orang program S2, serta 18 orang program S1).
ii. Peningkatan efisiensi sistem biokonversi limbah pertanian menggunakan *larva black soldier fly* (BSF, hermetia illucens) (Program S3: Dr. Ateng Supriatna).

Penelitian lanjut yang sedang berlangsung terkait konversi biomassa adalah peningkatan kandungan H_2 pada *syngas* hasil proses gasifikasi sehingga dimungkinkan mensitesa BIO-BBG dan BIO-BBM sebagai substitusi bahan bakar yang saat diperoleh dari sumber fosil: *LPG, gasoline* dan *diesel oil*.

V. PERAN AIR DALAM KONVERSI TERMOKIMIA DAN ELEKTROKIMIA

Uraian sebelumnya menyampaikan sumber utama energi untuk kehidupan di bumi adalah matahari. Tanaman dan semua organisme autotrof dapat memanen energi surya sebagai sumber energi bagi kehidupannya melalui proses fotosintesis dengan menggunakan air dan CO_2 sebagai medium transformasi energi elektromagenik dari sinar surya yang kemudian diakumulasi menjadi biomasa organisme tersebut. Dengan melakukan konversi biomasa menjadi berbagai bentuk energi dapat diperoleh sumber energi yang dapat diperbaharui (*renewable resources*). Melalui uraian alur konversi energi elektromagnetik sinar matahari menjadi biomassa dan kemudian biokonversi biomassa untuk menghasilkan berbagai bentuk energi,

disamping ada pemahaman bahwa matahari adalah sumber energi yang utama bagi keberkelanjutan kehidupan di bumi, diharapkan uraian tersebut dapat menjadi landasan dalam membahas dan memahami konversi energi lainnya yang terkait proses konversi termokimia dan elektrokimia dan khususnya bagaimana peran air dalam proses konversi tersebut.

Dalam membahas konversi energi, terdapat hukum termodinamika, hukum yang belum pernah terbantahkan oleh semua peristiwa yang berlangsung di alam dan dikenal sebagai *a law of nature*:

- Hukum Pertama adalah hukum kekekalan: energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya, tetapi dalam semua transformasinya energi adalah tidak diciptakan dan tidak dimusnahkan.
- Hukum Kedua adalah tentang kecenderungan materi dan energi berubah dari teratur (*order*) menjadi tidak teratur (*disorder*) dengan penyebaran dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah – secara spontan. Kecenderungan materi dan energi untuk berubah dari keberadaan "terkonsentrasi" menjadi "tersebar" – secara spontan, didefinisikan sebagai perubahan entropi yang berlangsung positif: $\Delta S \geq 0$, dan lebih lanjut diturunkan sebagai: $\Delta S \geq \Delta q/T$. Persamaan ini menyampaikan bahwa proses hanya akan berlangsung spontan kalau sistem menghasilkan energi: $\Delta q/T \geq 0$, atau bilamana energi bebas Gibbs $\Delta G \leq 0$.

Dalam proses menghasilkan hydrogen dari air, konsep entropi perlu diingat: bahwa air adalah *taker* dan bukan *giver.* Ikatan kimia dari air perlu diputus, dan untuk pemutusan ikatan kimia air dibutuhkan energi yang besar. Perhitungan energi pada tekanan tetap (enthalpi) dalam proses reaksi kimiawi, didasarkan atas keberlangsungan pengaturan ulang ikatan kimia antara atom pada reaktan dan atom pada produk yang menyebabkan perubahan internal energi dari reaksi tersebut. Dalam reaksi kimiawi, energi diperlukan untuk memutus ikatan kimiawi yang ada dari reaktan, dan energi dilepaskan saat pembentukan ikatan kimia dari produk. Perbedaan kandungan energi antara ikatan kimia pada produk dan ikatan kimia pada

reaktan disebut sebagai entalpi reaksi. Maka dari teori kebutuhan energi pada pemutusan ikatan kimia dari reaktan dan pelepasan energi pada pembentukan ikatan kimia dari produk, dikenali proses reaksi kimia yang bersifat eksotermik atau endotermik.

Kemudian, perlu juga dicatat bahwa nilai kalor (*standards heats of combustion*) dari oksigen (O_2), CO_2, H_2O, adalah 0 (nol) atau gas tersebut tidak memiliki nilai kalor. Suatu zat yang disebut bahan bakar adalah bila bahan tersebut dapat berekasi dengan oksigen yang dikenal dengan reaksi pembakaran (*combustion*) dan menghasilkan energi pembakaran (*heat of combustion*) dalam bentuk energi termal atau panas sehingga didapat nilai kalor reaksi: $\Delta q/T \geq 0$; maka reaksi tersebut bersifat eksotermik. Minuman adalah contoh yang terdiri dari air dan zat perasa seperti gula atau kafein. Gula atau kafein disamping memberi rasa juga memiliki kandungan energi (kalori), sehingga di dalam tubuh gula atau kafein dapat bereaksi melepas energi yang dikandungnya untuk kemudian dimanfaatkan oleh tubuh yang meminumnya. Kalau minuman hanya terdiri dari air dan tidak ada zat lain yang mengandung kalori didalamya, tidak akan ada kalori yang dipasok dari minuman tersebut pada tubuh peminumnya.

Oleh karena itu, ketika terdapat klaim dimana air menjadi sumber bahan bakar, perlu dicermati bahwa pasti terdapat bahan lain yang tercampur di dalamnya yang dijadikan bahan sumber energi reaksi pembakaran atau secara umum terdapat bahan sebagai sumber energi pada reaksi yang menghasilkan energi (Hukum Pertama Termodinamika). Dari beberapa kali fenomena yang muncul di Indonesia terkait klaim air sebagai bahan bakar, orang yang memberi klaim dan yang meyakininya umumnya tidak menyadari kehadiran zat yang mengandung kalori tersebut pada sistem proses yang digunakan. Kesadaran akan kehadiran zat yang mengadung kalori tersebut terbesit atau tidak sangat tergantung dari pemahaman seseorang tentang reaksi kimia dan atau hukum termodinamika. Terlepas tidak disadari atau disadari tapi sengaja menutupinya, kehadiran logam yang reaktif (dengan air) di dalam air akan melepaskan energi atau menghasilkan zat yang

mengadung energi seperti gas hidrogen (H_2) pada contoh reaksi kimia pada Gambar 1.11.

$$Zn(s) + 2\,HCl(aq) \rightarrow ZnCl_2(aq) + H_2(g)$$

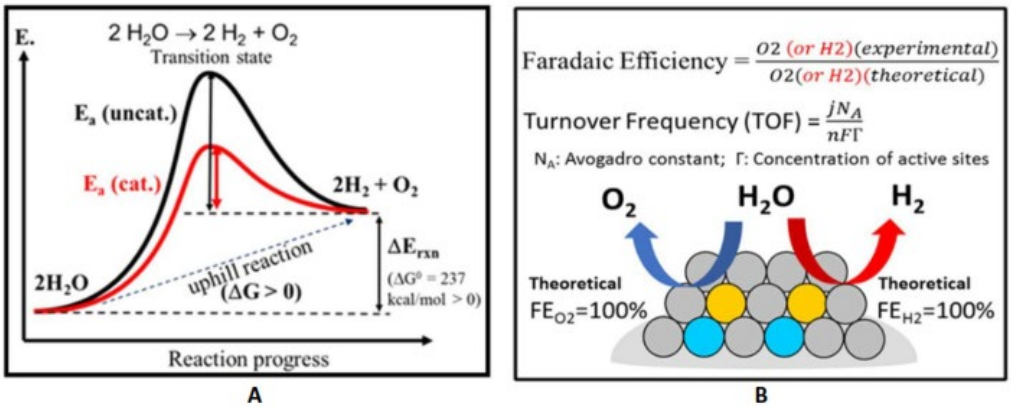
Bases also react with certain metals, like zinc or aluminum, to produce hydrogen gas

$$Zn(s) + 2\,NaOH(aq) + 2\,H_2O(l) \rightarrow Na_2Zn(OH)_4(aq) + H_2(g)$$

Gambar 1.11 Beberapa contoh reaksi metal dengan larutan asam dan basa

Senyawa logam yang terdapat bersama air atau bersinggungan dengan air pada sistem yang diklaim sebagai generator bahan bakar harus menjadi obyek yang perlu ditelisik, karena yang memberi klaim dan yang mempercayainya mungkin tidak menyadari secara pasti kehadiran dan peran penting dan efektivitas logam yang reaktif dengan air tersebut, karena mungkin bahan yang mengandung logam tersebut hanya dipandang sebagai wadah air atau elektroda, yang sebenarnya telah berfungsi ganda.

Metode lain untuk membangkitkan gas hydrogen melalui pemisahan atom air (*water splitting)* adalah dengan menggunakan listrik. Namun, perlu diingat bahwa penemuan *water splitting* menggunakan listrik sudah ada sejak lama, yakni sedari sekitar tahun 1800. Fenomena ini kemudian dijelaskan lebih lanjut oleh Faraday, melalui penjelasan peran katalis dalam menurunkan energi aktivasi dan mekanisme proses elektrokatalis (Gambar 1.12).



Wang et al. Nano Convergence (2021) 8:4

Gambar 1.12 A) Skema ilustrasi peran katalis untuk menurunkan energi aktivasi, B) skema ilustrasi ealuasi kinerja parameter elektrokatalis

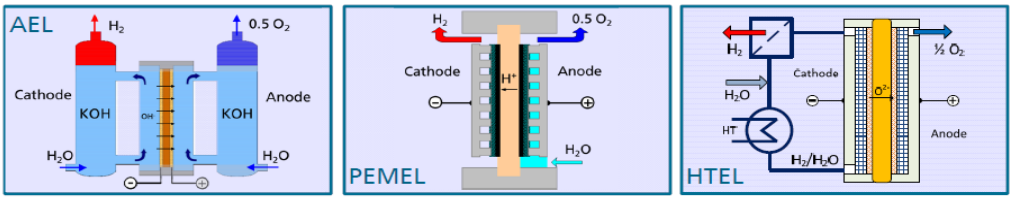
Dari analisis berikut ini, dapat diketahui secara konkrit berapa energi yang dibutuhkan untuk memutuskan ikatan atom hydrogen dengan oksigen yang terdapat pada air menggunakan listrik (Gambar 1.**13**). Energi yang dibutuhkan memutus ikatan atom hydrogen dengan oksigen pada H_2O adalah sama dengan energi pembentukan (*heat of formation*) H_2O, yaitu: 285.820 kJ/k.mol, atau 15,8 MJ/kg. Energi yang yang terkandung di dalam molekul hydrogen (H_2), adalah nilai energi pembakaran (*heat of combustion*) yang nilainya kebetulan sama yaitu 15,8 MJ/kg. Pertanyaan yang kemudian perlu diperhatikan adalah berapa efisiensi dari energi listrik yang diperlukan memutus ikatan H dan O pada H_2O, dan berapa banyak gas H_2 yang dihasilkan untuk setiap satuan energi istrik yang digunakan. Berdasarkan beberapa publikasi penelitian, diketahui data empiris bahwa efisiensi energi melalui konversi elektrolisis air pada saat ini berkisar antara 40-80%.

Anode Reaction:	$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$	- 0.40 V
Cathode Reaction:	$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$	- 0.83 V
	$2H_2O \rightarrow 2\,H_2 + O_2$	- 1,23 V

Gambar 1.13 Reaksi anoda dan katoda dalam elektrolisis

Proses elektrolisis dapat dilakukan dalam proses *acidic* dan *alkaline*, dan yang paling banyak dikembangkan hingga saat ini adalah dalam teknologi kondisi proses *alkaline*. Efisiensi dari proses yang telah berkembang bergantung pada eletrokatalis yang digunakan (seperti PtNi-Ni NA/CC, NiCo2Px, dll), serta kondisi temperatur dan elektrolit asam/basa yang digunakan. Dalam reaksi elektrolisis, pemisahan antara produk hydrogen (H_2) dan oksigen (O_2) sangat penting diperhatikan untuk menjaga efisiensi reaksi, serta juga agar tidak ada interaksi kedua molekul tersebut untuk menghindari terjadinya ledakan.

Technology	Temp. Range	Cathodic Reaction (HER)	Charge Carrier	Anodic Reaction (OER)
Alkaline electrolysis	40 - 90 °C	$2H_2O + 2e^- \Rightarrow H_2 + 2OH^-$	OH^-	$2OH^- \Rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$
Membrane electrolysis	20 - 100 °C	$2H^+ + 2e^- \Rightarrow H_2$	H^+	$H_2O \Rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$
High temp. electrolysis	700 - 1000 °C	$H_2O + 2e^- \Rightarrow H_2 + O^{2-}$	O^{2-}	$O^{2-} \Rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE - 2014

Gambar 1.14 Elektrolisis air: tiga pendekatan untuk produksi hidrogen dan oksigen

Perkembangan terkini dari elektrolisis air yang telah mencapai tahap komersial dan telah banyak digunakan adalah teknologi elektrolis: alkalin, membrane, dan reaksi pada temperatur tinggi (Gambar 1.14). Meskipun pengembangannya berlangsung pesat, teknologi elektrolis membran dan temperatur tinggi belum banyak digunakan pada skala besar dikarenakan biaya yang diperlukan yang relatif besar. Meski demikian, bahan bakar hidrogen merupakan bahan bakar alternatif yang paling menjanjikan untuk masa depan dikarenakan memiliki nilai kalori yang tinggi, dan satu-satunya produk pembakarannya adalah air, sehingga mengurangi beban polusi.

Selain itu, laju reaksi pembakaran H_2 yang sangat cepat, sangat tepat sebagai substitusi bahan bakar jet dari fosil yang digunakan saat ini.

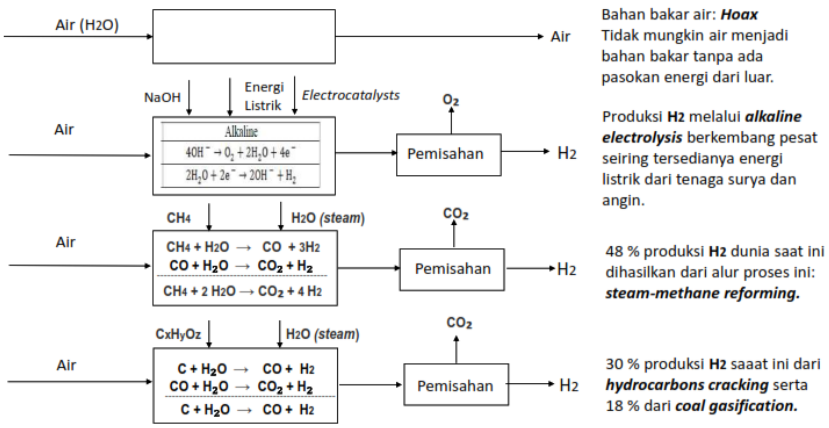
Gas hidrogen belum dapat digunakan sebagai bahan bakar domestik hingga saat ini, dengan alasan:

1. Hidrogen tidak mudah didapat dan biaya produksinya tinggi [4 US $/kg (2022), 1 US $/kg (2030)]
2. Tidak mudah disimpan.
3. Hidrogen sangat eksplosif.
4. Laju reaksi pembakaran Hidrogen sangat cepat dan sulit dikendalikan pada tingkat yang lambat.

Transportasi (*logistic*) hidrogen sangat sulit.

VI. KESIMPULAN

Secara umum produk bahan bakar yang dapat dibangkitkan dari air (H_2O) adalah H_2. Kewajaran dan efektivitas proses produksi H_2 dapat dikaji melalui bahan dan proses produksi H_2 tersebut:



Beberapa kesimpulan lain yang dapat dirangkum pada webinar ini adalah sebagai berikut:

- Sumber energi utama yang tersedia untuk kehidupan di bumi sejak miliar tahun yang lalu dan miliar tahun ke depan adalah energi matahari. Air

- berperan dalam **transformasi energi** pada proses dan pemanfaatan produk fotosintesis yang mutlak bagi keberlangsungan kehidupan.
- Air bukanlah bahan bakar melainkan produk dari hasil pembakaran. Peran air dalam produksi bahan bakar khususnya hidrogen adalah sebagai medium. Melalui pasokan energi lain, air dapat dikonversi menjadi bahan bakar, seperti hidrogen.
- Air digunakan sebagai medium atau reaktan untuk menghasilkan H_2 pada proses konversi termokimia gas alam (CH_4) dan gasifikasi batu bara atau gasifikasi biomassa tanaman.
- Konversi air menjadi hidrogen sudah dikenal sejak 200 tahun lalu melalui penemuan prinsip elektrolisis sekitar tahun 1800, dan prinsip *alkaline electrolyser* sekitar tahun 1900.
- Pengembangan elektrolisis air untuk menghasilkan hidrogen mendapat perhatian yang makin luas melalui integrasi energi terbarukan (tenaga surya dan angin) sebagai sumber energi untuk konversi air secara elektrolisis.
- Teknologi elektrolisis alkalin (*alkaline electrolysis*) sudah mencapai tingkat komersial untuk transformasi energi pada berbagai skala industrial hingga rentang kapasitas daya MW.
- ITB dapat menjadi pelopor menuntun penggunaan *alkaline ectrolysers* untuk berbagai kebutuhan dengan mengkaji: efisiensi, biaya, kestabilan dan keamanan.

Referensi:

- Claude Lamy and Pierre Millet, *A critical review on the definitions used to calculate the energy efficiency coefficients of water electrolysis cells working under near ambient temperature conditions*, Journal of Power Sources 447 (2020).
- Maximilian Schalenbach et.al, *A Perspective on Low-Temperature Water Electrolysis – Challenges in Alkaline and Acidic Technology*, Int. J. Electrochem. Sci., 13 (2018) 1173 – 1226.
- Shan Wang et al, *Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts, Nano Convergence (2021) 8:4.*
- Ivan Newen Aquigeh, *Multiphysical Models for Hydrogen Production Using NaOH and Stainless Steel Electrodes in Alkaline Electrolysis Cell,* Journal of Combustion, Volume 2021, Article ID 6673494.
- Chengxiang Xiang et.al, *Principles and implementations of electrolysis systems for water splitting,* The Royal Society of Chemistry 2016, Mater. Horiz., 2016, 3, 169—173.
- Tom Smolinka, *Water Electrolysis: Status and Potential for Development,* Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, April 03, 2014

2

INTENSIFIKASI PROSES PRODUKSI H_2 SEBAGAI ENERGI BERSIH MASA DEPAN

YOGI WIBISONO BUDHI

Guru Besar Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Proses Teknik Kimia

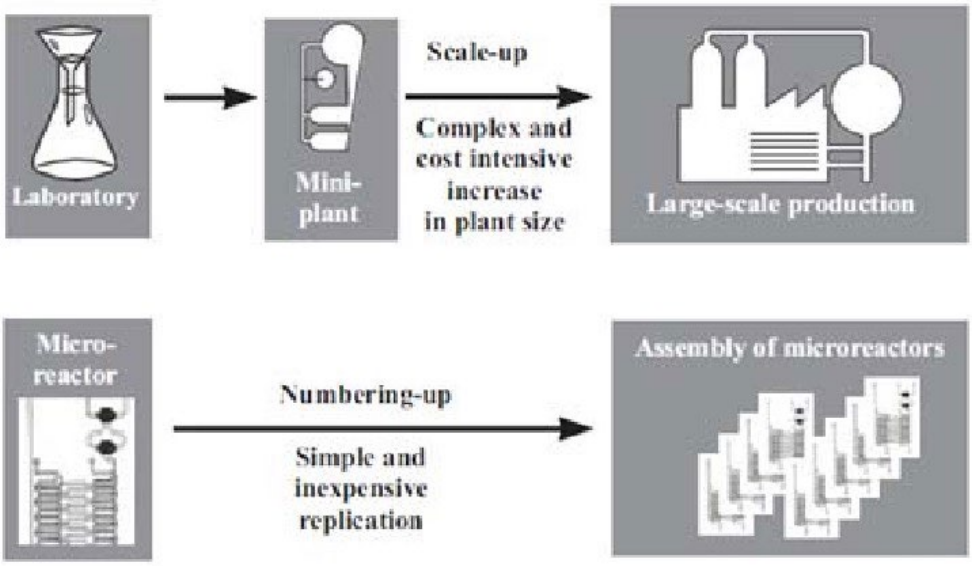
Fakultas Teknologi Industri ITB

- LATAR BELAKANG
- INTENSIFIKASI PROSES
- HIDROGEN SEBAGAI SUMBER ENERGI
- PENGEMBANGAN DI ITB
- KESIMPULAN

I. LATAR BELAKANG

Diskusi pada dokumen ini untuk mendukung tema telaah air sebagai sumber bahan bakar berfokus pada intensifikasi proses produksi hidrogen sebagai energi bersih di masa depan. Pada diskusi yang telah dilakukan oleh narasumber sebelumnya, Prof. Robert Manurung, telah dibahas kemungkinan pemanfaatan air yang sempat diberitakan sebagai sumber energi dan bisa digunakan untuk menggerakkan kendaraan. Berdasarkan tinjauan ilmiah keilmuan Rekayasa Hayati, telah disampaikan secara jelas tinjauan ilmiah bahwa penggunaan air dan hidrogen sebagai sumber bahan bakar belum memungkinkan untuk saat ini. Oleh karena itu, sesi diskusi kali ini akan berfokus pada pemetaan potensi jalur pengembangan pemanfaatan hidrogen di masa mendatang.

Sebelum dilakukan pemetaan bagaimana sebenarnya energi yang berbasis pada hidrogen dikembangkan, diekstrasi, disintesis, dan digunakan dalam berbagai aktivitas, perlu diketahui terlebih dahulu sebuah konsep bernama intensifikasi proses, sebuah paradigma baru dalam proses kimia, yang dikembangkan oleh Prof. Stankiewicz dan Prof. Moulijn. Konsep intensifikasi proses berfokus pada pengembangan peralatan serta metode proses dan sistem pemroses yang bersifat inovatif dan kreatif agar dapat dihasilkan kinerja yang optimal dan unggul. Dengan demikian, hasil dari pengembangan tersebut apabila dibandingkan dengan teknologi yang tradisional akan membawa perbaikan yang signifikan dan substansial. Lebih dari itu, kinerja proses yang dihasilkan dapat meningkat hingga ribuan kali.

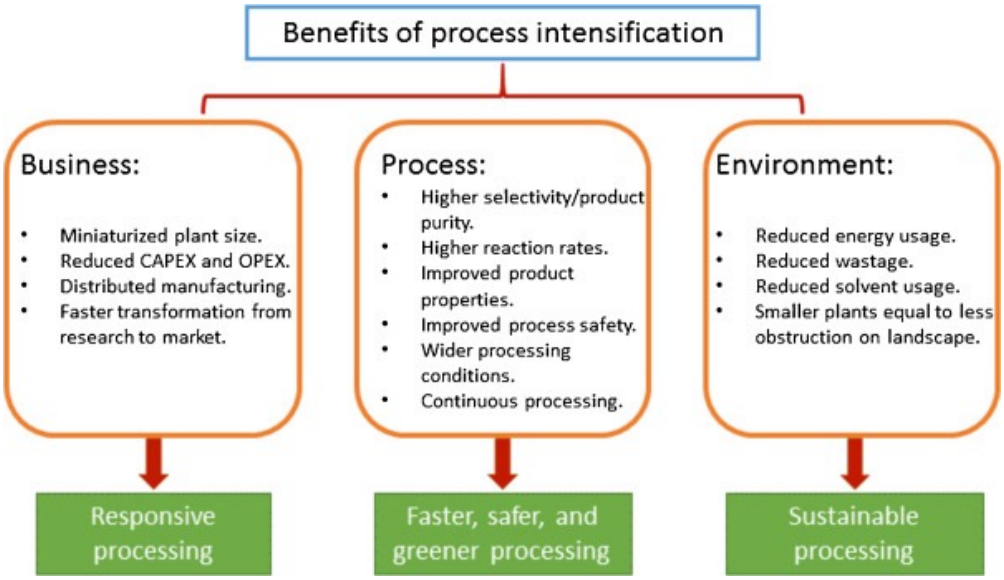


Gambar 2.1 Skema perubahan paradigma pengembangan teknologi

Di dalam perkembangan teknologi terkini muncul berbagai kreasi dan inovasi yang diciptakan dengan harapan agar teknologi yang dikembangkan tidak akan punah, karena harus mampu berkompetisi dan mencapai satu kinerja yang lebih baik sehingga dalam berbagai stigma atau paradigma yang dikembangkan oleh peneliti yang berkaitan dengan teknologi terkini, terjadi pergeseran nilai, seperti dapat dilihat pada Gambar 2.1. Sebagai contoh, pengembangan teknologi yang pada awalnya menggunakan pendekatan *scale up*, bergeser menjadi menggunakan pendekatan *scale out*. Hal ini berarti bahwa pengembangan proses dari skala laboratorium hingga skala komersial yang pada awalnya membutuhkan waktu yang sangat lama, maka dengan paradigma *scale out* atau *numbering up*, akan membutuhkan waktu komersialisasi yang lebih singkat. Selain itu, pendekatan yang berbasis pada *microscale technology* ini dapat meningkatkan produktivitas hingga ribuan kali lebih besar.

II. INTENSIFIKASI PROSES

Pada Gambar 2.15, dapat dilihat contoh dari pengembangan teknologi yang dikenal di dalam intensifikasi proses. Hal ini penting untuk disampaikan, bahwa di masa depan, berbagai pengembangan teknologi dalam bentuk apapun akan dilihat dari *profit*/keuntungan yang dapat dihasilkan dan dengan pertimbangan perubahan iklim, maka juga perlu diperhatikan sisi *sustainability*nya.



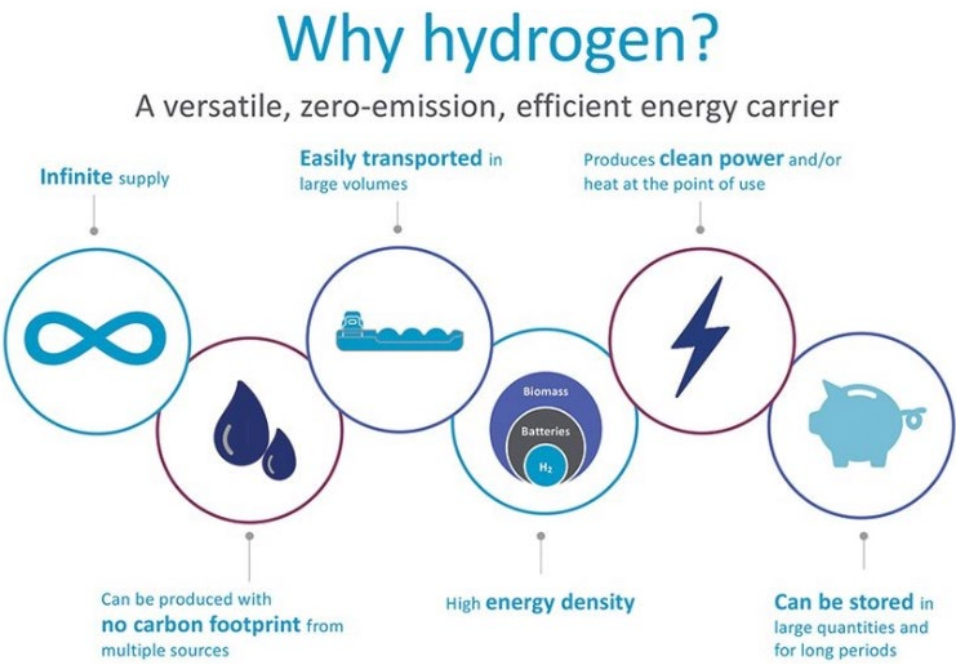
Gambar 2.15 Keuntungan intensifikasi proses

Beberapa keuntungan yang bisa dilihat sebagai contoh dapat dilihat pada Gambar 2.15. Salah satu keuntungan dapat dilihat dari sisi bisnis dan proses: 1) dengan intensifikasi proses, satu ukuran manufaktur dari industri bisa dibuat jauh kebih kecil (miniaturisasi), 2) dengan skala manufaktur yang mengecil, maka CAPEX maupun OPEX juga dapat direduksi, 3) apabila ditinjau dari sisi proses, maka dapat meningkatkan konversi selektivitas, produktivitas, dan juga meningkatkan laju reaksi yang tinggi. Kemudian, apabila ditinjau dari aspek lingkungan, intensifikasi proses juga dapat digunakan untuk mereduksi limbah yang dihasilkan serta menurunkan kebutuhan energi. Hal ini dikarenakan pada intesifikasi proses akan dihasilkan suatu proses yang bisa menurunkan pengaruh hambatan perpindahan massa maupun

hambatan perpindahan panas secara signifikan. Aspek lain yang berkaitan dengan keselamatan dan juga responsifitas yang sangat tinggi juga menjadi kelebihan dari intesifikasi proses.

III. HIDROGEN SEBAGAI SUMBER ENERGI

Pembahasan akan dilihat dari aspek sisi pengembangan peralatan dan metode proses serta pengembangan material. Belakangan ini, telah banyak material-material baru dan tingkat lanjut (*advance*) sudah diteliti sangat pesat sehingga integrasi dari pengembangan peralatan, metode, dan material yang dilakukan secara intensif, inovatif, dan kreatif menjadi kunci yang bisa digunakan untuk berkompetisi dan mencegah kepunahan.



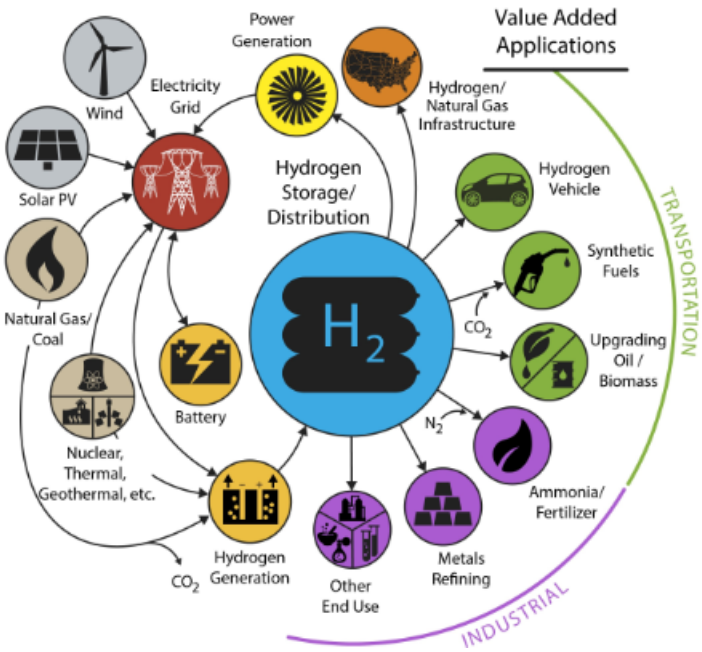
Gambar 2.16 Skema alasan pengembangan hidrogen

Beberapa keuntungan dalam penggunaan hidrogen dapat dilihat pada Gambar 2.16. Hidrogen merupakan salah satu energi bersih di masa depan yang dapat diproduksi secara potensial, terutama dari air maupun biomassa. Oksidasi hidrogen dapat

menghasilkan energi dengan tingkat emisi nol, dan juga memiliki efisiensi yang cukup baik. Selain itu, pada proses pembakaran, hasil dari oksidasi hidrogen akan menghasilkan air sehingga nanti akan dihasilkan satu produk yang bersih dan tidak mempunyai senyawa dari unsur karbon. Dari aspek distribusi, hidrogen juga bisa ditransportasikan dengan sangat baik melalui. sistem perpipaan, transportasi darat, maupun transportasi laut. Dari aspek sifat komponen atau *properties*, hidrogen juga memiliki densitas energi yang tinggi. Dengan demikian, secara keramahan lingkungan, hidrogen memiliki nilai yang jauh lebih tinggi daripada sumber sumber energi konvensional yang berasal dari fosil dan berbasis karbon. Dilihat dari jumlah energi per kilogram, kandungan energi yang tersimpan di dalam hidrogen juga sangat tinggi dan dapat disimpan dalam waktu yang lama.

III.1 NILAI TAMBAH PENGGUNAAN HIDROGEN

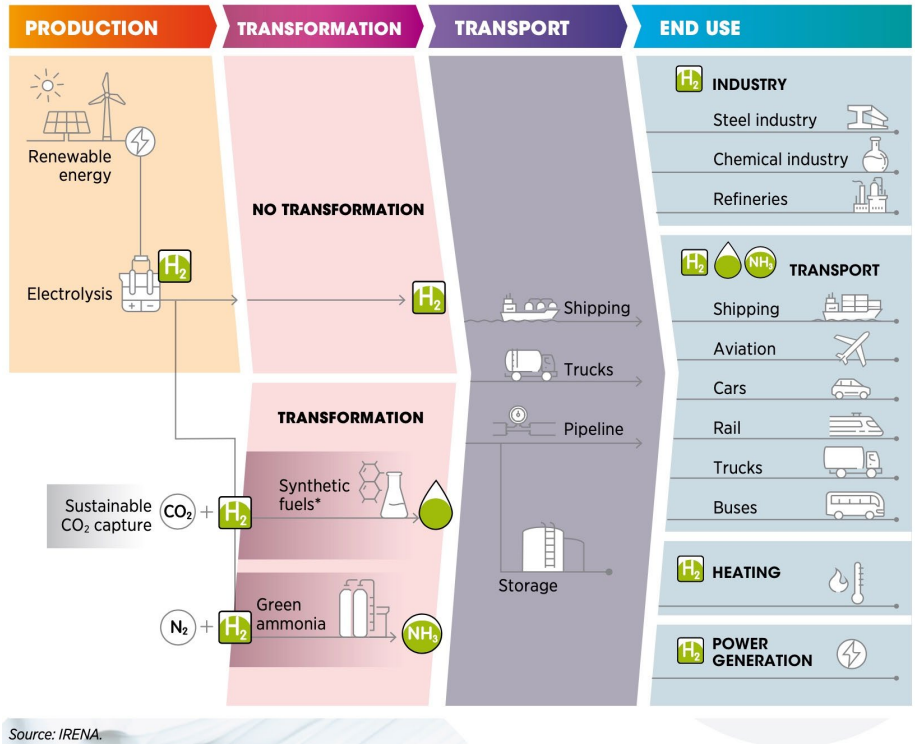
Pada saat mengharapkan hidrogen sebagai bahan bakar untuk kebutuhan transportasi atau untuk kebutuhan sintesis dari suatu bahan bakar yang lain, maka perlu diperhatikan sumber bahan ekstraksi hidrogen, apakah nanti produksi hidrogen dari gas alam, batubara, atau biomassa. Perlu dikaji pula proses produksi yang akan digunakan untuk mempertimbangkan energi yang diperlukan, semisal dengan steam reforming, gasifikasi, dry reforming, ataukah metode lainnya seperti proses elektrolisis air. Oleh narasumber diskusi sebelumnya juga telah disampaikan bahwa energi yang dibutuhkan untuk memecah molekul hidrogen dan oksigen dari air sangat besar, sehingga juga perlu mempertimbangkan aspek kebutuhan energi dalam proses produksinya. Penyediaan hidrogen dari air melalui elektrolisis air akan menjadi menarik secara komersial jika sumber energi untuk memecah molekul air menjadi hidrogen dan oksigen berasal dari angin, sinar matahari, gelombang air laut, nuklir, dan geotermal. Hidrogen yang dihasilkan melalui skema proses tersebut dikenal sebagai jalur hidrogen biru (blue hydrogen).



Gambar 2.17 Nilai tambah penggunaan hidrogen

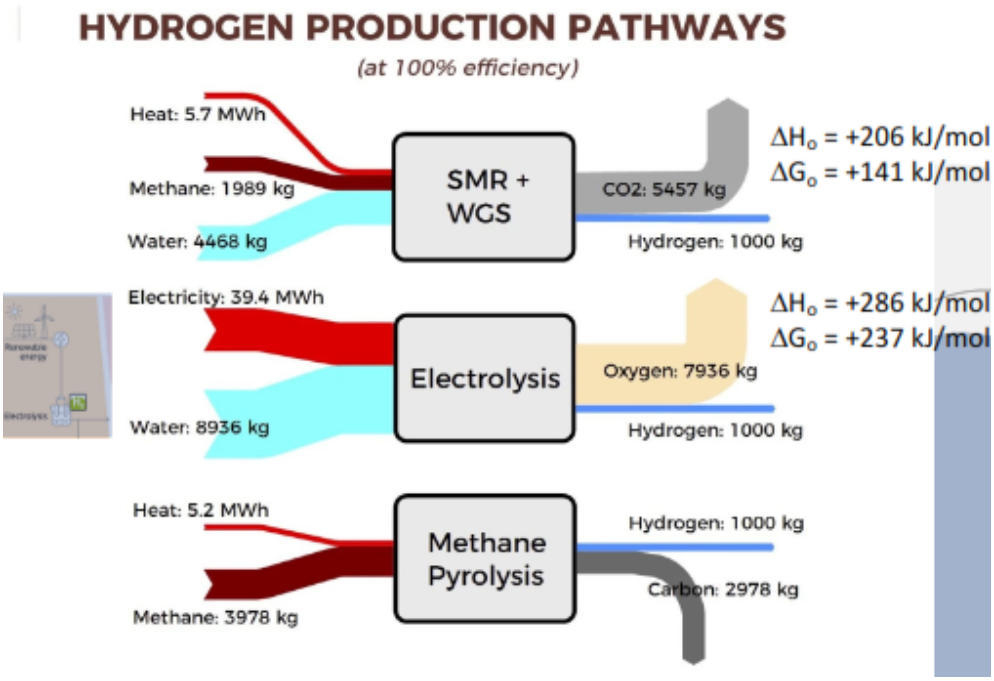
Apabila dilihat dari ketersediaan sumber energi lainnya, seperti dengan menggunakan solar PV, angin, atau dari sumber cahaya matahari yang lain, maka dapat dilihat dari sumber-sumber energi yang bersifat terbarukan tersebut, apakah dapat diproduksi terlebih dahulu menjadi bentuk energi listrik, kemudian dari listrik yang terbentuk disimpan dalam bentuk baterai atau bahkan digunakan langsung untuk membangkitkan hidrogen dengan elektrolisis air. Proses ini dapat menjadi alternatif sumber listrik yang digunakan untuk memproduksi hidrogen untuk berbagai kepentingan, baik dalam konteks industri maupun transportasi.

III.2 HIDROGEN DALAM PEMBERDAYAAN ENERGI



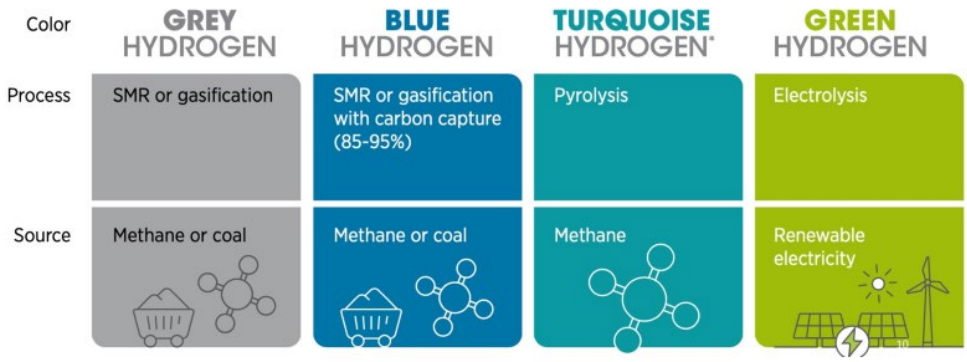
Gambar 2.18 Skema proses produksi dan penggunaan hidrogen dari hulu ke hilir

Berdasarkan Gambar 2.18, dapat dilihat bahwa sumber energi produksi dan transformasi material produksi dapat dibuat agar lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (*sustainable*). Kemudian, hasil produksi dapat diarahkan untuk difokuskan pada penggunaan kebutuhan industri dan transportasi, dan dapat pula menjadi bahan kimia tambahan untuk memproduksi bahan kimia lainnya. Apabila dikombinasikan dengan teknologi carbon capture, maka CO_2 dapat direaksikan dengan hidrogen melalu reaksi metanasi untuk menghasilkan bahan bakar sintetik. Selain itu, apabila direaksikan dengan nitrogen, maka dapat dihasilkan *green-ammonia* yang kemudian bisa digunakan baik untuk bahan baku di dalam produksi pupuk maupun sebagai senyawa yang bisa menyimpan hidrogen. Dari titik ini, hasil produksi dapat disimpan maupun dipindahkan untuk berbagai kepentingan atau kebutuhan lain pada *end use.*



Gambar 2.19 Skema proses produksi hidrogen

Berdasarkan Gambar 2.19 diketahui bahwa energi yang diperlukan untuk memecah molekul hidrogen sangat besar. Dapat dibandingkan energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 ton hidrogen antara proses steam reforming-water gas shift (SMR-WGS) yang mengkonversikan gas alam menjadi hidrogen, proses elektrolisis air untuk memecah molekul air, dan proses pirolisis metana. Dapat dianalisis bahwa kebutuhan energi untuk proses SMR-WGS sebesar 5,7 MWh, sedangkan untuk memecah hidrogen dari air membutuhkan 39 MWh, atau kurang lebih sekitar 7 kali lebih besar, sehingga secara ekonomi proses ini sangat tidak memungkinkan, kecuali terdapat sumber energi yang melimpah untuk melakukan proses ini (tersedia di alam secara gratis). Selain itu, saat ini apabila ditelaah harga dari bahan baku yang lain (gas alam dan batu bara) lebih rendah dibandingkan dengan kebutuhan energi untuk memecah air dengan menggunakan elektrolisis, maka tentunya saat ini produksi hidrogen menjadi satu skema yang sangat tidak ekonomis.



Gambar 2.20 Spektrum warna H_2

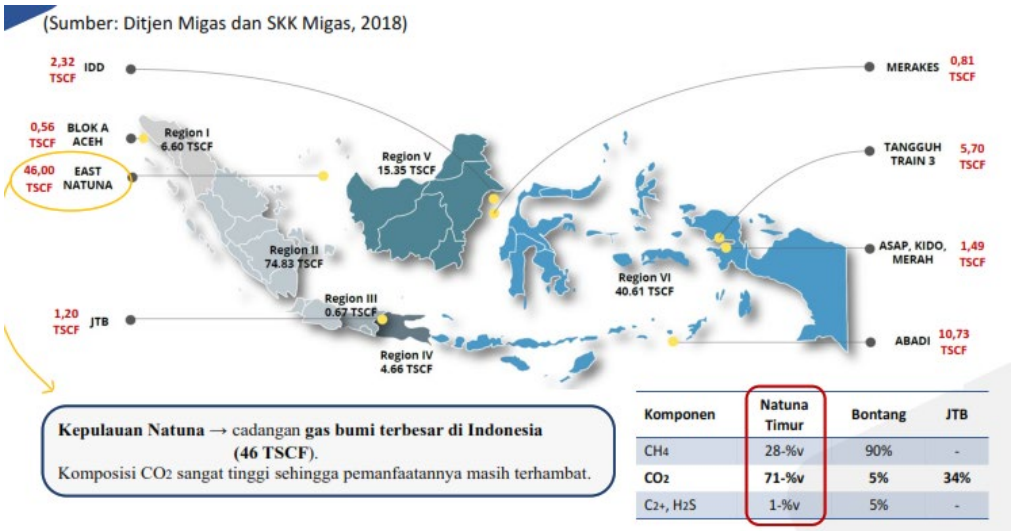
Dalam melakukan penilaian dari hal ekonomi dan keberlanjutan, jenis produksi hidrogen dapat dikelompokkan dalam spektrum warna berdasarkan proses yang digunakan serta bahan yang dijadikan sumber hidrogen. Visualisasii spektrum hidrogen dapat dilihat pada Gambar 2.20. Kelompok pertama adalah yang dikenal dengan *grey hydrogen*, yaitu proses yang menghasilkan hidrogen dengan menggunakan bahan baku dari gas alam atau dari batubara. Pada proses ini umumnya digunakan *steam reforming* atau gasifikasi untuk menghasilkan hidrogen dan juga menghasilkan CO_2. Kelompok kedua adalah *blue hydrogen,* yakni proses menggunakan bahan baku gas alam atau dari batubara, tetapi kemudian CO_2 yang dihasilkan ditangkap menggunakan teknologi carbon capture, untuk disimpan maupun digunakan. Kelompok ketiga adalah *turquoise hydrogen* (hidrogen toska biru), yakni proses yang menggunakan konversi dari metana dengan cara pirolisis untuk menghasilkan hidrogen dan karbon padat seperti pyrolysis dan bukan dalam fasa gas CO_2. Kelompok terakhir adalah *green hydrogen*, yakni hydrogen yang dihasilkan dari proses elektrolisis air yang berbasis pada sumber energi yang terbarukan, seperti dari angin atau dari proses photovoltaics.

Pada kondisi saat ini, sumber dari gas alam mayoritas memiliki CO_2 yang rendah, dan juga dapat ditemukan yang bernilai tinggi, dan apabila dibandingkan dengan batubara, maka tentunya kandungan karbon batubara lebih besar, dan menghasilkan CO_2 yang jauh lebih besar. Sehingga, apabila pengembangan hidrogen dilanjutkan

dengan eksploitasi sumber gas alam atau batubara, maka hasilnya proses produksi akan masuk ke dalam kelompok *grey hydrogen*. Namun apabila proses tersebut dapat disertai dengan pengembangan teknologi carbon capture, maka dapat ditingkatkan menjadi *blue hydrogen*.

Pada perkembangan saat ini, tidak banyak industri yang menggunakan CO_2 dalam proses produksi. Beberapa industri pupuk berbasis gas alam atau batubara, CO_2 yang dihasilkan umumnya direaksikan dengan amoniak untuk menghasilkan urea. Namun ada juga pabrik amoniak yang memang hanya menghasilkan amoniak, sehingga CO_2 yang dihasilkan akan dilepas ke udara dan polusi CO_2 dalam jumlah yang sangat besar.

III.3 ANALISA KELAYAKAN PENGEMBANGAN *GREY* DAN *BLUE HYDROGEN* DI INDONESIA

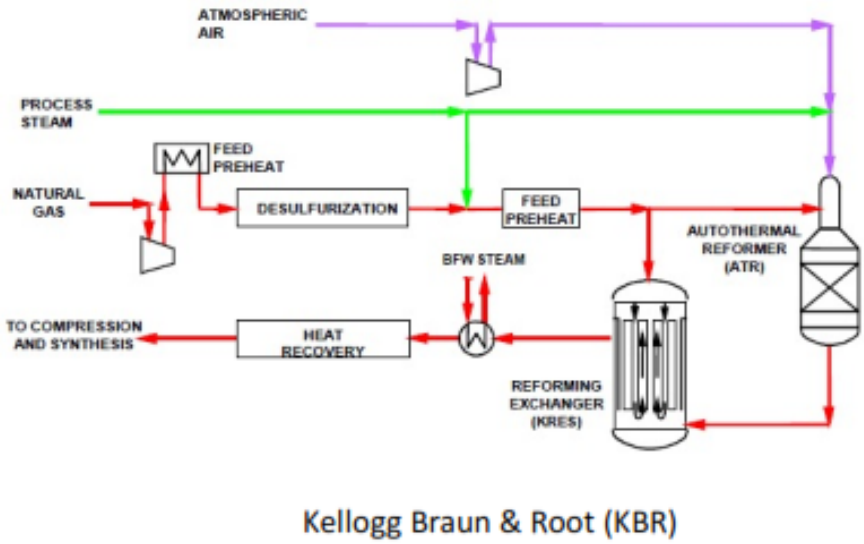


Komponen	Natuna Timur	Bontang	JTB
CH_4	28-%v	90%	-
CO_2	**71-%v**	**5%**	**34%**
C_{2+}, H_2S	1-%v	5%	-

Gambar 2.21 Cadangan gas alam di Indonesia

Indonesia memiliki dua cadangan gas yang besar, yakni di Kepulauan Natuna dan di daerah Aceh, mencapai 46 triliun standard ft^3, tetapi kandungan dari CO_2 sangat tinggi (sekitar 70%). Apabila akan digunakan, maka perlu direncanakan pula pemanfaatan kandungan CO_2 hasil dari produksi. Indonesia telah menggunakan

teknologi *steam reforming* lebih dari 50 tahun dan banyak industri yang menggunakan gas alam sebagai bahan bakar. Namun, beberapa pabrik kimia justru mengalihkan bahan bakar menjadi batubara, dan seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses pembakaran baik gas alam maupun batubara akan menghasilkan emisi CO_2, sebagai contoh pada pabrik amoniak, di mana amoniak yang dihasilkan kemudian digunakan untuk produksi urea. Praktik ini akan menggunakan kurang lebih 40% dari gas alam yang dimasukkan ke dalam pabrik sebagai bahan bakar, sedangkan sisa 60% yang akan digunakan sebagai bahan baku dalam proses sintesis amoniak atau metanol.



Gambar 2.22 Skema proses Kellog Braun & Root

Baru sekitar tahun 1990, Kellogg melalui teknologi *reforming exchanger system* mulai mengembangkan satu teknologi *boiler* yang tidak menggunakan bahan bakar dari gas alam, melainkan menggunakan panas yang dihasilkan dari proses pembakaran di *autothermal reformer* atau hampir setara dengan *second periodic form*. Panas yang dihasilkan melalui satu desain atau integrasi panas yang sangat baik dapat digunakan untuk mereformasi gas alam menghasilkan gas sintesis yang mengandung hidrogen dan CO. Kellogg menyatakan dapat mereduksi emisi CO_2 dalam jumlah yang sangat besar. Dengan mempertimbangkan bahwa cadangan gas alam di Indonesia sudah

mulai menipis, maka teknologi yang berikutnya yang harus kita kembangkan adalah teknologi yang berbasis pada *dry reforming of methane* (reformasi kering gas alam). Teknologi komersil yang menggunakan proses ini belum ada yang berkembang di dunia, selain di Jerman, yang terkendala proses pembentukan karbon yang besar yang dapat menutupi permukaan katalis dan menyumbat aliran gas di dalam reaktor.

IV. PENGEMBANGAN DI ITB

Pengembangan teknologi di ITB pada konteks ini mulai berfokus pada material nano-katalis yang dapat memberikan produktivitas hydrogen 2,5 kali lebih tinggi dibandingkan dengan katalis konvensional. Pada Tabel 2.3, dapat dilihat perbandingan untuk teknologi reformasi, antara lain *dry reforming of methane*, *steam*, dan *partial oxidation*.

Tabel 2.3 Perbandingan metode teknologi reformasi

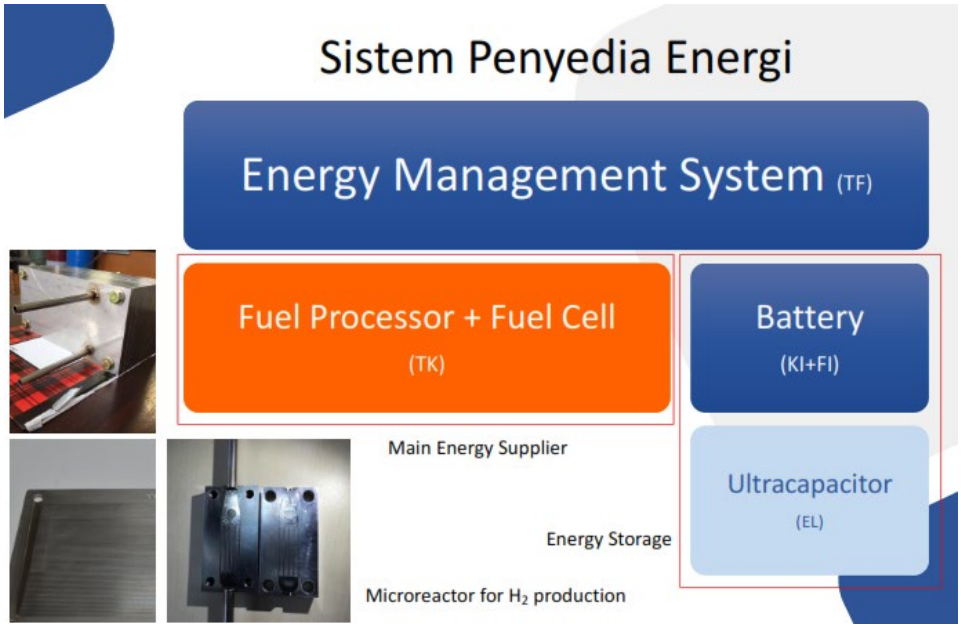
Tipe reformasi metana	*Dry reforming*	*Steam reforming*	*Partial oxidation*
Kondisi operasi	1 atm, 650-850°C $CH_4 : CO_2 = 1 : 1$	3-5 atm, 700-1.000°C $CH_4 : H_2O = 1:1$	100 atm, 950-1.100°C $CH_4 : O_2 = 2 : 1$
Rasio H_2/CO	1 : 1	3 : 1	2 : 1
Keuntungan	– Utilisasi 2 gas rumah kaca – Produksi sumber energi bersih dan bahan kimia lain	– Konsentrasi produk H_2 lebih tinggi – Efisiensi operasi tinggi	– Tingkat toleran terhadap sulfur tinggi – Waktu kontak (reaksi) singkat
Kerugian	– Harga katalis logam mulia yang tinggi – Katalis tersintering pada temperatur tinggi	– Memerlukan volume yang besar untuk emisi gas dari pembangkit uap – Biaya tambahan dari alat eksternal untuk penukar panas	– Biaya tinggi untuk kebutuhan O_2 murni – Kemungkinan ledakan dari campuran CH_4/O_2 – Kemungkinan terjadinya hotspot pada katalis
Pabrik	*Linde Pilot Dry Reformer* di Pullach dekat Munich	– *Topsoe Package H_2 Plants*, USA – *Air Liquid Steam CH_4 Reformer*, Jerman	*Pearl GTL, Ras Laffan Industrial City*, Ad-Dahirah, Qatar

(Sumber: Abdulrasheed dkk., 2019)

Salah satu topik yang menarik untuk didiskusikan terkait kendaraan listrik adalah sistem baterai. Pertama, sistim baterai telah dikembangkan oleh Tesla, terutama teknologi *super charging* yang dapat mencatu daya listrik dengan hanya

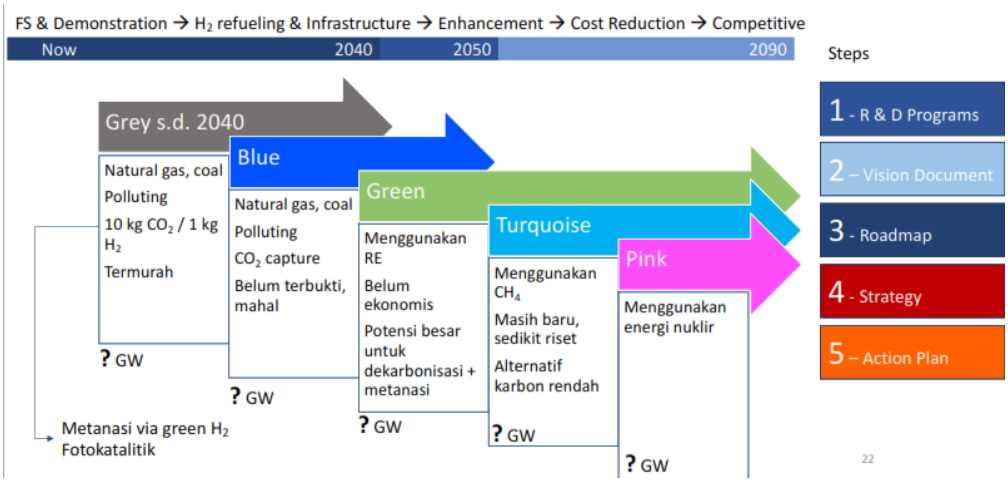
membutuhkan 76 menit, namun belum praktis dari aspek jarak yang ditempuh, dan masih sangat terbatas. Kedua, teknologi baterai berbasis hidrogen memiliki risiko yang berkaitan dengan keamanan dan juga hilangnya energi yang diperlukan untuk mengkompresi hidrogen sampai dengan tekanan di atas 600 bar. Terakhir, adalah teknologi yang menggunakan metanol cair agar dapat disimpan pada tekanan atmosfer, kemudian dikonversikan dengan menggunakan skema *secondary methanol liquid* dan direformasi untuk menghasilkan gas hidrogen yang kemudian bisa dipisahkan dan digunakan untuk umpan di dalam sel tunam (bahan bakar) untuk menghasilkan listrik. Konsep yang juga dapat dikembangkan di masa depan adalah bagaimana kemudian proses pemisahan hidrogen tingkat lanjut menggunakan membran palladium silver.

ITB juga telah mengembangkan konsep mobil listrik menggunakan metanol cair yang dikonversikan menjadi hidrogen dan digunakan pada *fuel cell* untuk menghasilkan listrik. Penelitian ini dikembangkan di ITB melalui project Molina dan dapat menghasilkan hidrogen dalam jumlah yang sangat besar dibandingkan teknologi katalis yang sebelumnya. Visualisasi konsep ini dapat dilihat pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Sistem penyedia energi yang dikembangkan ITB

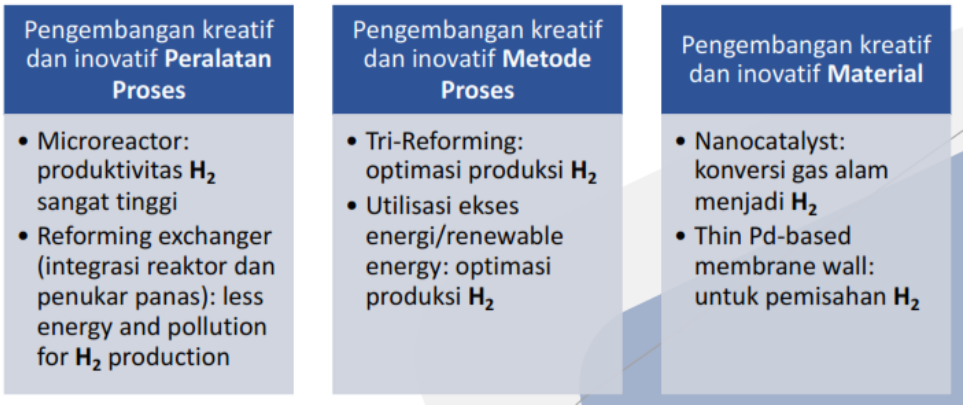
Peta jalan yang dikembangkan saat ini belum lengkap terkait pengembangan hidrogen di masa depan. Hal ini terutama dikarenakan fakta bahwa sejumlah bahan baku yang saat ini digunakan, masih dapat dieksploitasi untuk menghasilkan hidrogen dengan kategori *grey* dan *blue*, maka pengembangan selanjutnya adalah untuk mengusahakan *green hydrogen*.



Gambar 2.24 Peta jalan produksi H_2

V. KESIMPULAN

Pengembangan intensifikasi proses dapat berbasis pada 3 hal: pertama adalah bagaimana pengembangan kreatif dari peralatan proses yang merujuk pada pengembangan teknologi seperti *microreactor* maupun teknologi integrasi *reforming exchanger system*. Kedua adalah pengembangan proses, berkaitan dengan metode proses tri-reforming untuk menghasilkan hidrogen maupun penggunaan dari ekses energinya. Terakhir adalah pengembangan material yang berkaitan dengan nano katalis maupun proses yang digunakan untuk pemisahan hidrogen menggunakan palladium silver.



Gambar 25 Peran intensifikasi proses

3

PEMANFAATAN HIDROGEN UNTUK BAHAN BAKAR KENDARAAN BERMOTOR

TRI YUSWIDJAJANTO ZAENURI

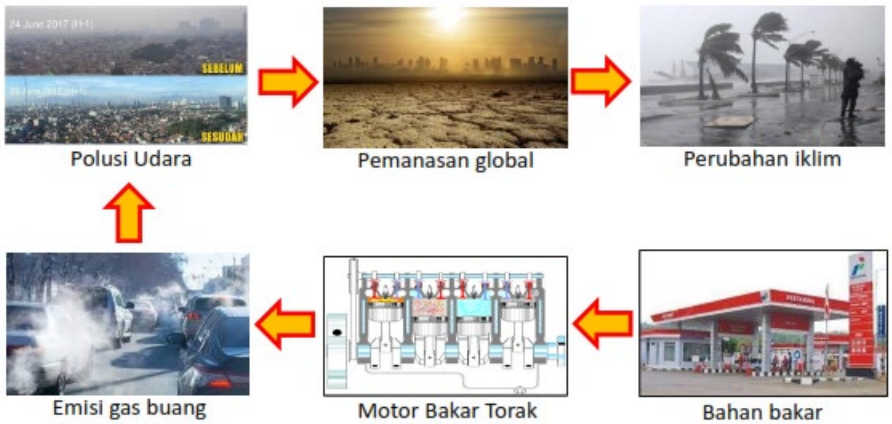
Dosen Kelompok Keahlian Konversi Energi

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB

- LATAR BELAKANG
- INTENSIFIKASI PROSES
- HIDROGEN SEBAGAI SUMBER ENERGI
- PENGEMBANGAN DI ITB
- KESIMPULAN

I. LATAR BELAKANG

Pemberitaan mengenai penggunaan air sebagai bahan bakar bukanlah hal baru. Namun, perlu dilakukan diskusi mengenai kemungkinan penggunaan air untuk sepeda motor seperti yang diberitakan di banyak media sosial, dan dikupas secara ilmiah.



Gambar 3.26 Skema kausalitas penggunaan bahan bakar kendaraan terhadap iklim

Pada diskusi ini, akan dibahas mengenai alasan mengapa air dapat digunakan sebagai salah satu alternatif sumber bahan bakar, secara skematis dapat dilihat pada Gambar 3.26. Hal ini terutama mengingat kecenderungan perubahan iklim yang dapat dirasakan, seperti ketidakpastian cuaca (belum terjadinya musim kering pada periode yang seharusnya) dan cuaca ekstrim (seperti hujan dengan intensitas yang makin tinggi dan menyebabkan banjir). Salah satu proses perubahan iklim terlihat dari aktivitas pemanasan global yang menyebabkan temperatur serta distribusi tekanan di bumi berubah, menyebabkan perubahan arah angin, musim yang berubah-ubah, dan sebagainya.

Aktivitas pemanasan global sendiri terjadi secara *anthropogenic*, atau disebabkan oleh aktivitas manusia, yang salah satunya adalah polusi udara (akibat kegiatan transportasi, industri, dsb), dan telah beberapa kali dibuktikan oleh dokumentasi

viral di media sosial. Salah satu berita mengenai hal tersebut disiarkan oleh CNN tahun 2017 yang menayangkan perbedaan kondisi udara di Jakarta sebelum hari raya Idul Fitri, ketika hari raya Idul Fitri, serta beberapa hari setelah hari raya Idul Fitri, yang menunjukan bahwa jumlah lalu lalang kendaraan bermotor sangat sedikit, dan kualitas udara di Jakarta menunjukan peningkatan yang signifikan pada ketiga masa tersebut. Contoh lainnya yang terjadi pada waktu dekat ini adalah pada masa pembatasan kegiatan akibat pandemi COVID-19, yang diindikasikan dari tingkat visibilitas/jarak pandang, seperti langit yang biru serta lansekap di kejauhan seperti pegunungan yang terlihat, saat pada kondisi normal tidak terlihat akibat tingginya tingkat kegiatan manusia, terutama transportasi. Hal ini merupakan bukti nyata bahwa mobilitas kendaraan bermotor sangat berpengaruh terhadap kondisi polusi udara.

Emisi gas buang saat ini telah mencapai tingkat keparahan yang dapat dilihat dan dirasakan langsung, sebagai contoh, apabila berada pada/tinggal pada gedung yang tinggi, seperti apartemen atau gedung perkantoran. Apabila dicermati dari ketinggian tertentu, dapat diaamati bahwa intensitas cahaya pada pagi hari mulai meredup, begitu pula pada sore hari yang meredup dan gelap makin cepat. Hal ini diakibatkan oleh bahan bakar yang antara lain mengandung:

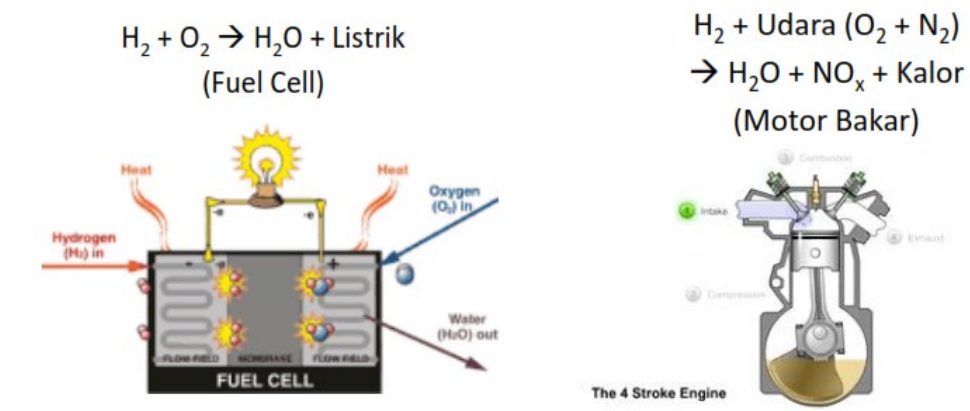
- Karbon,
- Hydrogen ,
- Sulfur (sebagai inputan produk kimia bumi),
- Partikulat.

Pada pembakaran bahan bakar di dalam motor bakar diperlukan udara. Gas buangan yang dihasilkan adalah air, karbon dioksida, karbon mono oksida, sulfur oksida, nitrogen oksida dan partikulat. Jika terjadi pembakaran sempurna, seharusnya hanya ada CO_2 dan H_2O, namun pada kenyataannya, pembakaran tidak selalu sempurna, dan akibatnya, CO muncul, begitu juga HC atau unburned Hydro-Carbon. Saat suhu pembakaran naik, nilai NOx juga naik, dan produk sampingan yang mengandung

belerang dari bahan bakar dikeluarkan, sehingga terbentuk SOx penyebab hujan asam (penyebab bintik-bintik pada mobil, rusaknya habitat tumbuhan dan perairan). Gas buang lainnya yakni oksigen ekstra dan *particulate matter* (PM), yang terutama terdapat pada mesin diesel. Apabila dicermati dari semua gas buang tersebut, hanya H_2O dan O_2 saja yang merupakan emitan yang tidak membahayakan kesehatan, sedangkan emitan lainnya merugikan bagi lingkungan dan kesehatan. Karena hal tersebut, kemudian muncul ide pengembangan bahwa hydrogen dapat menjadi suatu harapan masa depan, yang apabila diteliti dengan baik, maka tidak ada lagi emisi yang diakibatkan oleh kendaraan bermotor yang mencemari lingkungan maupun mengancam kesehatan.

II. PEMANFAATAN HIDROGEN

Terdapat 2 jenis pemanfaatan Hydrogen pada kendaraan bermotor, yang pertama dengan menggunakan *fuel cell* (tanpa pembakaran) dan yang kedua dengan menggunakan pembakaran (*combustion*). Skema kedua jenis pemanfaatan dapat dilihat pada **Gambar 3.27**.



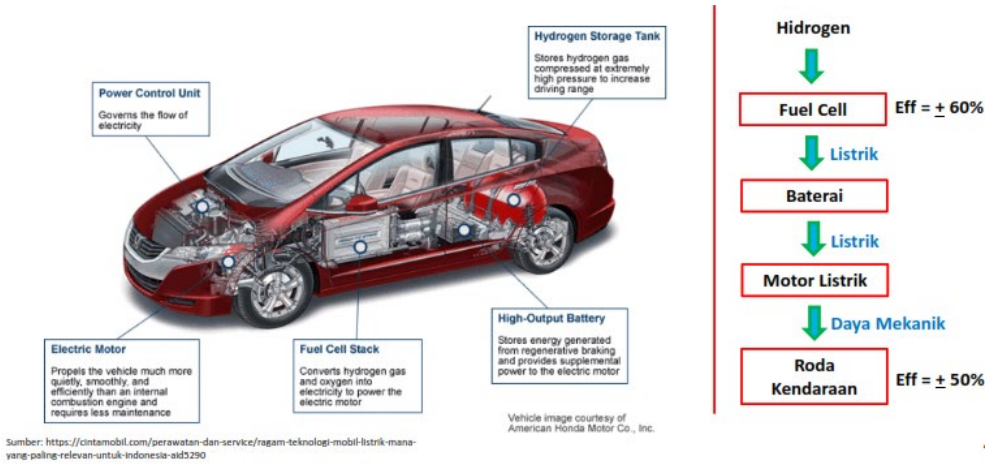
Sumber: https://tenor.com/search/hydrogen-fuel-cell-animation-gifs dan https://makeagif.com/gif/how-engine-works-with-hydrogen-fuel-enhancement-fly-x4opBp

Gambar 3.27 Pemanfaatan Hidrogen

II.1 FUEL CELL

Reaksi di dalam *fuel cell* terjadi melalui suatu mekanisme tertentu dimana hydrogen dan oksigen akan bertemu menghasilkan H_2O dan listrik. Adanya aliran electron ini akan menimbulkan listrik yang kemudian dapat dimanfaatkan untuk menggerakan kendaraan bermotor melewati baterai, motor listrik, sistem kontrol dan sejenisnya.

Selain itu, beberapa perusahaan besar penghasil kendaraan bermotor juga mulai melakukan riset untuk memanfaatkan hydrogen pada *internal combustion engine* seperti yang digunakan pada mesin yang digunakan saat ini; menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar pengganti dan oksigen didapat dari udara. Dari proses ini, akan terbentuk air atau H_2O, namun karena adanya N_2 dan O_2 dari udara serta panas tinggi pada waktu reaksi pembakaran, maka akan tetap muncul emitan berupa NOx yang sebenarnya juga menganggu kesehatan.



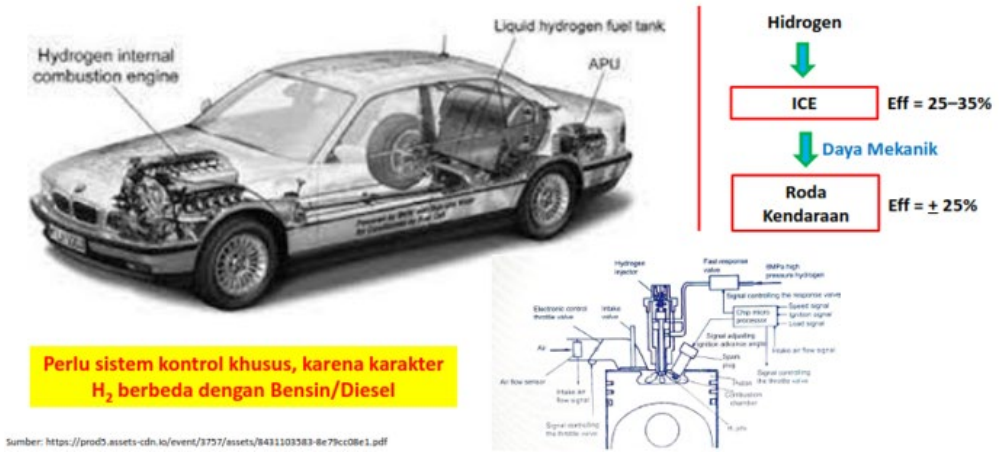
Gambar 3.28 Contoh skema *Fuel Cell electric Vehicle (FCeV)* dari Jepang

Salah satu contoh implementasi *fuel cell* adalah Fuel Cell Electric Vehicle, yang sudah dijual secara komersil dan diisi dengan hydrogen yang mulai banyak dikembangkan di Jepang. Pada kendaraan bermotor di Jepang seperti yang dapat dilihat pada skema Gambar 3.28, terdapat *hydrogen storage tank* yang tekanannya sangat tinggi (> 600 bar). Kemudian, hydrogen dialirkan ke *fuel cell* sehingga membentuk listrik. Listrik yang terbentuk disimpan di baterai, lalu dari baterai akan dikontrol penggunaanya

untuk menggerakkan motor listrik sesuai dengan kebutuhan kendaraan. Sistem kontrol pada teknologi ini sangat diperlukan agar keseluruhan proses dapat terjadi secara efisien, termasuk ketika kendaraan melakukan deselerasi, maka energi kinetik yang dimiliki dikonversi menjadi listrik yang kemudian akan disimpan di baterai.

Teknologi *fuel cell* dapat menjaga efisiensi hinggga sekitar 60%, kemudian listrik ditransmisikan sampai ke motor listrik, lalu diubah menjadi daya mekanik untuk menggerakkan roda, sehingga efisiensi sampai di roda terdapat pada kisaran 50%.

II.2 INTERNAL COMBUSTION ENGINE VEHICLE



Gambar 3.29 Skema *Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV)* H_2

Apabila hydrogen dimanfaatkan pada kendaraan bermotor dengan sistem *internal combustion engine* tetap harus menggunakan hydrogen yang disimpan dengan tekanan tinggi untuk kemudian hydrogen dialirkan ke ruang mesin dan dilakukan pembakaran dengan sistem kontrol yang rumit seperti dapat dilihat pada Gambar 3.29. Penggunaan *stamina hydrogen injector* menyebabkan diperlukannya mekanisme katup yang memiliki kecepatan respon yang tinggi, serta diperlukan kontrol untuk masalah detonasi dan sebagainya. Apabila hydrogen digunakan, maka efisiensi pembakaran pada ICE adalah sekitar 25-35%, sehingga sampai di roda

kendaraan hanya tersisa 25%. Apabila dibandingkan dengan kendaraan yang menggunakan sistem fuel cell, maka angka efisiensi tersebut relatif kecil.

II.3 PERBANDIANGAN ICE BERBAHAN BAKAR BENSIN VS H_2

Tabel 3.4 Perbandingan ICE Berbahan Bakar Bensin dengan gas hidrogen

NO.	PARAMETER	ICE (CxHy, S)	ICE (H2)
1	Reaksi Kimia / Pembakaran	Menghasilkan emisi CO2, CO, HC, SOx, NOx + Panas	Menghasilkan H2O dan NOx + Panas
2	Air - Fuel Ratio	14,7:1 - 37:1 (Bensin)	34:1 - 180:1, sehingga mudah distart, hemat bahan bakar, jika lean NOx akan rendah
3	Ignition Energy	± 0,24 mJ	± 0,02 mJ, mudah menyala meski lean, mudah misfire, bisa menggunakan penyala lain (hot wire/glow plug)
4	Flame Velocity	Perambatan nyala lambat	Perambatan nyala cepat (± 2 kali Bensin)
5	Auto Ignition Temperature	± 230 - 280 *C	± 500 *C
6	Kesetaraan RON	± 91 - 99	minimum ± 120, sehingga bisa digunakan pada perbandingan kompresi tinggi (daya tinggi), advanced timing ignition (potensi daya tinggi), sulit berdetonasi
7	Difusivity	Lambat menyebar	Cepat menyebar memenuhi ruang bakar, sehingga potensi pembakaran sempurna lebih tinggi, putaran mesin tinggi
8	Quenching Distance	± 2 mm dari dinding	± 0,6 mm dari dinding2, bahaya backfire
9	Energy Density	Kabut Bensin hanya menempati + 1-2% volume ruang bakar, dan MJ/kg rendah tetapi MJ/L tinggi	H2 menempati ± 30% volume ruang bakar, sehingga volume udara berkurang, dan H2 secara MJ/kg tinggi tetapi secara MJ/L sangat rendah, sehingga butuh penyimpan bervolume besar atau bertekanan tinggi

Sumber: https://www.youtube.com/watch?v=l0ECwRnJ05g

Terdapat 9 poin perbedaan yang dapat dilihat dari penggunaan ICE berbahan bakar bensin dengan gas hidrogen, seperti dapat dilihat pada Tabel 3.4. Pertama dari sisi reaksi kimia pembakaran. Apabila menggunakan bensin hidrokarbon seperti biasa, akan terbentuk hasil pembakaran antara lain CO_2, CO, HC, SOx, NOx, dan kalor. Namun apabila menggunakan hidrogen, hasil pembakaran antara lain hanya air, NOx, serta kalor. Dilihat dari *air fuel ratio* (AFR) (rasio perbandingan antara udara dan bahan bakar yang mempengaruhi kesempurnaan pada proses pembakaran di ruang bakar, dengan rasio perbandingan ideal pada 14,7 : 1). Angka AFR dibagi menjadi 3 kategori, yakni:

- AFR Kaya, atau campuran yang mengandung bahan bakar dalam jumlah besar, sehingga menyebabkan pemborosan pemakaian bahan bakar dan menghasilkan emisi berupa hidro-karbon,

- AFR Miskin, atau campuran yang mengandung bahan bakar dalam jumlah kecil, sehingga tenaga mesin yang dihasilkan juga kecil. Hal ini akan menyebabkan temperatur mesin menjadi cepat panas dan dapat membuat kerusakan mesin,
- AFR Ideal, campuran udara dan bahan bakar ideal, sehingga kinerja mesin akan optimal pada jumlah pemakaian bahan bakar yang efisien.

AFR pada penggunaan bensin adalah sekitar 14,7:1 hingga 37:1 tergantung dari kondisi operasi kendaraan, sedangkan pada hydrogen bisa menjadi lebih besar, yakni 34:1 sampai 180:1.

Kedua, dari sisi *ignition energy*. Bensin membutuhkan sekitar 0,24 mJ energi, sedangkan hydrogen membutuhkan energi lebih kecil, yakni sekitar 0,02 mJ, 1/10 lebih kecil dari penyalaan bensin. Hal ini mengindikasikan bahwa mesin dengan menggunakan hidrogen akan lebih mudah menyala, namun juga mudah terjadi *misfire* sehingga perlu kontrol yang lebih baik.

Ketiga, dari sisi *auto ignition temperature*, pada mesin yang akan menggunakan bensin adalah sekitar 230 hingga 280 ℃, sedangkan hydrogen sekitar 500 ℃. Keempat, dari sisi kesetaraan *Research Octane Number,* yakni untuk bensin adalah setara 91-99, sedangkan pada hydrogen hampir setara dengan gas alam, sekitar 120. Hal ini mengindikasikan kemungkinan terjadi detonasi kecil. Apabila penyalaannya tepat atau teknik *ignition* tepat, maka daya yang terbentuk akan dapat mencapai nilai yang lebih tinggi karena lebih sulit berdetonasi.

Kelima, dari sisi *diffusivity*. Bensin memiliki kecepatan penyebaran yang lambat, sehingga hanya menempati sekitar 1 sampai 2 % dari volume ruang bakar. Sedangkan hydrogen memiliki kecepatan menyebar yang tinggi dan dapat segera memenuhi ruang bakar, sehingga pada titik ini kemudian dapat dilihat potensi pembakaran lebih sempurna yang lebih tinggi dan kemungkinan putaran mesin yang lebih tinggi. Selanjutnya untuk *quenching distance*, bensin berada atau terbakar pada jarak 2 mm dari dinding, namun hydrogen pada jarak sekitar 0,6 mm, yang mengindikasikan

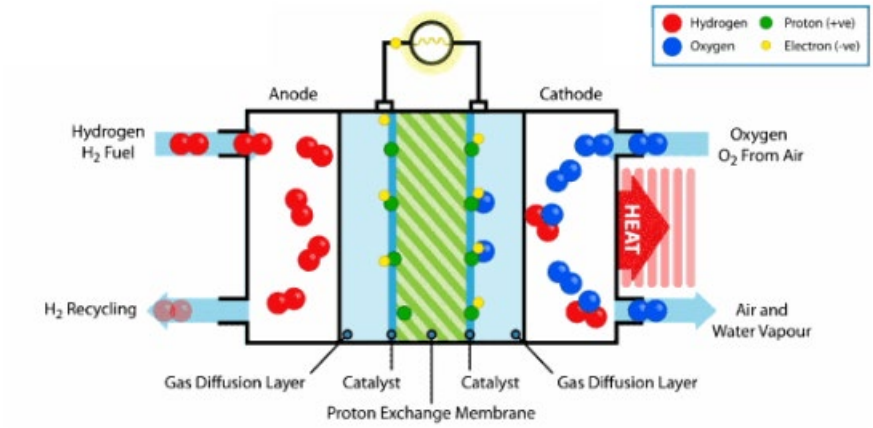
kemungkinan terjadinya *backfire*, yang terjadi saat api merambat masuk ke *intake valve* lalu terjadi pembakaran pada *intake manifold*.

Terakhir, secara *energy density* per kg. Hydrogen memiliki nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan bensin. Bensin memiliki energy density yang rendah, dengan hanya menempati 1-2 % volume ruang bakar, menandakan MJ/kg yang rendah namun MJ/L yang tinggi. Sedangkan hidrogen menempati 30 % volume ruang bakar dengan MJ/kg yang tinggi dan MJ/L yang rendah, sehingga membutuhkan penyimpanan bervolume besar atau bertekanan tinggi.

III. PENGGUNAAN H_2 PADA *FUEL CELL*

III.1 MEKANISME PENGGUNAAN H_2

Pada sub-bab awal, telah dijabarkan bahwa *fuel cell* adalah alternatif penggunaan hydrogen yang lebih efisien dibandingkan dengan internal combustion engine. Skema bagaimana hidrogen digunakan pada mesin dapat dilihat pada Gambar 3.30. Pada *fuel cell* tidak dilakukan pembakaran dan hanya mengandalkan reaksi, yakni aliran *electron* dan *proton exchange membrane.* Pada membran ini, proton akan datang dan memicu reaksi antara H_2 dengan O_2 dengan menghasilkan listrik. Susunan rangkaian harus disesuaikan dengan tujuan penggunaan, yakni secara seri apabila mengutamakan tegangan, dan paralel apabila mengutamakan arus.



Sumber: https://www.extremetech.com/mobile/212795-this-hydrogen-fuel-cell-powered-iphone-6-delivers-an-entire-week-of-battery-life

Gambar 3.30 Skema *fuel cell* H_2

Produk dari *fuel cell* adalah air. Meskipun demikian, apabila digunakan di dalam kendaraan, air tidak akan langsung dibuang ke jalan, karena akumulasi air dari seluruh kendaraan dapat menyebabkan kerusakan jalan. Oleh karena itu, diperlukan sistem penampungan air dan dibuang pada saluran pembuangan air.

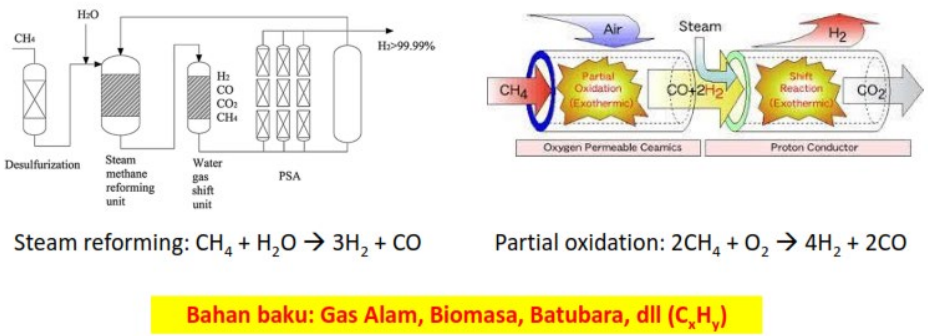
III.2 SUMBER H_2

Hidrogen terdapat di dalam air, sehingga secara teoritis, air dapat dijadikan sumber bahan bakar dengan terlebih dahulu dilakukan konversi menjadi hydrogen dan oksigen. Setelah konversi dilakukan, baru kemudian hidrogen dapat dimanfaatkan seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Namun, seandainya ikatan hidrogen dan oksigen pada air tidak dipisahkan, atau lebih dikenal sebagai oksi-hydrogen atau HHO, tetap bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar, hanya saja memiliki nilai kalor yang berbeda.

Hydrogen dapat dihasilkan secara *thermochemical*, baik menggunakan *steam reforming* maupun *parcial oxidation/pyrolysis*, kemudian secara elektrolisa (*electrolysis*). Pengembangan terbaru yakni menggunakan *photolytic* dan juga secara biologis.

III.2.1 PRODUKSI H_2 SECARA *THERMOCHEMICAL*

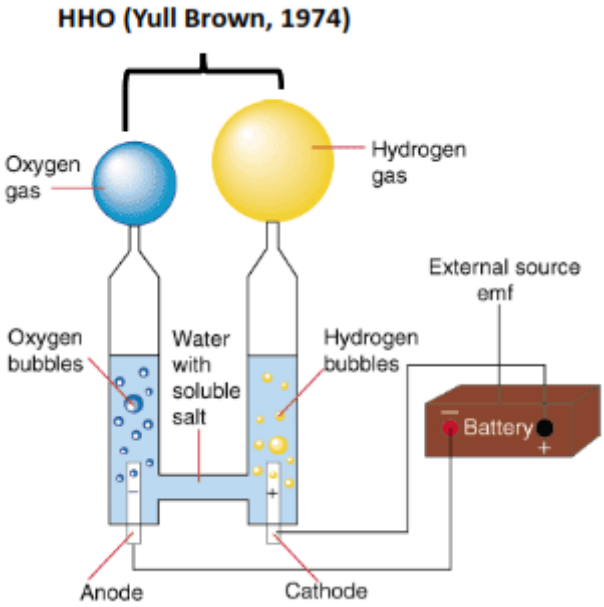
Secara garis besar, *steam reforming* dengan menggunakan bahan baku metana atau CH_4 paling banyak digunakan. Namun, kelemahan pada penggunaan bahan baku metana adalah akan dihasilkan karbon dioksida yang cukup banyak sehingga butuh mekanisme *carbon capture* untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan. Selain tentu ada pilihan berupa *partial oxidation*, yang akan mereaksikan metana dengan oksigen, dan tidak dapat dilakukan secara menyeluruh sehingga akan dihasilkan hydrogen. Gambaran proses produksi H_2 secara *thermochemical* dapat dilihat pada Gambar 3.31.



Gambar 3.31 Skema produksi H_2 secara *Thermochemical*

III.2.2 PRODUKSI H_2 SECARA *ELECTROLYTIC*

Alat untuk memproduksi gas hidrogen secara elektrolisa cukup sederhana: katoda, anoda, dan air, dengan catatan pada air umumnya diberikan tambahan senyawa yang berlaku sebagai katalis (gambar skema dapat dilihat pada Gambar 3.32). Kemudian, akan terbentuk gelembung pada bagian anoda menghasilkan oksigen, sedangkan pada bagian katoda menghasilkan hydrogen, namun perlu dicatat bahwa proses ini membutuhkan listrik yang tidak sedikit.



Gambar 3.32 Skema produksi H_2 secara elektrolisa

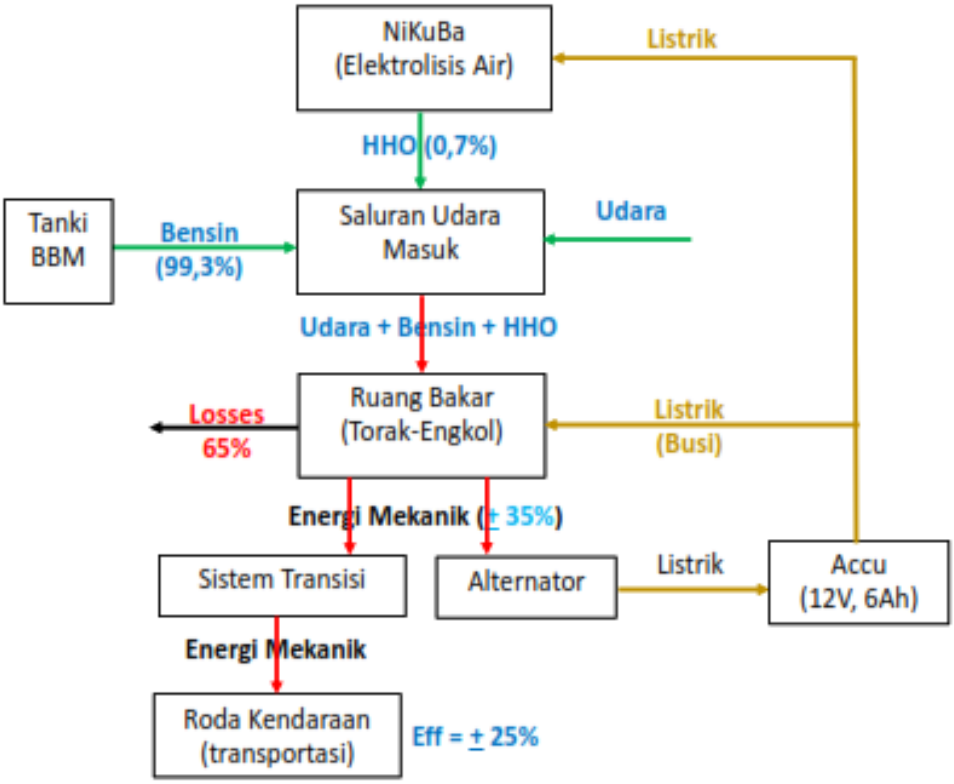
Berdasarkan literatur, banyak disampaikan bahwa dibutuhkan energi untuk pemisahan hidrogen dan oksigen ini adalah sekitar 180 MJ untuk menghasilkan satu kilogram hydrogen. Oksihidrogen sendiri merupakan campuran dari oksigen dan hydrogen sudah ditemukan jauh lebih awal oleh Yull Brown, sehingga sering juga disebut sebagai *Brown's gas* pada sekitar tahun 1974. Apabila dari tahun 1974 hingga saat ini belum dapat dimanfaatkan secara efektif, artinya perlu penelitian lebih jauh.

Apabila dilakukan perhitungan sederhana berdasarkan keseimbangan/*balance* energi, untuk elektrolisa hydrogen akan dibutuhkan sekitar 180 MJ/kg, sedangkan nilai kalor pembakarannya di dalam motor adalah sekitar 130 MJ, artinya terdapat selisih energi sekitar 50 MJ/kg, dengan mempertimbangkan massa jenis hydrogen yang sangat kecil, yakni 0,05 kg/m^3. Sedangkan bensin memiliki nilai kalor sekitar 40 MJ/kg, hanya 1/3 dari hidrogen, dengan massa jenisnya 800 kg/ m^3. Jadi, apabila dilakukan analisa sebuah kendaraan sepeda motor dengan berat sekitar 120 kg dengan pengendara 80 kg, melakukan perjalanan dari Cirebon ke Semarang sejauh 460 km pergi-pulang, dengan *rolling resistance* 0,45, maka total akan dibutuhkan

energi sekitar 406 MJ. Apabila kita menggunakan bensin untuk menjalankan kendaraan, maka kira-kira kebutuhannya adalah sekitar 13 L, atau konsumsi 36 km/L. Hasil ini merupakan angka yang wajar untuk sebuah sepeda motor. Apabila seandainya digantikan oleh hydrogen, maka dibutuhkan sekitar 62.500 L atau 3,12 kg.

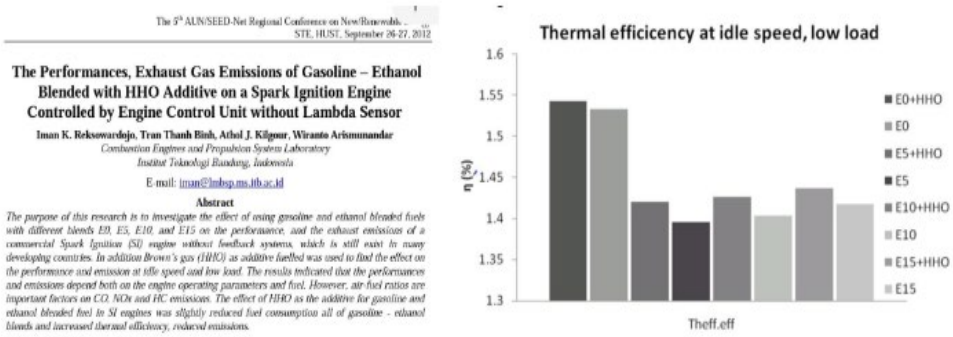
Apabila rata-rata kecepatan kendaraan adalah 30 km/jam, berarti untuk perjalanan jarak tersebut membutuhkan waktu sekitar 15,3 jam. Oleh karena itu produksi H_2 yang dibutuhkan untuk mencukupi sepeda motor adalah 68 L/menit. Ini adalah jumlah volume yang sangat besar, sehingga juga membutuhkan sistem elektrolisa yang besar pula. Sebagai perbandingan, di laboratorium telah dilakukan uji coba, diperlukan listrik dengan arus sekitar 20 Ampere agar bisa memproduksi oksihidrogen 5 L/menit.

Apabila dilihat secara nyata aki di sepeda motor, dengan tegangan 12 V dan arus 6Ah, artinya memiliki kapasitas sebesar 72 Wh. Dengan listrik 72 W dapat diproduksi H_2 sekitar 0,48 L/menit, artinya apabila dibandingkan dengan kebutuhan 68 L/menit, hanya akan mencukupi kebutuhkan daya sebesar 0,7 % dari kebutuhan total. Dengan demikian, apabila ingin menjalankan sepeda motor dengan hidrogen, maka masih diperlukan penggunaan bensin yang dominan, yakni untuk memenuhi sisa 99,3 % dari kebutuhan total energi.



Gambar 3.33 Energy balance dalam penggunaan elektrolisa air untuk produksi H_2 pada kendaraan bermotor

Hasil perhitungan kemudian dapat digambarkan sebagai sistim *energy balance* (Gambar 3.33). Berdasarkan skema tersebut, diketahui masih diperlukan BBM sebesar 99,3% dan hydrogen menyumbang sebesar 0,7% untuk masuk ke dalam mesin. Kemudian, di dalam mesin akan dikonversi menjadi energi mekanik, dengan efisiensi sekitar 35%. Maka, roda kendaraan hanya akan mendapatkan efisiensi sekitar 25%, lainnya kehilangan sebesar 65%, atau sekitar 63%, kemudian mungkin masih dapat dikembangkan untuk menggunakan alternator untuk menghasilkan listrik pada proses elektrolisa. Seandainya dimaksimalkan seluruh tenaga aki pada motor digunakan untuk seluruh proses elektrolisis, akan muncul masalah seperti listrik yang tidak mensuplai kebutuhan busi, sehingga busi mati, dan motor tidak dapat dijalankan.


The 9th AUN/SEED-Net Regional Conference on New/Renewable ...
STE, HUST, September 26-27, 2012

The Performances, Exhaust Gas Emissions of Gasoline – Ethanol Blended with HHO Additive on a Spark Ignition Engine Controlled by Engine Control Unit without Lambda Sensor

Iman K. Reksowardojo, Tran Thanh Binh, Athol J. Kilgour, Wiranto Arismunandar
Combustion Engines and Propulsion System Laboratory
Institut Teknologi Bandung, Indonesia
E-mail: iman@lmbsp.ms.itb.ac.id

Abstract

The purpose of this research is to investigate the effect of using gasoline and ethanol blended fuels with different blends E0, E5, E10, and E15 on the performance, and the exhaust emissions of a commercial Spark Ignition (SI) engine without feedback systems, which is still exist in many developing countries. In addition Brown's gas (HHO) as additive fuelled was used to find the effect on the performance and emission at idle speed and low load. The results indicated that the performances and emissions depend both on the engine operating parameters and fuel. However, air-fuel ratios are important factors on CO, NOx and HC emissions. The effect of HHO as the additive for gasoline and ethanol blended fuel to SI engines was slightly reduced fuel consumption all of gasoline - ethanol blends and increased thermal efficiency, reduced emissions.

Gambar 3.34 Hasil penelitian LMBSP ITB

Penelitian terkait HHO telah dilakukan di Laboratorium Motor Bakar dan Sistem Propuls (LMBSP) ITB, berfokus pada pembakaran pada mesin motor yang pernah dilakukan oleh Dr. Imam Reksowardjojo dan tim. Berdasarkan penelitian, diketahui bahwa efek dari penggunaan HHO atau oksihydrogen dalam hal efisiensi termal bernilai sangat kecil, dengan kesimpulan sementara penambahan HHO tidak efisien dan tidak ada perubahan. Namun, perlu pula dicatat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil, seperti kesalahan pengukuran torsi, putaran, dan konsumsi bahan bakar, sehingga mungkin hasil yang didapat tidak ada penghematan. Namun, kesimpulan sementara yang didapat adalah penambahan oksihidrogen tidak membuat perubahan yang signifikan.

IV. KESIMPULAN

Secara umum dapat dikatakan bahwa apabila memanfaatkan oksihidrogen atau *Brown's gas* yang ditemukan Yull Brown tahun 1974 (46 tahun yang lalu) namun hingga saat ini tidak ada pemanfaatan yang efektif, maka diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menanyakan apakah ada atau tidak pengaruh terhadap efisiensi, apa penyebab tidak efektif dalam pembakaran, atau apakah ada efek kepada material atau pelumas, atau bagaimana semisal masalah yang ditemukan adalah *hydrogen embrittlement* yang bisa terjadi di dalam pelumas dan sebagainya.

Produksi hydrogen paling efektif disaat ini yang terkenal di hampir diseluruh dunia adalah *steam reforming* dengan menggunakan bahan baku gas alam, tapi perlu disertai dengan menggunakan mekanisme *carbon capture*, karena apabila tidak, maka CO_2 akan terbuang ke udara dan dapat menyebabkan efek rumah kaca.

Hydrogen dapat digunakan pada kendaraan bermotor dengan beberapa cara, seperti pembakaran, yang umum dikenal dengan *internal combustion engine*, namun akan masih ditemukan emisi NOx yang dapat menyebabkan kerusakan saraf, gangguan pernafasan, dan menyebabkan *smog*, terutama di Eropa dan Amerika, dan kemudian membutuhkan sistem kontrol pengendali pembakaran yang cukup rumit. Kedua dengan menggunakan *fuel cell electric vehicle* yang menghasilkan H_2O sehingga ramah lingkungan. Namun, dengan catatan mempertimbangkan waktu produksi serta menggunakan sumber energi yang ramah lingkungan.