

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan peristiwa penyerapan suatu substansi pada permukaan zat padat. Pada fenomena adsorpsi, terjadi gaya tarik-menarik antara substansi terserap dan penyerapnya. Dalam sistem adsorpsi, fasa teradsorpsi dalam *solid* disebut adsorbat sedangkan *solid* tersebut adalah adsorben. Proses adsorpsi dapat terjadi karena adanya gaya tarik atom atau molekul pada permukaan padatan yang tidak seimbang. Adanya gaya ini, padatan cenderung menarik molekul-molekul lain yang bersentuhan dengan permukaan padatan, baik fasa gas atau fasa larutan kedalam permukaannya. Akibatnya konsentrasi molekul pada permukaan menjadi lebih besar dari pada dalam fasa gas zat terlarut dalam larutan. Proses adsorpsi hanya terjadi pada permukaan, tidak masuk dalam fasa *bulk*/ruah.

2.1.1 Jenis-Jenis Adsorpsi

Berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, adsorpsi dibedakan 2 jenis yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia (Treybal, 1980).

1. Adsorpsi Fisika

Adsorpsi fisika merupakan adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya Van der Waals. Gaya Van der Waals adalah gaya tarik-menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Pada adsorpsi fisika, adsorbat tidak terikat kuat pada adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan adsorben ke bagian permukaan adsorben lainnya dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat tersebut dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Adsorpsi fisika merupakan peristiwa reversibel sehingga jika kondisi operasinya diubah, maka akan membentuk kesetimbangan yang baru. Proses adsorpsi fisika terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi ini dapat diputuskan dengan mudah yaitu dengan pemanasan pada temperatur sekitar 150–200°C selama 2-3 jam.

2. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia merupakan adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kimia antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk merupakan lapisan monolayer. Pada adsorpsi kimia yang terpenting adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan monolayer sehingga pendekatan yang digunakan adalah dengan menentukan kondisi reaksi. Adsorpsi kimia tidak bersifat reversibel dan umumnya terjadi pada suhu tinggi diatas suhu kritis adsorbat. Oleh karena itu, untuk melakukan proses desorpsi dibutuhkan energi yang lebih tinggi untuk memutuskan ikatan yang terjadi antara adsorben dengan adsorbat.

2.1.2 Mekanisme Adsorpsi

Menurut Reynolds (1982), mekanisme penyerapan adsorben terhadap zat terlarut terbagi menjadi 4 tahap diantaranya :

1. Transfer molekul-molekul zat terlarut yang teradsorpsi menuju lapisan film yang mengelilingi adsorben.
2. Difusi zat terlarut yang teradsorpsi melalui lapisan film yang mengelilingi adsorben (*film diffusion process*).
3. Difusi zat terlarut yang teradsorpsi melalui kapiler atau pori dalam adsorben (*pore diffusion process*).
4. Adsorpsi zat terlarut yang teradsorpsi pada dinding pori atau permukaan adsorben.

2.1.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi

Berikut ini merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi daya adsorpsi suatu adsorben (Treybal, 1980).

1. Jenis Adsorbat
 - a. Ukuran molekul adsorbat

Ukuran molekul merupakan hal yang sangat penting diperhatikan supaya proses adsorpsi dapat terjadi dan berjalan dengan baik. Ukuran molekul adsorbat nantinya mempengaruhi ukuran pori dari adsorben yang digunakan. Molekul-

molekul adsorbat yang dapat diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameternya lebih kecil dari diameter pori adsorben.

b. Kepolaran Zat

Sifat kepolaran dari adsorbat dan adsorben juga mempengaruhi proses adsorpsi. Misalnya karbon aktif, adsorpsi lebih kuat terjadi pada molekul polar dibandingkan dengan molekul non-polar pada kondisi diameter yang sama.

2. Karakteristik Adsorben

a. Kemurnian Adsorben

Sebagai zat yang digunakan untuk mengadsorpsi, maka adsorben yang lebih murni lebih diinginkan karena memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik.

b. Luas permukaan dan volume pori adsorben

Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben. Dalam proses adsorpsi, adsorben sering kali ditingkatkan luas permukaannya karena luas permukaan adsorben merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses adsorpsi.

3. Temperatur

Berdasarkan prinsip Le Chatelier, maka proses adsorpsi yang merupakan proses eksotermis, dengan peningkatan temperatur pada tekanan tetap akan mengurangi jumlah senyawa yang teradsorpsi.

4. Tekanan adsorbat

Untuk setiap jenis adsorpsi berdasarkan interaksi molekular yang terjadi, tekanan adsorbat akan mempengaruhi jumlah molekul adsorbat. Pada adsorpsi fisika, bila tekanan adsorbat meningkat, jumlah molekul adsorbat akan bertambah. Namun pada adsorpsi kimia, jumlah molekul adsorbat akan berkurang bila tekanan adsorbat meningkat.

2.2 Karbon Aktif

Karbon aktif adalah suatu bahan sejenis adsorben (penyerap) berwarna hitam, berbentuk granular, butir ataupun bubuk yang mempunyai luas permukaan yang sangat besar yaitu 200 sampai 2000 m²/g. Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang paling sering digunakan pada proses

adsorpsi. Hal ini disebabkan karena karbon aktif mempunyai daya adsorpsi dan luas permukaan yang lebih baik dibandingkan adsorben lainnya. Luas permukaan yang besar ini disebabkan karena mempunyai struktur pori-pori. Pori-pori inilah yang menyebabkan karbon aktif mempunyai kemampuan untuk menyerap (Sudibandriyo, 2003).

Berdasarkan hasil analisis *Energy Dispersive X-ray* (EDX) jenis dan komposisi senyawa pada karbon aktif (Tabel 1) diantaranya terdiri dari senyawa C, Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, Cl, CaO, TiO₂, FeO, CuO, dan K₂O.

Tabel 1. Jenis dan Komposisi Senyawa pada Karbon Aktif

Senyawa	Komposisi (%)
C	77,37
Na ₂ O	1,35
MgO	0,70
Al ₂ O ₃	2,95
SiO ₂	5,39
Cl	0,30
CaO	1,68
TiO ₂	0,15
FeO	2,81
CuO	5,48
K ₂ O	1,83

Sumber : Haryono, dkk, 2012

Bahan baku yang berasal dari hewan, tumbuh-tumbuhan, limbah maupun mineral yang mengandung karbon dapat dibuat menjadi karbon aktif yaitu dibuat melalui proses pembakaran secara karbonisasi (aktivasi). Dari semua bahan yang mengandung unsur karbon dalam tempat tertutup dan dioksidasi/diaktifkan dengan udara atau uap untuk menghilangkan hidrokarbon yang akan menghalangi/mengganggu penyerapan zat organik. Bahan tersebut antar lain tulang, kayu lunak maupun keras, sekam, tongkol jagung, tempurung kelapa, ampas penggilingan tebu, ampas pembuatan kertas, serbuk gergaji, dan batubara.

Karbon aktif memiliki luas permukaan serta ukuran pori yang berbeda untuk setiap jenisnya. Ukuran pori karbon aktif biasa dinyatakan dalam ukuran *mesh*. Luas permukaan dan ukuran pori ini sangat menentukan proses adsorpsi yang mungkin terjadi. Semakin besar luas permukaan suatu karbon aktif, maka semakin

besar juga daya adsorpsinya terhadap molekul. Ukuran pori pada karbon aktif menentukan dapat masuk atau tidaknya suatu molekul terhadap pori tersebut. Jika ukuran pori karbon aktif yang tersedia lebih kecil dibandingkan ukuran molekul yang akan diadsorpsi, maka proses adsorpsi tidak dapat terjadi karena molekul tidak dapat masuk ke dalam pori karbon aktif.

Persyaratan mutu karbon aktif menurut SNI No. 06-3730-1995 terlihat pada Tabel 2 bahwa untuk mengetahui mutu dari karbon aktif dapat dilihat dari beberapa jenis uji yaitu kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, kadar karbon tertambat dan daya serap terhadap I₂.

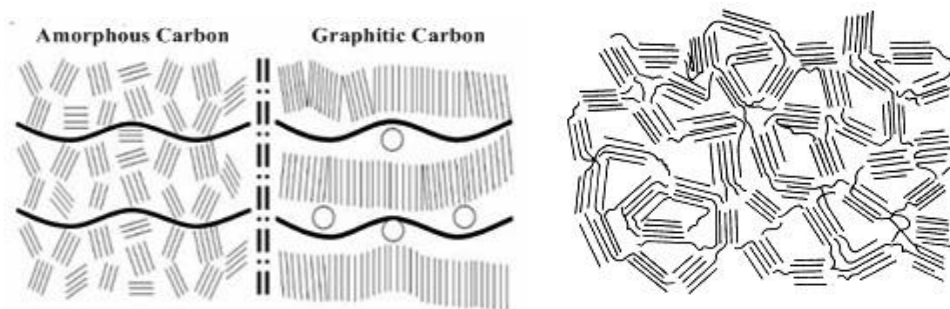
Tabel 2. Persyaratan Mutu Karbon Aktif Menurut SNI No. 06-3730-1995

Jenis Uji	Persyaratan	
	Butiran	Serbuk
Kadar air	Mak. 4,5%	Mak. 15%
Kadar abu	Mak. 2,5%	Mak. 10%
Kadar zat terbang	Mak. 15%	Mak. 25%
Kadar karbon tertambat	Min. 80%	Min. 65%
Daya serap terhadap I ₂	Min. 750 mg/g	Min. 750 mg/g

Sumber : Departemen Perindustrian dan Perdagangan, 2003

2.2.1 Struktur Fisik Karbon Aktif

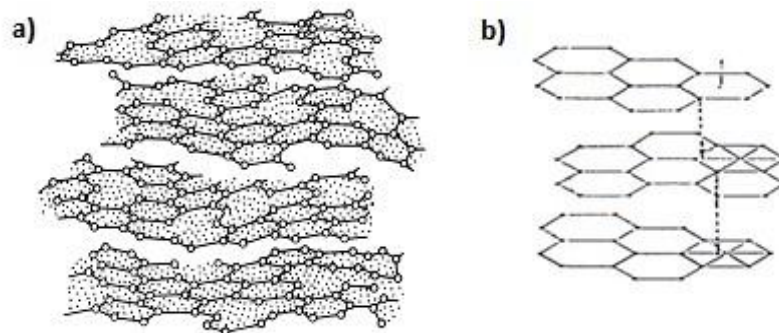
Struktur dasar karbon aktif berupa struktur kristalin yang sangat kecil (mikrokristalin). Karbon aktif memiliki bentuk *amorf* yang tersusun atas lapisan bidang datar dimana atom-atom karbon tersusun dan terikat secara kovalen dalam tatanan atom-atom heksagonal. Gambar 1 menunjukkan skema struktur karbon aktif. Setiap garis pada Gambar 1 menunjukkan lapisan atom-atom karbon yang berbentuk heksagonal dan adanya mikrokristalin dengan struktur grafit pada karbon aktif (Sudibandriyo, 2003).



Sumber : Ika Monika dan Ningrum, 2012 dan Sudibandriyo, 2003

Gambar 1. Ilustrasi Skema Struktur Karbon Aktif

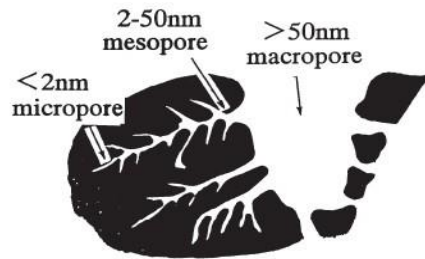
Adanya lapisan atom-atom karbon yang berbentuk heksagonal dan adanya mikrokristalin pada karbon aktif ditunjukkan pada Gambar 2.



Sumber : Sudibandriyo, 2003; Pujiyanto, 2010

Gambar 2. Lapisan Atom Karbon Heksagonal (a) dan Struktur Mikrokristalin Karbon Aktif (b)

Umumnya karbon aktif berbentuk granular (butiran) dan serbuk. Karbon aktif berbentuk serbuk halus memiliki distribusi ukuran partikel 5–10 μm . Sedangkan karbon aktif berbentuk granular memiliki ukuran 0,8–1,2 mm. Porositas karbon aktif terbentuk pada saat proses karbonisasi. Pada karbon aktif terdapat 3 ukuran pori, yaitu mikropori (< 2 nm), mesopori (2–50 nm), dan makropori (> 50 nm) (Marsh, 2006). Selain itu, lebih jauh terdapat pula ukuran supermikropori (0,7–2 nm) dan ultramikropori (< 0,7 nm). Gambar 3 menunjukkan skema struktur pori pada karbon aktif.

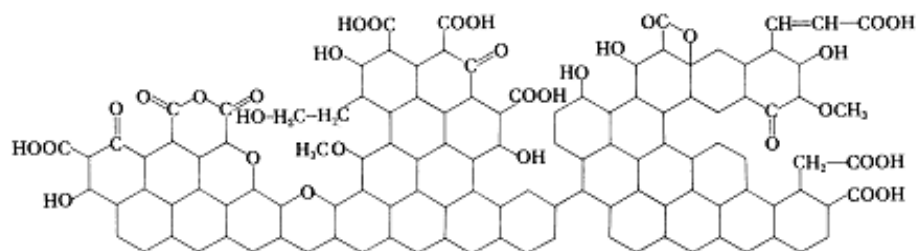


Sumber : Manocha, 2003

Gambar 3. Skema Struktur Pori Karbon Aktif

2.2.2 Struktur Kimia Karbon Aktif

Selain terdiri dari atom karbon, karbon aktif mengandung sejumlah kecil hidrogen dan oksigen yang terikat pada gugus fungsi misalnya karboksil, fenol, dan eter. Gugus fungsi ini dapat berasal dari bahan baku karbon aktif. Selain itu, gugus fungsi pada karbon aktif juga terbentuk selama proses aktivasi oleh karena adanya interaksi radikal bebas permukaan karbon dengan oksigen atau nitrogen yang berasal dari atmosfer. Gugus fungsi ini menjadikan permukaan karbon aktif reaktif secara kimia dan dapat mempengaruhi sifat adsorpsinya (Murti, 2008). Ilustrasi struktur kimia karbon aktif dapat dilihat pada Gambar 4.



Sumber : Sudibandriyo, 2003

Gambar 4. Ilustrasi Struktur Kimia Karbon Aktif

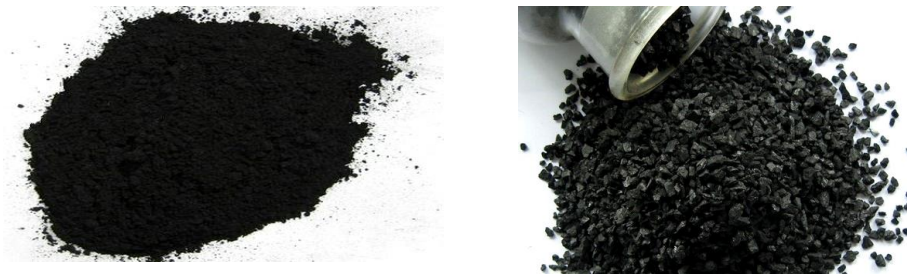
2.2.3 Tipe-Tipe Karbon Aktif

Secara umum, ada dua tipe karbon aktif yaitu karbon aktif sebagai pemucat dan karbon aktif sebagai penyerap uap (Arifin, 2008) :

- a. Karbon Aktif Sebagai Pemucat

Karbon aktif sebagai pemucat biasanya berbentuk serbuk yang sangat

halus (Gambar 5.a) atau bisa juga berbentuk granular (Gambar 5.b), dengan diameter pori yang sangat halus mencapai 1000 \AA . Karbon aktif ini dihasilkan dari bahan baku yang mempunyai densitas kecil dan mempunyai struktur yang lemah, rapuh (mudah hancur), mempunyai kadar abu yang tinggi berupa silika seperti bambu kuning, serbuk gergaji, ampas pembuatan kertas yang pada umumnya digunakan dalam fase cair untuk memindahkan zat-zat pengganggu yang menyebabkan warna dan bau yang tidak diharapkan, membebaskan pelarut dari zat-zat pengganggu (kontaminan).



a) Karbon Aktif Bentuk *Powder* b) Karbon Aktif Bentuk Granular

Sumber : Arifin, 2008

Gambar 5. Karbon Aktif Sebagai Pemucat

b. Karbon Aktif Sebagai Penyerap Uap

Karbon aktif sebagai penyerap uap (Gambar 6) biasanya berbentuk granular atau *pellet* yang sangat keras diameter pori berkisar antara $10-200 \text{ \AA}$ dan mempunyai tipe pori lebih halus. Karbon aktif sebagai penyerap uap diperoleh dari tempurung kelapa, tulang, batu bata atau bahan baku yang mempunyai struktur yang keras dengan berat jenis tinggi, tekanan rendah, kekuatan mekanik tinggi dan kadar abu rendah. Karbon aktif sebagai penyerap uap biasanya digunakan dalam fase gas untuk memperoleh kembali pelarut, katalis, pemisahan, dan pemurnian gas.



Sumber : Arifin, 2008

Gambar 6. Karbon Aktif Sebagai Penyerap Uap

2.2.4 Proses Pembuatan Karbon Aktif

Secara umum, proses pembuatan karbon aktif terdiri dari 3 tahapan, yaitu dehidrasi, karbonisasi, dan aktivasi.

1. Dehidrasi

Dehidrasi adalah proses penghilangan kandungan air yang terdapat dalam bahan baku karbon aktif dengan tujuan untuk menyempurnakan proses karbonisasi dan dilakukan dengan cara menjemur bahan baku di bawah sinar matahari atau memanaskannya dalam oven.

2. Karbonisasi

Karbonisasi (pengarangan) adalah suatu proses pemanasan pada suhu tertentu dari bahan-bahan organik dengan jumlah oksigen yang sangat terbatas, biasanya dilakukan di dalam *furnace*. Tujuan utama dalam proses ini adalah untuk menghasilkan butiran yang mempunyai daya serap dan struktur yang rapi. Karbonisasi akan menyebabkan terjadinya dekomposisi material organik bahan baku dan pengeluaran pengotor. Sebagian besar unsur non-karbon akan hilang pada tahap ini. Pelepasan unsur-unsur yang volatil ini akan membuat struktur pori-pori mulai terbentuk/pori-pori mulai terbuka. Seiring karbonisasi, struktur pori awal akan berubah.

Karbonisasi melibatkan dua proses utama yaitu proses pelunakan dan penyusutan. Kedua proses ini berkaitan dengan sifat-sifat hasil akhir produk karbonisasi. Selama proses pelunakan akan terjadi pembentukan pori yang diikuti dengan dekomposisi yang sangat cepat pada interval suhu yang sangat pendek.

Setelah proses pelunakan, arang akan mulai mengeras, kemudian menyusut dimana penyusutan arang juga memiliki peran dalam pengembangan porositas. Suhu saat pelunakan terjadi dan tingkat pelunakannya akan tergantung pada bahan dasar dan rata-rata pemanasannya.

Karbonisasi dihentikan bila tidak mengeluarkan asap lagi. Penambahan suhu memang diperlukan untuk mempercepat reaksi pembentukan pori. Namun, pembatasan suhu pun harus dilakukan. Suhu yang terlalu tinggi, seperti di atas 1000°C akan mengakibatkan banyaknya abu yang terbentuk sehingga dapat menutupi pori-pori dan membuat luas permukaan berkurang serta daya adsorpsinya menurun. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses karbonasi yaitu :

a. Waktu karbonisasi

Bila waktu karbonisasi diperpanjang maka reaksi pirolisis semakin sempurna sehingga hasil arang semakin turun tetapi cairan dan gas makin meningkat. Waktu karbonisasi berbeda-beda tergantung pada jenis-jenis dan jumlah bahan yang diolah.

b. Suhu karbonisasi

Suhu karbonisasi yang berpengaruh terhadap hasil arang karena semakin tinggi suhu, arang yang diperoleh makin berkurang tapi hasil cairan dan gas semakin meningkat. Hal ini disebabkan oleh makin banyaknya zat terurai dan yang teruapkan.

3. Aktivasi

Pada proses karbonisasi, daya adsorpsi karbon tergolong masih rendah karena masih terdapat residu yang menutupi permukaan pori dan pembentukan pori-pori belum sempurna. Maka dari itu, perlu dilakukan proses aktivasi untuk meningkatkan luas permukaan dan daya adsorpsi karbon aktif.

Aktivasi adalah suatu perlakuan terhadap arang yang bertujuan untuk memperbesar pori yaitu dengan cara memecahkan ikatan hidrokarbon atau mengoksidasi molekul-molekul permukaan sehingga arang mengalami perubahan sifat, baik fisika maupun kimia, yaitu luas permukaannya bertambah besar dan berpengaruh terhadap daya adsorpsi (Sembiring, M.T. dan T. Sinaga, 2003).

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses aktivasi yaitu :

a. Waktu perendaman

Perendaman dengan bahan aktivasi ini dimaksudkan untuk menghilangkan atau membatasi pembentukan lignin, karena adanya lignin dapat membentuk senyawa tar.

b. Konsentrasi aktivator

Semakin tinggi konsentrasi larutan kimia aktivasi maka semakin kuat pengaruh larutan tersebut mengikat senyawa untuk keluar melewati mikropori karbon semakin *porous* yang mengakibatkan semakin besar daya adsorpsi karbon aktif tersebut. Karbon semakin banyak mempunyai mikropori setelah dilakukan aktivasi, hal ini terjadi karena aktivator telah mengikat senyawa-senyawa tar sisa karbonisasi keluar dari mikropori arang, sehingga permukaannya semakin *porous*.

c. Ukuran bahan

Semakin kecil ukuran atau diameter arang maka akan semakin besar daya serap karbon aktif tersebut karena pori-porinya semakin banyak.

Aktivasi karbon aktif dapat dilakukan melalui 2 cara, yaitu aktivasi secara kimia dan aktivasi secara fisika (Kinoshita, 1988).

a. Aktivasi secara fisika

Aktivasi fisika adalah proses pemutusan rantai karbon dari senyawa organik dengan bantuan panas, uap dan gas N_2 . Aktivasi secara fisika dapat dilakukan dengan pemanasan secara langsung dengan oksidasi gas. Gas-gas yang sering digunakan yaitu antara lain uap air, karbon dioksida, O_2 dan N_2 . Gas-gas tersebut berfungsi untuk mengembangkan struktur rongga yang ada pada arang, sehingga memperluas permukaannya dan menghilangkan konstituen yang mudah menguap serta membuang produksi tar atau hidrokarbon-hidrokarbon pengotor pada arang. Faktor-faktor yang berpengaruh dalam aktivasi secara fisika adalah jenis gas yang digunakan, suhu aktivasi dan laju alir gas pengoksida.

Proses aktivasi fisika biasanya membutuhkan suhu tinggi yaitu 600–900°C. Kondisi operasi tersebut membutuhkan energi listrik yang cukup

besar. Oleh karena itu, aktivasi fisika tidak ekonomis khususnya untuk skala industri kecil. Selain itu kelemahan proses ini adalah apabila partikel karbon yang diaktivasi berukuran besar, maka terjadi aktivasi terutama pada permukaan luar arang, sedangkan pada permukaan dalam hanya sedikit. Proses ini juga harus mengontrol tinggi suhu dan besarnya uap atau udara yang dipakai sehingga hasil karbon aktif dengan susunan karbon aktif yang padat dan pori yang luas.

b. Aktivasi secara kimia

Aktivasi kimia merupakan proses pemutusan rantai karbon dari senyawa organik dengan pemakaian bahan-bahan kimia. Aktivasi secara kimia biasanya menggunakan bahan-bahan pengaktif seperti garam kalsium klorida (CaCl_2), magnesium klorida (MgCl_2), seng klorida (ZnCl_2), natrium hidroksida (NaOH), natrium karbonat (Na_2CO_3) dan natrium klorida (NaCl).

Karbon aktif yang dihasilkan dengan menggunakan aktivasi kimia memiliki distribusi pori yang cocok digunakan sebagai adsorben tanpa pengolahan tahap lanjut. Dalam hal ini, karbon aktif yang diolah adalah karbon yang bersifat asam sehingga mereka tidak murni bila dibandingkan dengan karbon aktif menggunakan aktivasi fisika. Kelemahan dari aktivasi kimia dalam pembuatan karbon aktif adalah perlunya mencuci sisa bahan anorganik yang masih melekat dalam karbon aktif dan memberikan dampak negatif (polusi) yang mengakibatkan masalah yang serius. Karbon aktif dengan aktivasi kimia biasanya berbentuk bubuk. Apabila bahan baku butiran digunakan, maka akan dihasilkan pula karbon aktif butiran. Karbon aktif ini memiliki kekuatan mekanik yang lemah, dan tidak cocok digunakan untuk adsorpsi fasa gas.

2.2.5 Sifat-Sifat Karbon Aktif

Karbon aktif memiliki sifat-sifat yaitu diantaranya yaitu luas permukaan dan porositas (*porosity*).

1. Ukuran Partikel

Ukuran partikel karbon aktif mempengaruhi proses kecepatan adsorpsi,

tetapi tidak mempengaruhi kapasitas adsorpsi yang berhubungan dengan luas permukaan karbon.

2. Luas Permukaan

Semakin luas permukaan karbon aktif maka akan semakin meningkatkan daya serap karbon aktif tersebut.

3. Porositas (*Porosity*)

Selama proses aktivasi, terjadi proses pemisahan antara komponen berkarbon dengan komponen non-organik sehingga membentuk suatu ruang yang disebut dengan pori.

2.2.6 Kualitas Karbon Aktif

Kualitas karbon aktif dipengaruhi oleh jenis bahan baku. Bahan baku yang keras mempunyai berat jenis tinggi sehingga akan menghasilkan daya serap yang juga tinggi dibandingkan dengan bahan baku yang ringan dan mempunyai berat jenis rendah.

1. Kadar Air Terikat (*Inherent Moisture*)

Kandungan air merupakan air yang terkandung dalam karbon aktif setelah bahan baku berkarbon melalui tahap karbonisasi dan aktivasi kimia, baik terikat secara kimiawi maupun akibat pengaruh luar seperti iklim, ukuran butiran maupun proses penyaringan. Penetapan ini bertujuan untuk mengetahui sifat higroskopis arang aktif.

2. Kadar Zat terbang (*Volatile Matter*)

Zat terbang merupakan nilai yang menunjukkan persentase jumlah zat-zat terbang yang terkandung di dalam karbon aktif seperti H_2 , CO , CH_4 , dan uap-uap yang mengembun seperti tar, gas CO_2 dan H_2O .

3. Kadar Abu (*Ash Content*)

Abu di dalam karbon aktif merupakan kadar *mineral matter* yang terkandung di dalamnya yang tidak terbakar pada proses karbonisasi dan tidak terpisah pada proses aktivasi.

4. Kadar Karbon Tertambat (*Fixed Carbon*)

Penentuan karbon tertambat terikat bertujuan untuk mengetahui kandungan

karbon setelah proses karbonisasi dan aktivasi. Besar kecilnya kadar karbon tertambat pada arang aktif dipengaruhi oleh variasi kadar air, abu, dan zat terbang.

5. Daya Serap (Adsorpsi)

Karbon aktif merupakan adsorben yang paling banyak digunakan untuk menyerap zat-zat dalam larutan. Daya serap merupakan sifat karbon aktif yang paling penting. Daya serap karbon aktif dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu pH, temperatur dan waktu singgung.

2.2.7 Pemanfaatan Limbah Pertanian Sebagai Karbon Aktif

Kegunaan karbon aktif tersebut berkembang dalam skala besar dan komersial terutama untuk membersihkan gula bit dan sirup jagung dan juga untuk pembersihan air minum. Oleh karena adanya pembatasan suplai arang kelapa dari Filipina dan India selama Perang Dunia II pada tahun 1940, pengembangan karbon aktif mulai diproduksi tidak hanya dari tempurung kelapa, tetapi juga dari bahan baku batubara dan limbah pertanian lainnya seperti sekam padi, serbuk gergaji, tongkol jagung, ampas tebu, batang pisang, jerami padi, serabut kelapa, batang jagung, cangkang kelapa sawit, pelepah kelapa sawit, tandan kosong kelapa sawit, dan limbah pertanian lainnya yang berpotensi sebagai karbon aktif.

Limbah pertanian berpotensi menjadi karbon aktif karena merupakan biomaterial dengan kandungan selulosa yang cukup tinggi. Selulosa mempunyai potensi yang cukup besar untuk dijadikan penyerap karena gugus OH yang terikat pada selulosa apabila dipanaskan pada suhu tinggi akan kehilangan atom-atom hidrogen dan oksigen sehingga tinggal atom karbon yang terletak pada setiap sudutnya. Menurut Ahmedna *et al.*, (2000) limbah pengolahan hasil pertanian dan kehutanan yang mengandung lignoselulosa dengan kadar karbon lebih dari 45% merupakan bahan baku karbon aktif bermutu tinggi. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai karbon aktif selain tidak memerlukan biaya yang cukup banyak juga dapat meningkatkan kualitas lingkungan.

Banyak penelitian sebelumnya yang memanfaatkan limbah pertanian sebagai karbon aktif diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Ade Apriliani (2010) yang memanfaatkan ampas tebu sebagai karbon aktif untuk adsorben

logam Cu, Pb, Cd, dan Cr. Hasil analisis menunjukkan efisiensi penyerapan tertinggi dalam air limbah pada ion logam Pb sebesar 95,92% dan kapasitas penyerapan 0,3940 mg/g sedangkan efisiensi penyerapan terendah pada ion logam Cd dengan nilai 59,98% dan kapasitas penyerapan 0,4096 mg/g.

Naelatuz Zuhroh (2015) melakukan penelitian dengan memanfaatkan serabut kelapa sebagai karbon aktif untuk adsorben logam Cr (VI). Hasil penelitian menunjukkan arang aktif serabut kelapa memiliki kadar air sebesar 4,57%, kadar abu sebesar 3,71%, dan daya serap terhadap iod sebesar 414,911 mg/g. pH optimum yang diperlukan karbon aktif serabut kelapa untuk menurunkan kadar krom (VI) adalah pH 3 dengan daya adsorpsi sebesar 9,8440 mg/g sedangkan waktu setimbang yang diperlukan karbon aktif serabut kelapa untuk menurunkan kadar krom (VI) adalah pada waktu 2,5 jam dengan daya adsorpsi sebesar 8,4662 mg/g.

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai karbon aktif juga dilakukan oleh Elly Kurniati (2008) yang memanfaatkan cangkang kelapa sawit sebagai karbon aktif. Hasil terbaik diperoleh pada suhu karbonisasi 400°C selama 0,5 jam dengan waktu perendaman selama 22 jam dan konsentrasi aktivator 9%, didapat karbon aktif dengan kadar air 7,36%, kadar abu 2,77%, *volatile matter* 8,21%, dan daya serap terhadap iodine sebesar 19,80%.

Penelitian juga dilakukan oleh Istria Pijar Rizky (2015), dengan memanfaatkan tongkol jagung sebagai karbon aktif dengan aktivator HCl sebagai adsorben ion Cd (II). Kondisi optimum diperoleh pada pH 4, massa adsorben 0,4 gram, waktu kontak 60 menit dan konsentrasi logam pada 178,2912 ppm. Konsentrasi awal ion Cd(II) dalam 50 ml limbah yaitu 93,5639 ppm terjerap oleh karbon aktif tongkol jagung sebesar 30,5681 ppm, dan persentase adsorpsinya sebesar 32,67%.

2.2.8 Asam Klorida (HCl) Sebagai Aktivator

Bahan yang digunakan untuk mengaktivasi disebut aktivator. Jenis bahan kimia yang dapat digunakan sebagai aktivator adalah hidroksida logam alkali, garam-garam karbonat, klorida, sulfat, fosfor dari logam alkali tanah khususnya

$ZnCl_2$, asam-asam seperti HCl, H_2SO_4 , dan H_3PO_4 serta uap air pada suhu tinggi. Unsur- unsur mineral dari persenyawaan kimia yang ditambahkan tersebut akan meresap kedalam arang dan membuka permukaan yang semula tertutup oleh komponen kimia sehingga volume dan diameter pori bertambah.

Asam klorida (HCl) yang merupakan *activating agent* akan mengoksidasi karbon dan merusak permukaan bagian dalam karbon sehingga akan terbentuk pori dan meningkatkan daya adsorpsi. Penggunaan HCl sebagai aktivator juga efektif dalam membuat karbon aktif dikarenakan HCl merupakan aktivator yang baik karena lebih efektif menghasilkan karbon aktif yang memiliki daya adsorpsi yang cukup tinggi. Selain itu, HCl memiliki stabilitas termal yang baik dan memiliki karakter kovalen yang tinggi. Stabilitas termal berperan dalam mempertahankan kestabilan zat pengaktif dalam proses aktivasi yang dilakukan pada suhu tinggi sedangkan karakter kovalen berkaitan dengan interaksi kovalen antara arang dengan zat pengaktif yang berlangsung pada suhu tinggi. Unsur-unsur yang menyusun HCl berikatan secara kovalen polar. Dengan demikian, senyawa HCl lebih didominasi oleh karakter kovalen. Arang yang tersusun dari atom-atom C yang secara kovalen membentuk struktur heksagonal datar dengan satu atom C pada tiap sudut, akan berinteraksi lebih baik dengan zat yang memiliki karakter kovalen. Maka dari itu, HCl memiliki kemampuan berinteraksi yang baik dengan arang. Sifat fisik asam klorida dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Sifat Fisik Asam Klorida (HCl)

Sifat Fisik	Keterangan
Nama IUPAC	Asam Klorida
Rumus molekul	HCl dalam air (H ₂ O)
Massa atom relatif	36,46 g.mol ⁻¹
Titik didih	110°C (383 K) larutan 20,2% ; 48°C (321 K) larutan 38%
Titik lebur	-27,32°C (247 K) larutan 38%
Kelarutan dalam air	Tercampur penuh
Densitas	1,18 gr/cm ³
Penampilan	Cairan tidak berwarna sampai dengan kuning pucat
Keasaman	-6,3
Viskositas	1,9 mPa.s pada 25°C larutan 31,5%

Sumber : William L. Jolly, 1984

Sifat-sifat kimia HCl yaitu :

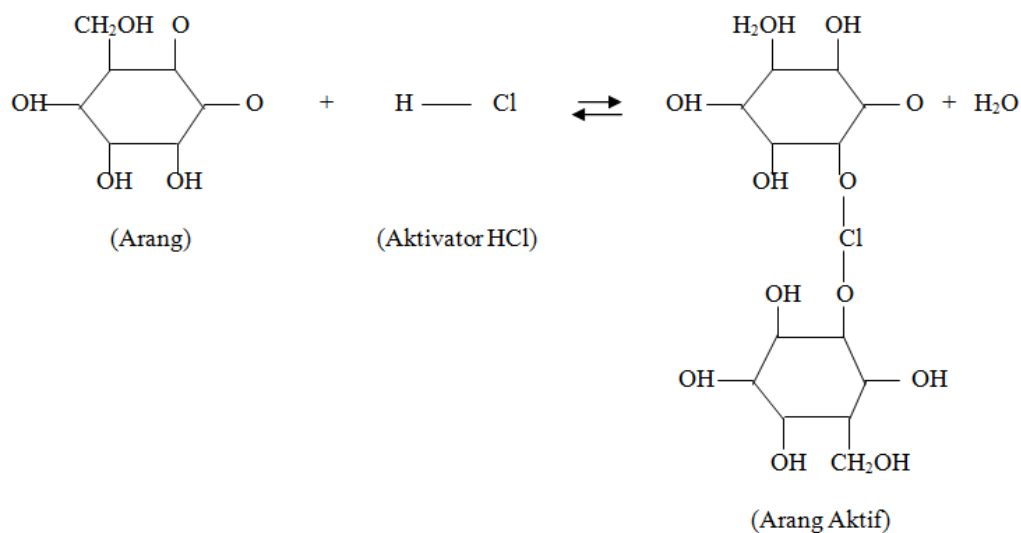
1. Bersifat korosif
2. HCl adalah asam monoprotik dan jika bereaksi dengan molekul air membentuk ion hidronium
3. Larutannya merupakan asam kuat dan jika bereaksi dengan asam senyawa seperti kalsium karbonat dan tembaga menghasilkan kloridaterlarut
4. HCl sulit menjalani reaksi redoks
5. HCl mengandung ion klorida yang tidak reaktif dan tidak beracun

Asam Klorida (HCl) merupakan *activating agent* yang bersifat asam. *Activating agent* yang bersifat asam, lebih baik digunakan untuk material selulosa. Hal ini dikarenakan material selulosa mengandung banyak oksigen. Asam akan bereaksi baik dengan oksigen pada selulosa sehingga aktivator HCl cocok untuk digunakan dalam pembuatan karbon aktif dari pelepah kelapa sawit, karena pelepah kelapa sawit merupakan bahan baku yang mengandung material

selulosa.

2.2.9 Mekanisme Pembentukan Pori pada Karbon Aktif

Aktivasi arang berarti penghilangan zat-zat yang menutupi pori-pori pada permukaan arang. Tujuan utama dari proses aktivasi adalah menambah atau mengembangkan volume pori dan memperbesar diameter pori yang telah terbentuk pada proses karbonisasi serta untuk membuat beberapa pori baru pada karbon aktif. Zat aktivator bersifat mengikat air yang menyebabkan air yang terikat kuat pada pori-pori karbon yang tidak hilang pada saat karbonisasi menjadi lepas. Selanjutnya zat aktivator tersebut akan memasuki pori dan membuka permukaan arang yang tertutup. Dengan demikian pada saat dilakukan aktivasi, senyawa pengotor yang berada dalam pori menjadi lebih mudah terserap sehingga luas permukaan karbon aktif semakin besar dan meningkatkan daya serapnya (Dabrowski et al., 2005; Li et al., 2008). Pada penelitian ini akan dilakukan aktivasi dengan menggunakan aktivator HCl, mekanisme aktivasi arang dengan larutan HCl ditunjukkan pada Gambar 7.

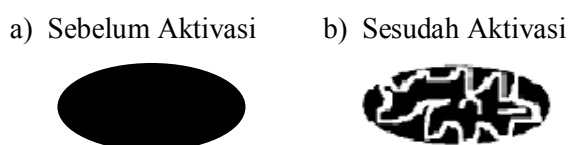


Sumber : Marit Jagtoyen dkk., 2006

Gambar 7. Mekanisme Aktivasi Karbon Aktif dengan Larutan HCl

Activating agent HCl ini berperan sebagai *dehydrating agent* yang akan mempengaruhi dekomposisi pirolisis, menghambat pembentukan tar, dan mengurangi pembentukan asam asetat, metanol, dan lain-lain (Manocha, 2003).

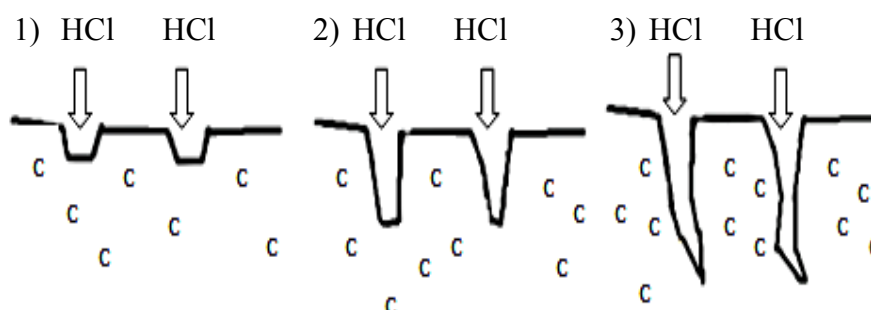
Arang atau karbon semakin banyak mempunyai mikro pori-pori setelah dilakukan aktivasi, hal ini karena aktivator telah mengikat senyawa-senyawa tar sisa karbonisasi keluar dari mikropori arang, sehingga permukaannya semakin *porous*. Terlihat pada Gambar 8 perubahan yang terjadi pada arang sebelum ataupun sesudah aktivasi.



Sumber : Sontheimer, 1985

Gambar 8. Struktur Karbon Aktif Sebelum dan Sesudah Aktivasi

Seiring bertambahnya konsentrasi aktivator yang digunakan dan waktu aktivasi dicapai, HCl sebagai *activating agent* akan bereaksi dengan karbon dan merusak bagian dalam karbon sehingga membentuk pori-pori yang semakin banyak terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Ilustrasi Pembentukan Pori Karbon Aktif Melalui Aktivasi

2.2.10 Kegunaan Karbon Aktif

Kegunaan karbon aktif dalam industri dapat berupa pemurnian gas, katalisator, sebagai penyaring dan penghilang bau pada industri obat dan makanan, penyaring air, penghilang bau dalam industri pengolahan air, sebagai pelarut yang dapat digunakan kembali, dan penyimpan energi (*gas adsorptive storage*) (Liou, 2010). Karbon aktif dalam kegunaannya bisa digunakan dalam fasa gas, cair dan lainnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kegunaan Karbon Aktif

Tujuan	Kegunaan
<u>Fasa Gas</u>	
• Pemurnian gas	• Desulfurisasi, menghilangkan gas beracun, bau busuk dan asap, menyerap racun.
• Pengolahan LNG	• Desulfurisasi dan penyaringan berbagai bahan mentah dan reaksi gas.
• Katalisator	• Reaksi katalisator atau pengangkutan vinil klorida dan vinil asetat.
• Lain-lain	• Menghilangkan bau dalam kamar dan mobil berpendingin.
<u>Fasa Cair</u>	
• Industri obat dan makanan	• Menyaring dan menghilangkan warna, bau, dan rasa yang tidak enak pada makanan.
• Industri minuman	• Menghilangkan warna, bau, dan rasa pada minuman, baik minuman ringan maupun minuman keras.
• Kimia perminyakan	• Penyulingan bahan mentah dan zat perantara.
• Pemurnian air	• Menghilangkan bau, warna, dan zat pencemar dalam air, sebagai pelindung dan penukar resin dalam penyulingan air.
• Pembersih air buangan	• Mengatur dan membersihkan air buangan dan pencemar serta menghilangkan warna, bau dan logam berat.
• Penambakan udang dan Benur	• Pemurnian air, menghilangkan bau dan warna.
• Pelarut yang digunakan kembali	• Penarikan kembali berbagai pelarut, sisa metanol, etil asetat dan lain-lain.
<u>Lain-lain</u>	
• Pengolahan pulp	• Pemurnian dan penghilangan bau
• Pengolahan pupuk	• Pemurnian
• Pengolahan emas	• Pemurnian
• Penyaringan minyak makan	• Menghilangkan bau, warna, dan rasa

Sumber : Pusat Dokumentasi dan Informasi Ilmiah, 1997

2.3 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi merupakan fungsi konsentrasi zat terlarut yang terserap pada padatan terhadap konsentrasi larutan. Persamaan yang dapat digunakan untuk menjelaskan data percobaan isoterm dikaji oleh Freundlich, Langmuir, serta Brunauer, Emmet dan Teller (BET). Tipe isoterm adsorpsi dapat digunakan untuk mempelajari mekanisme adsorpsi adsorpsi fase cair-padat pada umumnya menganut tipe isoterm Freundlich dan Langmuir. Adsorben yang baik memiliki kapasitas adsorpsi dan presentase penyerapan yang tinggi. Kapasitas adsorpsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Q = \frac{(C_0 - C_e)V}{W}$$

Kadar adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben dengan rumus berikut :

$$\text{Kadar adsorbat yang teradsorpsi (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100\%$$

Keterangan :

- Q = Kapasitas adsorpsi (mg/g)
- C₀ = Konsentrasi awal Ni (mg/l)
- C_e = Konsentrasi akhir Ni (mg/l)
- V = Volume sampel (l)
- W = Berat adsorben (gram)

2.3.1 Isoterm Langmuir

Tipe isoterm Langmuir merupakan proses adsorpsi yang berlangsung secara kimisorpsi satu lapisan. Kimisorpsi adalah adsorpsi yang terjadi melalui ikatan kimia yang sangat kuat antara sisi aktif permukaan dengan molekul adsorbat dan dipengaruhi oleh densitas elektron. Adsorpsi satu lapisan terjadi karena ikatan kimia biasanya bersifat spesifik, sehingga permukaan adsorben mampu mengikat adsorbat dengan ikatan kimia. Isoterm Langmuir diturunkan berdasarkan teori dengan persamaan :

$$\frac{V}{V_m} = \frac{bP}{1 + bP}$$

2.3.2 Isoterm Freundlich

Isoterm Freundlich merupakan isoterm yang paling umum digunakan dan dapat mencirikan proses adsorpsi dengan lebih baik. Isoterm Freundlich menggambarkan hubungan antara sejumlah komponen yang teradsorpsi per unit adsorben dan konsentrasi komponen tersebut pada kesetimbangan. Freundlich memformulasikan persamaan isotermnya sebagai berikut :

$$V = KP^{\frac{1}{n}} \quad (n = 1)$$

2.3.3 Isoterm Brenauer-Emmet-Teller

Salah satu karakteristik karbon aktif berkualitas ialah memiliki luas permukaan yang tinggi. Semakin besar luas permukaan karbon aktif, semakin besar pula daya adsorpsinya. Luas permukaan suatu adsorben dapat diketahui dengan alat pengukur luas permu-

kaan yang menggunakan prinsip metode BET. Pengukuran luas permukaan dengan model BET ini biasanya menggunakan nitrogen sebagai adsorbat. Adsorpsi isotermis dengan prinsip BET merupakan jenis adsorpsi fisis. Metode BET pertama kali ditemukan oleh Brenauer, Emmet, dan Teller pada tahun 1938. Metode BET ini merupakan pengembangan dari teori Langmuir. Teori Langmuir digunakan untuk adsorpsi monolayer kemudian dikembangkan menjadi teori BET yang menyatakan bahwa adsorpsi dapat terjadi di atas lapisan adsorbat monolayer sehingga teori dan model BET ini dapat digunakan untuk adsorpsi multilayer.

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C - 1) P}{V_m C P_0}$$

Keterangan :

$\frac{v}{v_m} = \theta$: derajat penutupan permukaan oleh adsorbat, V : volume gas yang

diadsorpsi, dan V_m : volume gas maksimum yang mungkin teradsorpsi

P_0 : tekanan uap jenuh gas

A, b, c, K, n merupakan konstanta

2.4 Pelepah Kelapa Sawit

Pelepah kelapa sawit (Gambar 10) merupakan bagian dari daun tanaman kelapa sawit yang berwarna hijau (lebih muda dari warna daunnya). Produksi pelepah sebanyak 22 batang per pohon per tahun dimana berat daging pelepah sekitar 2,2 kg dan biomasa pelepah sawit sebanyak mencapai 6,3 ton per ha per tahun. Pelepah kelapa sawit meliputi helai daun, setiap helainya mengandung lamina dan midrib, ruas tengah, petiol dan kelopak pelepah. Helai daun berukuran 55 cm hingga 65 cm dan mencakup dengan lebar 2,5 cm hingga 4 cm. Setiap pelepah mempunyai lebih kurang 100 pasang helai daun. Jumlah pelepah yang dihasilkan meningkat 30-40 batang ketika berumur 3-4 tahun (Balai Penelitian Ternak, 2003).



Sumber : Koran Agribisnis, 2016

Gambar 10. Pelepah Kelapa Sawit

Pelepah kelapa sawit biasanya digunakan sebagai bahan pakan untuk hewan ternak. Kandungan dari pelepah kelapa sawit yang mempunyai serat (NDF dan ADF) yang tersedia dalam volume besar inilah yang menjadi salah satu faktor penting untuk pelepah kelapa sawit dapat dijadikan bahan baku pakan ternak. Kandungan senyawa kimia penyusun pada pelepah kelapa sawit (Tabel 5) terdiri dari selulosa, hemiselulosa, lignin, dan silika secara berurutan yaitu 31,7%, 33,9%, 17,4%, dan 0,6%.

Tabel 5. Kandungan Senyawa Kimia Penyusun pada Pelepah Kelapa Sawit

Unsur kimiawi	Pelepah kelapa sawit (%)
Selulosa	31,7
Hemiselulosa	33,9
Lignin	17,4
Silika	0,6

Sumber : Ginting dan Elizabeth, 2013

2.5 Logam Nikel (Ni)

Nikel (Gambar 11) ditemukan oleh A.F. Cronstedt pada tahun 1751 dalam mineral yang disebutnya *kupfernickel* (nikolit). Nikel adalah unsur kimia metalik dalam tabel periodik yang memiliki simbol Ni dan nomor atom 28. Nikel mempunyai sifat tahan karat. Dalam keadaan murni, nikel bersifat lembek, tetapi jika dipadukan dengan besi, krom, dan logam lainnya, dapat membentuk baja tahan karat yang keras. Perpaduan nikel, krom dan besi menghasilkan baja tahan karat (*stainless steel*) yang banyak diaplikasikan pada peralatan dapur (sendok dan peralatan memasak), ornamen-ornamen rumah dan gedung, serta komponen industri.



Sumber : M. Carnes et al, 2009

Gambar 11. Logam Nikel (Ni)

Nikel merupakan komponen yang banyak ditemukan dalam meteorit dan menjadi ciri komponen yang membedakan meteorit dari mineral lainnya. Meteorit besi atau siderit, dapat mengandung alloy besi dan nikel berkadar 5–

25%. Nikel diperoleh secara komersial dari pentlandit dan pirotit di kawasan Sudbury Ontario, sebuah daerah yang menghasilkan 30% kebutuhan dunia akan nikel. Deposit nikel lainnya ditemukan di Kaledonia Baru, Australia, Cuba, dan Indonesia.

2.5.1 Sifat Fisik Nikel

Logam nikel merupakan logam berat yang berwarna putih keperak-perakan dengan pemolesan tingkat tinggi. Bersifat keras, mudah ditempa, sedikit ferromagnetis, dan merupakan konduktor yang agak baik terhadap panas dan listrik. Nikel tergolong dalam grup logam besi- kobal, yang dapat menghasilkan *alloy* yang sangat berharga. Senyawa nikel umumnya bersifat bivalen, meskipun terdapat pula tingkat valensi lainnya. Unsur ini juga membentuk sejumlah senyawa kompleks. Sebagian besar senyawa nikel berwarna biru atau hijau. Sifat logam nikel yang lainnya terdapat pada Tabel 6.

Tabel 6. Sifat Fisik Logam Nikel

Sifat Fisik	Keterangan
Simbol	Ni
Nomor atom	28
Massa atom relatif	58,6934 g.mol ⁻¹
Titik didih	2913°C (3186 K, 5275°F)
Titik lebur	1455°C (1728 k, 2651°F)
Kalor penguapan	377,5 kJ.mol ⁻¹
Kalor peleburan	17,48 kJ.mol ⁻¹
Klasifikasi	Logam transisi
Struktur Kristal	Kubik
Densitas 293 K	8,9 g.cm ⁻³

Sumber : M. Carnes et al, 2009

2.5.2 Sifat Kimia Nikel

Adapun sifat kimia dari logam nikel yaitu :

1. Pada suhu kamar, reaksi dengan udara lambat
2. Jika dibakar, reaksi berlangsung cepat membentuk oksida NiO
3. Dengan Cl_2 membentuk Klorida (NiCl_2)
4. Dengan *steam* H_2O membentuk Oksida NiO
5. Dengan HCl encer dan asam sulfat encer, reaksi berlangsung lambat
6. Tidak beraksi dengan basa alkali
7. Bereaksi dengan H_2S menghasilkan endapan hitam dalam larutan akuatik $\text{Ni}[\text{H}_2\text{O}]_6^{2+}$ hijau.

2.5.3 Efek Toksik dari Nikel

Nikel adalah logam yang banyak ditemukan di berbagai produk, baik dari handphone sampai ke perhiasan dan bahkan ditemukan juga di kepala ikat pinggang, dan logam ini sangat sering menimbulkan radang pada kulit akibat kontak, demikian penelitian yang dilakukan oleh Mayo Clinic di Amerika.

Pada umumnya, orang bisa terpapar Ni di tempat kerja dalam produksi atau proses yang menggunakan bahan Ni atau bisa juga melalui kontak dengan perhiasan yang mengandung Ni, *stainless steel*, serta peralatan masak yang mengandung Ni atau berbahan asam tembakau.

Paparan nikel (Ni) bisa terjadi melalui inhalasi, oral, dan kontak kulit. Reaksi Ni dan karbon monoksida (CO) menghasilkan nikel karbonil ($\text{Ni}[\text{CO}]_4$) yang bisa terurai menjadi Ni dan CO pada pemanasan 200°C . Proses tersebut merupakan metode yang mudah untuk pemurnian Ni. Nikel karbonil bersifat lebih toksik dan bisa mengganggu kesehatan masyarakat dibandingkan senyawa nikel lainnya dikarenakan nikel karbonil berbentuk cairan yang mudah menguap (*volatile liquid*) dan banyak digunakan dalam berbagai industri sehingga risiko manusia terkontaminasi nikel karbonil sangat tinggi. Gejala awal dari paparan $\text{Ni}(\text{CO})_4$ berupa sakit kepala, mual, muntah, epigastrik, sakit dada, yang disertai gejala batuk-batuk, *hiperpnea*, sianosis, sakit lambung dan usus, serta keadaan lemah. Gejala-gejala tersebut bisa disertai berbagai gejala demam, leukosistosis, dan pneumonia yang parah, kegagalan pernafasan, kadang-kadang edema serebral, yang kemudian dapat mengakibatkan kematian. Berdasarkan hasil autopsi

terhadap korban yang meninggal akibat paparan $\text{Ni}(\text{CO})_4$, diketahui bahwa kadar Ni tertinggi adalah di paru-paru selanjutnya dalam jumlah rendah terdapat di ginjal, hati, dan otak.

Paparan akut Ni dosis tinggi melalui inhalasi bisa mengakibatkan kerusakan berat pada paru-paru dan ginjal serta gangguan gastrointestinal berupa mual, muntah, dan diare. Berdasarkan uji toksisitas akut pada hewan, diketahui bahwa tingkat toksisitas bervariasi dipengaruhi oleh tingkat kelarutan senyawa Ni. Senyawa larut seperti nikel asetat lebih toksik dibandingkan senyawa Ni yang tidak larut, seperti *nickel powder*.

Paparan Ni lewat kulit secara kronis bisa menimbulkan gejala, antara lain dermatitis nikel berupa eksema (kulit kemerahan, gatal) pada jari-jari, tangan, pergelangan tangan, serta lengan. Paparan kronis Ni secara inhalasi bisa mengakibatkan gangguan pada alat pernafasan, berupa asma, penurunan fungsi paru-paru, serta bronkitis. Paparan inhalasi nikel oksida, nikel subsulfida, nikel sulfat heptahidrat pada hewan uji bisa mengakibatkan munculnya gangguan paru-paru dan gangguan sistem imunitas. Tingginya kadar Ni dalam jaringan tubuh manusia bisa mengakibatkan munculnya berbagai efek samping, yaitu akumulasi Ni pada kelenjar pituitari yang bisa mengakibatkan depresi sehingga mengurangi sekresi hormon prolaktin di bawah normal. Akumulasi Ni pada pankreas bisa menghambat sekresi hormon insulin. Konsumsi makanan mengandung Ni 600 mg/hari sudah menunjukkan toksisitas pada manusia (MD'S Choice Inc, 2000).