

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Elektrolisis

Elektrolisis adalah metode pemecahan molekul-molekul air menjadi atom-atom penyusunnya (hidrogen dan oksigen) dengan menggunakan arus listrik yang melewati 2 kutub elektroda. Teknologi elektrolisis yang umum digunakan adalah elektrolisis berbasis alkali (menggunakan larutan alkali).

Pada elektrolisis, sebuah sumber listrik dihubungkan dengan dua elektroda atau 2 plat (umumnya terbuat dari platina atau karbon) yang diletakkan di dalam suatu larutan. Setelah proses dijalankan, maka air akan terpisah menjadi hidrogen dan oksigen. Hidrogen akan terkumpul di katoda (elektroda negatif) dan oksigen akan terkumpul pada anoda (elektroda positif). Gas hidrogen yang dihasilkan jumlahnya dua kali lipat dari gas oksigen yang dihasilkan dan keduanya proporsional dengan total energi listrik yang dialirkan melalui air. Melalui proses elektrolisis, idealnya satu mol air dapat menghasilkan satu mol hidrogen dan setengah mol oksigen pada suhu 25 °C dan 1 atm.

Energi listrik yang diperlukan untuk elektrolisis adalah 231,7 kJ/ mol H₂ produk. Energi dalam jumlah yang cukup besar ini digunakan untuk mengatasi berbagai hambatan (energi aktivasi, resistansi listrik, resistansi transport dan resistansi reaksi kimia). Tanpa kelebihan energi, elektrolisis dari air murni akan berlangsung lambat. Hal ini disebabkan oleh kestabilan air secara termokimia yang menyebabkan susah air untuk terionisasi sendiri.

Elektrolisis air tidak dapat mengkonversi 100 % energi listrik menjadi energi kimia pada hidrogen. Proses ini membutuhkan energi yang jauh lebih besar untuk mengaktifkan air agar dapat terionisasi. Jumlah energi yang diperlukan ini tidak sebanding dengan jumlah hidrogen yang dihasilkan. Dengan menggunakan metode elektrolisis biasa hanya sekitar 4 % produksi hidrogen yang dihasilkan dari air murni.

Proses elektrolisis akan lebih baik jika menggunakan larutan elektrolit. Larutan elektrolit adalah larutan yang dapat menghantarkan listrik. Larutan

elektrolit dibagi menjadi tiga golongan :

- a. Asam , seperti asam sulfat (H_2SO_4), asam nitrat (HNO_3), asam klorida (HCl), Asam karboksilat (CH_3COOH) , Asam Format (HCOOH), Asam Florida (HF), Asam Karbonat (H_2CO_3).
- b. Basa , seperti natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), barium hidroksida [$\text{Ba}(\text{OH})_2$], Ammonium Hidroksida (NH_4OH), metanol, etanol.
- c. Garam : hampir semua senyawa kecuali garam merkuri, K_2CO_3 .

Karakter elektrolit yang baik dalam elektrolisis lebih ditekankan pada mudah menghantarkan arus listrik serta karakter korosi yang dimilikinya.

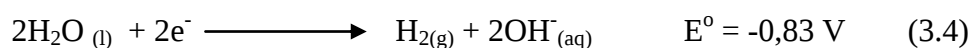
Dengan tujuan untuk meningkatkan konduktivitas larutan, elektrolit yang terdiri dari ion-ion dengan mobilitas tinggi secara umum digunakan di elektrolizer. Kalium Hidroksida adalah garam yang secara umum digunakan dalam elektrolisis air karena dapat mencegah korosi besar-besaran yang disebabkan oleh elektron.

Selain itu dengan menggunakan larutan KOH , kemungkinan produksi hidrogen bisa ditingkatkan. Hal ini dikarenakan KOH dapat menyebarkan muatan listrik karena fungsinya sebagai zat dielektrikum, sehingga proses pemecahan air menjadi radikal-radikal yang selanjutnya bereaksi lanjut menghasilkan hidrogen dan oksigen menjadi optimal. Selain itu kalium berbeda dengan natrium yang tidak terurai selama proses elektrolisis, sehingga peran KOH dalam meningkatkan konduktivitas larutan tidak hilang selama reaksi.

Pada saat aliran listrik mengalir dalam larutan elektrolit KOH akan terjadi reaksi

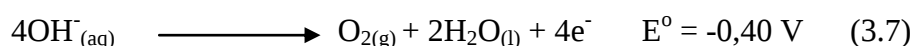
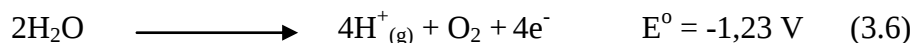


Reaksi reduksi terjadi pada air yang terdapat pada katoda yang bermuatan negatif dengan elektron (e^-) dari katoda. Kemungkinan reaksi reduksi yang terjadi di katoda adalah reduksi air dan reduksi ion K^+ .



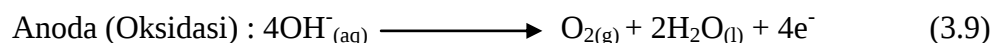
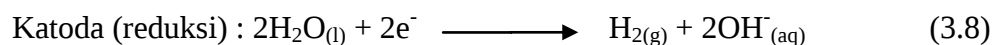
Pada elektrolisis larutan yang mengandung ion-ion golongan IA (Na^+ , K^+), ion-ion tersebut tidak tereduksi pada katoda tetapi air yang mengalami reduksi karena potensial reduksi air lebih besar dari potensial reduksi K.

Kemungkinan reaksi oksidasi yang terjadi di anoda adalah oksidasi ion OH^- dan oksidasi air.



Oleh karena potensial oksidasi OH^- lebih besar dari potensial oksidasi H_2O , maka oksidasi OH^- lebih mudah berlangsung.

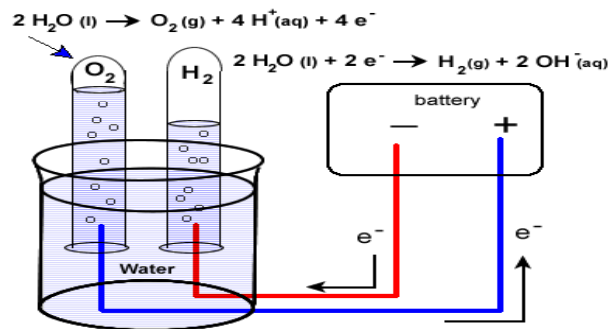
Elektrolisis larutan KOH akan menghasilkan gas hidrogen di katoda dan menghasilkan gas oksigen di anoda seperti reaksi di bawah ini :



$$E^\circ = -1,23 \text{ V} ; \Delta H = 285,83 \text{ kJ/mol}$$

Proses ionisasi dan pembentukan gas hidrogen dan oksigen pada elektrolisis dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 1. di bawah.

Gambar 1. menunjukkan bahwa di katoda air akan terpisah menjadi gas H_2 dan ion OH^- . Ion OH^- akan bersirkulasi dari katoda menuju anoda dalam medan listrik yang disediakan oleh sumber daya. Ion OH^- akan menuju permukaan anoda dan membentuk gelembung oksigen. Peristiwa pembentukan oksigen akan menghasilkan elektron. Elektron ini akan bermigrasi menuju katoda yang akan dipakai untuk memecah kembali air menjadi ion OH^- dan H_2 .



Faktor yang mempengaruhi elektrolisis antara lain :

1. Penggunaan Katalisator

Misalnya H_2SO_4 dan KOH berfungsi mempermudah proses penguraian air menjadi hidrogen dan oksigen karena ion-ion katalisator mampu mempengaruhi kestabilan molekul air menjadi ion H dan OH^- yang lebih mudah di elektrolisis karena terjadi penurunan energi pengaktifan.

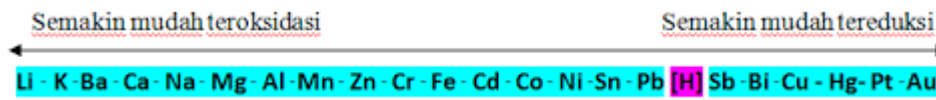
2. Luas Permukaan Tercelup

Semakin besar luas yang menyentuh elektroda maka semakin suatu elektrolit untuk mentransfer elektronnya. Sehingga terjadi hubungan sebanding jika luasan yang tercelup sedikit maka semakin mempersulit elektrolit untuk melepaskan elektron dikarenakan sedikitnya luas penampang penghantar yang menyentuh elektrolit. Sehingga transfer elektron bekerja lambat dalam mengelektrolisis elektrolit.

3. Sifat Logam Bahan Elektroda

Penggunaan medan listrik pada logam dapat menyebabkan seluruh elektron bebas bergerak dalam metal, sejajar, dan berlawanan arah dengan arah medan listrik. Ukuran dari kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik. Jika suatu beda potensial listrik ditempatkan pada ujung-ujung sebuah konduktor, muatan-muatan bergerak akan berpindah, menghasilkan arus listrik. Konduktivitas listrik didefinisikan sebagai ratio

rapat arus terhadap kuat medan listrik. Konduktivitas listrik dapat dilihat pada deret *volta* berikut :



Gambar 1. Deret *Volta*
(Sumber : “Amirabagya”, n.d)

Semakin ke kanan maka semakin besar massa jenisnya. Dalam hal ini logam stainless steel paling sering digunakan karena kromium memiliki peran untuk mencegah proses korosi (pengkaratan logam).

4. Konsentrasi Pereaksi

Semakin besar konsentrasi suatu larutan pereaksi maka akan semakin besar pula laju reaksinya. Ini dikarenakan dengan prosentase katalis yang semakin tinggi dapat mereduksi hambatan pada elektrolit. Sehingga transfer elektron dapat lebih cepat meng-elektrolisis elektrolit dan didapat ditarik garis lurus bahwa terjadi hubungan sebanding terhadap prosentase katalis dengan transfer elektron.

Pada katode, dua molekul air bereaksi dengan menangkap dua elektron, tereduksi menjadi gas H_2 dan ion hidroksida (OH^-). Sementara itu pada anode, dua molekul air lain terurai menjadi gas oksigen (O_2), melepaskan 4 ion H^+ serta mengalirkan elektron ke katode. Ion H^+ dan OH^- mengalami netralisasi sehingga terbentuk kembali beberapa molekul air.

Faktor yang mempengaruhi elektrolisis air :

- Kualitas Elektrolit
- Suhu
- Tekanan
- Resistansi Elektrolit
- Material dari elektroda
- Material pemisah

2.1.1 Larutan Elektrolit

Elektrolit adalah suatu zat yang larut atau terurai ke dalam bentuk ion-ion dan selanjutnya larutan menjadi konduktor elektrik, ion-ion merupakan atom-atom bermuatan elektrik. Elektrolit bisa berupa air, asam, basa atau berupa senyawa kimia lainnya. Elektrolit umumnya berbentuk asam, basa atau garam. Elektrolit kuat identik dengan asam, basa, dan garam kuat. Elektrolit merupakan senyawa yang berikatan ion dan kovalen polar. Sebagian besar senyawa yang berikatan ion merupakan elektrolit sebagai contoh ikatan ion NaCl yang merupakan salah satu jenis garam yakni garam dapur. NaCl dapat menjadi elektrolit dalam bentuk larutan dan lelehan. atau bentuk liquid dan aqueous. sedangkan dalam bentuk solid atau padatan senyawa ion tidak dapat berfungsi sebagai elektrolit.

Berdasarkan daya hantarnya larutan elektrolit terbagi menjadi tiga, yaitu :

1. Larutan elektrolit kuat

Larutan elektrolit kuat adalah larutan yang banyak menghasilkan ion – ion karena terurai sempurna, maka harga derajat ionisasi (α) = 1. Beberapa elektrolit seperti kalium klorida, natrium hidroksida, natrium nitrat terionisasi sempurna menjadi ion-ionnya dalam larutan. Elektrolit yang terionisasi sempurna disebut dengan elektrolit kuat. Dengan kata lain, elektrolit kuat terionisasi 100%.

Secara umum asam kuat seperti asam sulfat, asam nitrat, asam klorida, dan basa kuat seperti kalium hidroksida dan garam adalah elektrolit kuat.

2. Larutan elektrolit lemah

Larutan elektrolit lemah adalah larutan yang daya hantar listriknya lemah dengan harga derajat ionisasi sebesar $0 < \alpha < 1$. Larutan elektrolit lemah mengandung zat yang hanya sebagian kecil menjadi ion – ion ketika larut dalam air. Yang tergolong elektrolit lemah adalah :

- a. Asam–asam lemah
- b. Garam–garam yang sukar larut
- c. Basa–basa lemah

Adapun larutan elektrolit yang tidak memberikan gejala lampu menyala, tetapi menimbulkan gas termasuk ke dalam larutan elektrolit lemah. Contohnya adalah larutan ammonia, larutan cuka dan larutan H_2S .

3. Larutan non elektrolit

Larutan non elektrolit adalah larutan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik karena zat terlarutnya di dalam pelarut tidak dapat menghasilkan ion-ion. Larutan yang tergolong non elektrolit adalah larutan urea, larutan sukrosa, larutan glukosa, alkohol dan lain-lain.

2.2 Gas Hidrogen

Hidrogen adalah unsur kimia pada tabel periodik yang memiliki simbol H dan nomor atom 1. Pada suhu dan tekanan standar, hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, bersifat non-logam, bervalensi tunggal, dan merupakan gas diatomik yang sangat mudah terbakar. Dengan massa atom 1,00794, hidrogen adalah unsur teringan di dunia. Hidrogen adalah unsur paling melimpah dengan persentase kira-kira 75% dari total massa unsur alam semesta. Senyawa hidrogen relatif langka dan jarang dijumpai secara alami di bumi, dan biasanya dihasilkan secara industri dari berbagai senyawa hidrokarbon seperti metana. Di seluruh alam semesta ini, hidrogen kebanyakan ditemukan dalam keadaan atomik dan plasma yang sifatnya berbeda sebagai berikut :

Tabel 1. Sifat Fisik Gas Hidrogen

Parameter	Keterangan
Fase	Gas
Titik lebur	-259,14 °C
Titik didih	-252,87 °C
Warna	Tidak berwarna
Bau	Tidak berbau
Densitas	0,08988 g/cm ³ pada 293 K
Kapasitas Panas	14, 304 J/g °K

(Sumber : Hydrogen, 2015)

Hidrogen juga dapat dihasilkan dari air melalui proses elektrolisis. Hidrogen atau H_2 mempunyai kandungan energi per satuan berat tertinggi, dibandingkan dengan bahan bakar manapun.

Pembakaran hidrogen dapat menghasilkan kalor sebanyak 286 kJ per mol hidrogen. Pada tabel dibawah ini dapat dibandingkan kalor yang dihasilkan oleh hidrogen dengan kalor yang dihasilkan oleh bahan bakar lain,

Tabel 2. Perbandingan Kalor

Bahan Bakar	Kalor yang dihasilkan		
	Per Gram	Per mol	Per liter
Gas Hidrogen	143	286	12
Hidrogen Cair	142	285	9970
Gas Metan	55	882	36
LPG	50	2220	25600
Oktan Cair	48	5512	3400

(Putra, 2010)

Keuntungan jika hidrogen digunakan sebagai bahan bakar yaitu :

1. Suatu cuplikan hidrogen jika dibakar akan menghasilkan energi sebanyak kira-kira tiga kali energi yang dihasilkan bensin dengan berat yang sama.
2. Dalam mesin kendaraan bermotor hidrogen akan terbakar lebih efisien jika dibandingkan dengan bahan bakar lain.
3. Pembakaran hidrogen tidak menghasilkan polusi.
4. Mesin yang menggunakan hidrogen mudah diubah agar dapat menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar.

2.3 Hydrogen Storage

Hydrogen storage saat ini menjadi kendala terbesar dalam upaya untuk membuat penggunaan hidrogen menjadi lebih komersial, melihat tantangan tersebut banyak peneliti yang menjadikan Hydrogen sebagai topic riset utama. Penyimpanan hidrogen yang *feasible* haruslah *cost-effective* dan harus memenuhi standar internasional yang terkait dengan lingkungan dan keselamatan. Berbagai teknologi penyimpanan gas hidrogen telah dikembangkan dengan mempertimbangkan biaya, berat dan volume, efisiensi, keawetan, waktu pengisian dan pengosongan (charge and discharge), temperatur kerja serta efisiensinya.

1. Tangki Bertekanan Tinggi

Merupakan teknologi yang paling umum dan simpel walaupun secara volumetrik dan grafimetrik tidak efisien. Semakin tinggi tekanan, semakin besar energi per unit volume. Hidrogen tidak terkompresi mempunyai densitas energi 10,7 kJ/L, pada saat dikompresi pada tekanan 750 bar, densitas energinya meningkat menjadi 4,7 MJ/L. Namun masih jauh lebih kecil daripada gasoline, yaitu 34,656 MJ/L

2. Tangki Hidrogen Cair (Cryogenic)

Pada teknologi ini, gas hidrogen dicairkan pada suhu yang sangat rendah. Pada tekanan 1 atm, dibutuhkan temperatur hingga 22 K. Energi untuk mendinginkan hidrogen cukup besar, hingga mencapai 1/3 dari energi yang disimpan. Densitas energi hingga mencapai 8,4 MJ/L. Walaupun sangat berat, namun volumenya lebih kecil daripada tangki tekanan tinggi sehingga cocok untuk aplikasi statis.

3. Logam dan Alloy

Logam atau paduan logam (alloy) menyerupai sponge yang dapat menyerap hidrogen. Hidrogen akan terabsorpsi pada ruang interstitial pada kisi kristal logam sehingga hidrogen tidak mudah terbakar dan lebih aman. Contohnya: TiFe (1,5 wt%) dan Mg₂NiH₄ (3,3 wt%).

4. Kimiawi

Pada metode ini, hidrogen disimpan dalam bentuk senyawa kimia lain yang lebih aman. Pada saat akan digunakan, baru senyawa ini diubah menjadi hidrogen melalui reaksi kimia.

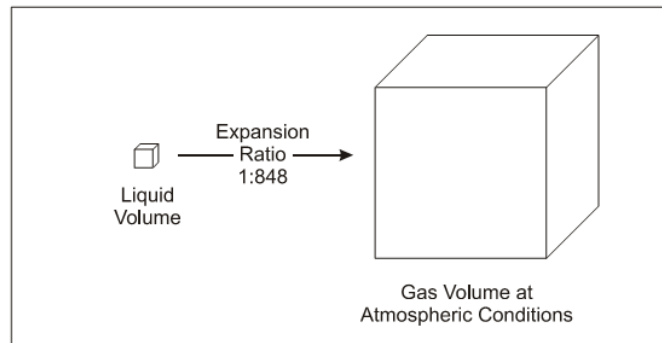
5. Adsorpsi Storage

Pada metode ini, hidrogen diadsorpsi pada permukaan bahan berpori seperti nanofiber grafit, nanotube karbon, zeolit dan *Metal Organic Framework* (MOF).

2.3.1 Adsorption Hydrogen Storage

Teknologi penyimpanan memiliki posisi paling strategis dalam isu aplikasi Hidrogen sebagai sumber energi karena hidrogen memiliki karakteristik fisik

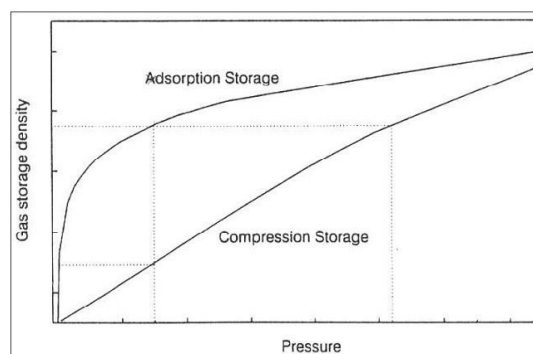
yang membuatnya sulit untuk disimpan dalam jumlah besar tanpa menyita sejumlah besar ruang.



Gambar 3. Rasio Ekspansi Hidrogen dalam Fase Cair dan Gas

(Sumber : David Langohr, Ecole Des mines de Paris, These)

Karena hidrogen adalah berupa gas dalam temperatur dan tekanan atmosfer, maka kemungkinan untuk disimpan dengan menggunakan metode adsorpsi semisal karbon aktif menjadi sangat menarik. Material karbon aktif dapat dengan mudah untuk mengikat dan melepas *hydrogen* melalui mekanisme adsorpsi dan desorpsi. Hal ini menjadikan *hydrogen storage* dengan menggunakan material karbon aktif menjanjikan sebagai teknologi penyimpanan hydrogen dimasa yang akan datang. Dengan mengadsorpsi hydrogen pada karbon aktif, fase hydrogen akan berubah dari gas ke fase mendekati cair sehingga memungkinkan untuk menurunkan tekanan pada kapasitas penyimpanan yang sama atau meningkatkan kapasitas penyimpanan dengan tekanan yang sama.



Gambar 4. Komparasi Asorption Storage dan Compression Storage

(Sumber : David Langohr, Ecole Des mines de Paris, These)

Metode penyimpanan hydrogen dengan menggunakan system adsorpsi dalam material karbon dapat dilihat sebagai sebuah proses dengan dua mekanisme yaitu adsorpsi awal dari hydrogen pada permukaan dari adsorben dan mass transfer dari hydrogen molekul masuk ke bagian dalam dari adsorben. Kapasitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling mempengaruhi dan dalam proses yang kompleks, misalnya luas permukaan, ukuran pori, jenis permukaan, komposisi permukaan adsorben dan temperatur serta tekanan kerjanya. Dari parameter-parameter tersebut, ada dua parameter yang cukup penting untuk melihat pengaruh terhadap daya adsorpsinya yaitu struktur pori dan luas permukaan spesifik.

Material karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben yang baik untuk gas storage harus memiliki kapasitas adsorpsi yang cukup tinggi dalam basis volumetrik. Untuk mencapai kondisi ini karbon harus:

- a. Jumlah mikropori yang besar, karena mikropor merupakan komponen yang banyak menyerap molekul yang kecil
- b. Memiliki bentuk yang sangat kompak, hal ini akan meningkatkan bulk density dan akhirnya juga *volumetric storage capacity*
- c. Memiliki ukuran pori yang sesuai dengan diameter molekul adsorbat, yang akan mengoptimalkan jumlah zat yang teradsorpsi
- d. Memiliki mesoporosity yang relatif rendah, karena mesopori memiliki kontribusi yang kecil terhadap kapasitas adsorpsi dan mengurangi bulk density
- e. Memiliki global heat and mass transfer dari material karbon yang cukup tinggi

2.3.2 Mekanisme Adsorpsi Hidrogen pada Karbon Aktif

Adsorpsi merupakan suatu peristiwa dimana molekul-molekul dari suatu senyawa terikat oleh permukaan zat padat. Molekul-molekul pada zat padat atau zat cair memiliki gaya dalam keadaan tidak setimbang dimana gaya kohesi

cenderung lebih besar dari pada gaya adhesi. Ketidaksetimbangan gaya-gaya tersebut menyebabkan zat padat atau zat cair tersebut cenderung menarik zat-zat lain atau gas yang bersentuhan pada permukaannya. Fenomena konsentrasi zat pada permukaan padatan atau cairan disebut fasa teradsorbat atau adsorbat sedangkan zat yang menyerap atau menariknya disebut adsorben.

Dua prinsip penyimpanan hidrogen pada beberapa material adsorben

- a) Penyerapan molekul hydrogen pada permukaan seperti *physisorption* (penyerapan fisika).

Adsorpsi fisika terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya intramolekular. Gaya intermolekular adalah gaya tarik menarik antar molekul-molekul fluida itu sendiri sedangkan gaya intramolekular adalah gaya tarik menarik antara molekul fluida dengan molekul permukaan padatan. Di dalam penyerapan ini, adsorbat ditahan pada bagian permukaan karbon karena adanya fluktuasi distribusi muatan listrik yang lemah. Adsorpsi ini dapat berlangsung di bawah temperatur kritis adsorbat yang relatif rendah. Adsorpsi menurun dengan meningkatnya temperatur. Energi aktivasi yang terjadi untuk adsorpsi biasanya tidak lebih dari 1 kkal/g.mol. Oleh karena itu gaya yang dilibatkan pada adsorpsi fisika adalah gaya *Van Der Waals* yaitu gaya tarik menarik yang relatif lemah antara permukaan adsorben dengan adsorbat. Dengan demikian adsorbat tidak terikat secara kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya. Dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat yang satu dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Bila dalam keadaan kesetimbangan kondisinya diubah misalnya tekanan diturunkan atau temperatur dinaikkan maka sebagian adsorbat akan terlepas dan akan membentuk kesetimbangan baru. Proses adsorpsi fisika terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi sehingga pada proses tersebut akan membentuk lapisan *multilayer* pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah.

- b) Atom-atom hidrogen larut dan membentuk ikatan kimia seperti *chemisorption*

(penyerapan kimia).

Adsorpsi jenis ini merupakan adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan *monolayer*. Yang paling penting dalam adsorpsi kimia adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan *monolayer*. Pendekatannya adalah dengan menentukan kondisi reaksi sehingga hanya adsorpsi kimia yang terbentuk dan hanya terbentuk *monolayer*. Fisisorpsi membatasi rasio hidrogen ke karbon kurang dari satu atom hidrogen per dua atom karbon (4.2 % massa). Berbeda dengan kemisorpsi, rasio pada dua atom hidrogen persatu karbon yang diwujudkan dalam kasus polietilen (Stroebel, R., 2006). Gaya *Van Der Walls* sering terjadi pada atom molekul non-polar (beberapa hidrokarbon adalah molekul non polar). Penyerapan secara fisika memiliki sebuah ikatan energi secara normal biasanya dari urutan 0.1 eV sedangkan penyerapan secara kimia memiliki ikatan kovalen C-H , dengan energi yang meningkat dari 2-3eV.

Faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi adalah (Hammer, 1977 dikutip petrus, 1996) :

1. Karakteristik fisik dan kimia dari adsorben seperti luas permukaan, ukuran pori-pori, komposisi dan lain-lain.
2. Karakteristik fisik dan kimia dari zat terlarut yang teradsorpsi, seperti ukuran molekul, polaritas molekul, komposisi kimia, PH, suhu dan lain sebagainya.
3. Konsentrasi zat terlarut yang teradsorpsi.
4. Waktu kontak.

2.4 Adsorben

Material penyerap atau adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas didalamnya (Suryawan, Bambang, 2004). Adsorben dikelompokkan berdasarkan

kemampuannya menyerap jenis zat tertentu, kelompok polar adsorben yaitu kelompok adsorben yang mampu menyerap air sebagai adsorbat dengan baik, kelompok polar adsorben ini biasa disebut sebagai kelompok adsorben *hydrophilic* (menyukai air) seperti silika gel, alumina aktif, dan zeolit. Kelompok lainnya adalah kelompok non-polar adsorben, yaitu kelompok adsorben yang mampu menyerap adsorbat dengan baik selain air, kelompok non-polar adsorben ini biasa juga disebut sebagai kelompok adsorben *hydrophobic* (tidak menyukai air) seperti polimer adsorben dan karbon aktif (Suzuki, M, 1990).

Kemampuan adsorpsi dari adsorben tergantung pada beberapa parameter fisik sebagai berikut (Do, Duong D., 2008):

1. Memiliki luas permukaan atau volume mikropori yang tinggi.
2. Memiliki jaringan pori (mesopori) yang besar sehingga molekul gas atau adsorbat dapat masuk ke bagian dalam adsorben.

Untuk memenuhi kriteria yang pertama adsorben harus memiliki ukuran pori yang kecil. Dengan demikian adsorben yang bagus harus memiliki dua kombinasi ukuran pori, mesopori dan mikropori.

2.4.1 Karbon Aktif

Material karbon aktif adalah salah satu kandidat untuk penyimpanan hidrogen karena memiliki kemampuan penyerapan yang tinggi, luas permukaan spesifik yang tinggi, mikrostruktur berpori, densitas masa yang rendah dan murah menjadi salah satu penelaitan yang sangat menarik.

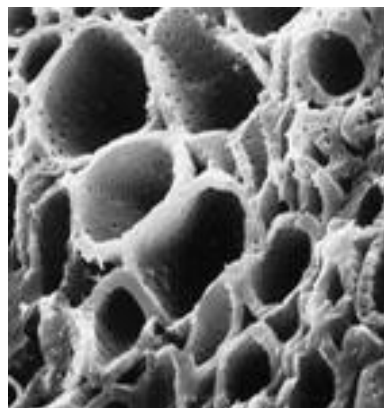
Karbon aktif adalah material yang memiliki lubang (*voids*, ruang, situs dan pori- pori). Karbon aktif adalah senyawa karbon yang telah ditingkatkan daya adsorpsinya dengan melakukan proses karbonisasi dan aktivasi. Pada proses tersebut terjadi penghilangan hidrogen, gas-gas dan air dari permukaan karbon sehingga terjadi perubahan fisik pada permukaannya. Aktivasi ini terjadi karena terbentuknya gugus aktif akibat adanya interaksi radikal bebas pada permukaan karbon dengan atom-atom seperti oksigen dan nitrogen. Menurut Sontheimer, 1985 pada proses aktivasi terjadi pembentukan pori-pori yang masih tertutup dan peningkatan ukuran serta jumlah pori-pori kecil yang telah terbentuk. Dengan demikian karbon aktif hasil aktivasi memiliki luas permukaan internal yang lebih

besar. Karbon hasil aktivasi disebut dengan karbon aktif. Walaupun lubang ini memiliki ruang kerapatan elektron sama dengan nol namun pori-pori ini memiliki gaya van der Waals (dari kedekatan atom karbon). Adapun kemampuan material karbon terhadap penyerapan (adsorpsi) berdasarkan kemampuan molekul yang berdifusi ke dalam volume mikropori.

Adapun pembagian ukuran porositas pada material karbon dibagi atas 3 yaitu:

- a. Mikroporositas $< 2.0\text{ nm}$ yang terdiri dari supermikropori ($0.7 - 2\text{ nm}$) dan ultramikropori dengan diameter kurang dari 0.7 nm .
- b. Mesoporositas $2.0 - 50\text{ nm}$
- c. Makroporositas $> 50\text{ nm}$

Pori dengan ukuran besar digunakan untuk transportasi cairan pada karbon, penyerapan terjadi pada pori yang kecil atau sedang. Pori terbentuk selama proses aktivasi, ketika karbon diaktifkan dengan sebuah reaksi kimia yang melibatkan reaktan seperti KOH (potasium hidroksida).



Gambar 5. Porositas pada karbon

Karbon aktif berbentuk granular selalu memiliki pori yang besar, tetapi pada karbon aktif dalam bentuk partikel sering tidak ditemukan pori besar setelah penggilingan. Atom karbon dapat dihilangkan dari karbon berpori dengan gasifikasi menggunakan karbon dioksida atau uap air pada suhu $800-900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aktivasi dengan karbon dioksida dan uap menghasilkan karbon dengan karakteristiknya berbeda. Secara singkat, aktivasi termal adalah sebuah proses gasifikasi selektif (pengangkatan) individu atom karbon.

Karbon aktif batu bara dan Tempurung Kelapa memiliki struktur kristalin, sehingga memungkinkan material tersebut dapat digunakan sebagai material penyimpan. Fenomena penggilingan mekanika membantu partikel menjadi fasa mikro atau nanokristalin sehingga menyebabkan penurunan energy aktivasi desorpsi (Stroebe, R., 2006) (peristiwa pelepasan molekul, ion dan sebagainya dari permukaan zat padat sehingga molekul atau ion itu menjadi gas). Namun tingginya energi aktivasi bergantung pada elemen permukaan.

Dari Melanie Francke et.al (2004) pada Modifikasi karbon struktur nano dengan penggilingan bola dengan energi tinggi pada kondisi argon dan hidrogen, dengan proses penggilingan bola dengan energi tinggi pada grafit mengarahkan kepada struktur kristal nano pada karbon. Struktur dikarakteristik dengan sedikit partikel kristalin yang tertanam dalam sebuah matriks amorf yang menyebabkan luas permukaan tertentu tinggi.

Pada prakteknya, karbon aktif mengandung beberapa elemen yang dikenal dengan heteroatom seperti hidrogen, oksigen, nitrogen dan sulfur. Hal ini sangat berpengaruh terhadap kualitas karbon aktif sehingga perlu perlakuan khusus. Beberapa tipe pada grup oksigen ditemukan dipermukaan karbon, karena elektronegativitas pada atom oksigen, memiliki momen dipol dan dengan hadirnya oksigen ditandai dengan pengaruh pembentukan penyerapan isothermal pada adsorbat polar. Oleh karena itu, sangat penting untuk dilakukan analisa terhadap permukaan karbon aktifasi yang dikenal dengan *surface oxygen complexes* (SOC)/permukaan dengan oksigen kompleks.

Karbon aktif yaitu karbon dengan struktur amorphous atau mikrokristalin yang dengan perlakuan khusus dapat memiliki luas permukaan dalam yang sangat besar antara 300 - 2000 m²/gram. Pada dasarnya ada dua jenis karbon aktif yaitu karbon aktif fasa cair yang dihasilkan dari material dengan berat jenis rendah, seperti misalnya karbon sekam padi dengan bentuk butiran rapuh dan mudah hancur, mempunyai kadar abu yang tinggi berupa silika dan biasanya digunakan untuk menghilangkan bau, rasa, warna dan kontaminan organik lainnya, sedangkan karbon aktif fasa gas dihasilkan dari bahan dengan berat jenis tinggi.

2.5 Menghitung Jumlah Gas yang Teradsorpsi

2.5.1 Hukum Gas Ideal

Gas ideal adalah gas teoritis yang terdiri dari partikel-partikel titik yang bergerak secara acak dan tidak saling berinteraksi. Konsep gas ideal sangat berguna karena memenuhi hukum gas ideal, sebuah persamaan keadaan yang disederhanakan, sehingga dapat dianalisis dengan mekanika statistika.

Pada kondisi normal seperti temperatur dan tekanan standar, kebanyakan gas nyata berperilaku seperti gas ideal. Banyak gas seperti nitrogen, oksigen, hidrogen, gas mulia dan karbon dioksida dapat diperlakukan seperti gas ideal dengan perbedaan yang masih dapat ditolerir. Secara umum, gas berperilaku seperti gas ideal pada temperatur tinggi dan tekanan rendah, karena kerja yang melawan gaya intermolekuler menjadi jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan energi kinetik partikel, dan ukuran molekul juga menjadi jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan ruangan kosong antar molekul.

Model gas ideal tak dapat dipakai pada suhu rendah atau tekanan tinggi, karena gaya intermolekuler dan ukuran molekul menjadi penting. Model gas ideal juga tak dapat dipakai pada gas-gas berat seperti refrigeran atau gas dengan gaya intermolekuler kuat, seperti uap air. Pada beberapa titik ketika suhu rendah dan tekanan tinggi, gas nyata akan menjalani fase transisi menjadi liquid atau solid. Model gas ideal tidak dapat menjelaskan atau memperbolehkan fase transisi. Hal ini dapat dijelaskan dengan persamaan keadaan yang lebih kompleks.

Gas ideal dapat diformulasikan sebagai berikut (Gas_Ideal, 2016) :

$$PV = nRT$$

...Pers 2