

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Biomassa Alga

Alga merupakan mikroorganisme yang mendominasi lingkungan akuatik, bersel tunggal, berkoloni, dan ada juga yang multi sel. Alga dapat dimanfaatkan sebagai biomassa, hasil-hasil peneliti terdahulu menyatakan bahwa gugus-gugus fungsional yang terdapat dalam biomassa berperan dalam adsorpsi logam. Berbagai jenis alga terdapat di lautan, antara lain alga hijau, alga coklat dan alga merah. Ditinjau secara biologi, alga merupakan tumbuhan yang berklorofil, terdiri dari satu atau banyak sel dan berbentuk koloni. Alga memiliki banyak kandungan didalamnya seperti bahan-bahan organik yakni polisakarida, hormon, vitamin, mineral dan juga senyawa bioaktif (Setiawan, 2004). *Chaetoceros* sp merupakan salah satu jenis alga yang termasuk spesies alga coklat (*phaeophyceae*). Warna alga coklat disebabkan adanya pigmen coklat (fukosantin), yang secara dominan menyelubungi warna hijau dari klorofil pada jaringan. Selain fukosantin, alga coklat juga mengandung pigmen lain seperti klorofil a, klorofil c, violaxantin, - karotein, dan diadinoxantin (Pratiwi, 2000).

Gugus fungsi yang terdapat dalam alga mampu melakukan pengikatan dengan ion logam. Gugus fungsi tersebut terutama adalah gugus karboksil, hidroksil, sulfidril, amino, imidazol, sulfat, dan sulfonat yang terdapat didalam dinding sel dalam sitoplasma (Putra, 2006). Adsorpsi ion logam terjadi karena terdapatnya berbagai jenis gugus fungsi yang terdapat pada sel hidup atau mati yaitu gugus karboksil, hidroksil, dan sulfat. Akan tetapi kemampuan alga dalam menyerap ion-ion logam sangat dibatasi oleh beberapa kelemahan seperti ukurannya yang sangat kecil, berat jenisnya yang rendah dan mudah rusak karena terdegradasi oleh mikroorganisme lain. Untuk mengatasi kelemahan tersebut berbagai upaya dilakukan, diantaranya dengan mengimmobilisasi biomasanya. Immobilisasi biomassa dapat dilakukan dengan menggunakan silika gel (Harris and Ramelow,1990).

Syarat suatu bahan sebagai matrik pendukung antara lain (1) mempunyai sisi aktif terutama mengandung gugus aktif yang reaktif, (2) mempunyai permukaan yang luas, (3) memiliki kapasitas pengikatan yang tinggi, (4) mempunyai daya tahan yang baik terhadap perubahan-perubahan pelarut kimia. Beberapa matrik pendukung yang dapat digunakan sebagai pengimmobilisasi antara lain: poli etil akrilat, etilen glikol, dimetakrilat (Latifah, 1998) dan silika gel (Buhani, 2003). Menurut Lan *et al.*, 1998, peningkatan adsorpsi biomassa alga dengan mengimmobilisasi melalui enkapsulasi silika gel dapat mempertahankan dan meningkatkan keefektifan gugus fungsi, kualitas fisik dan kimia dari biomassa alga sehingga efektif dalam menyerap ion logam berat.

Dalam pengolahan limbah industri yang mengandung logam berat, pemanfaatan alga baik dalam bentuk biomassa bebas maupun yang terimmobilisasi sebagai biosorben tidak diragukan lagi, karena metode ini sangat efisien, biaya relatif murah, hasil samping tidak berbahaya, biosorben dapat diregenerasi, dan ion logam yang teradsorpsi dapat *di-recovery* kembali (Volesky, 1998).

B. Silika Gel

Silika gel merupakan silika amorf yang tersusun dari tetrahedral SiO_4 yang tersusun secara tidak beraturan dan beragregasi membentuk kerangka tiga dimensi yang terbentuk karena kondensasi asam orthosilikat. Struktur satuan mineral silika pada dasarnya mengandung kation Si^{4+} yang terkoordinasi secara tetrahedral dengan anion O^{2-} . Rumus kimia silika gel secara umum adalah $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Oscik, 1982).

Silika gel memiliki sifat permukaan yang kompleks, gugus hidroksil yang tersebar tak beraturan dan masing-masing gugus terhidrasi dengan satu atau beberapa molekul air.

Meskipun gugus siloksan juga terdapat dipermukaan silika gel, namun adsorpsi spesifik pada material ini lebih tergantung pada gugus hidroksil (Oscik, 1982).

Kemampuan adsorpsi silika gel dipengaruhi oleh adanya situs aktif pada permukaannya yakni berupa gugus silanol (Si-OH) dan gugus siloksan (Si-O-Si).

Sifat adsorpsi silika gel ditentukan oleh orientasi dari ujung tempat gugus hidroksi yang berkombinasi (Hartono dkk., 2002).

Pada kehidupan kita saat ini, silika gel digunakan sebagai matriks pendukung. Tong and Ramelow (1994) menggunakan silika gel karena silika gel sangat mudah dibuat

dengan ukuran-ukuran mesh tertentu dan berfungsi sebagai adsorben yang baik untuk metode kolom serta penggunaan kembali setelah disimpan dalam keadaan kering selama beberapa tahun. Silika banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan yaitu sangat inert, hidrofilik dan biaya sintesis rendah. Di samping itu, bahan ini mempunyai kestabilan termal dan mekanik cukup tinggi, relatif tidak mengembang dalam pelarut organik jika dibandingkan dengan padatan polimer organik (Ghoul *et al.*, 1996).

Adapun kelemahan dari penggunaan silika gel adalah rendahnya efektivitas dan selektivitas permukaan dalam berinteraksi dengan ion logam berat sehingga silika gel tidak mampu berfungsi sebagai adsorben yang efektif yang ada hanya berupa gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si). Akan tetapi kekurangan ini dapat diatasi dengan memodifikasi permukaan dengan menggunakan situs aktif yang sesuai untuk mengadsorpsi ion logam berat yang dikehendaki (Nuzula, 2004).

C. Magnetit (Fe₃O₄)

Magnetit atau oksida besi hitam merupakan oksida besi yang paling kuat sifat magnetisnya (Teja and Koh, 2008). Magnetit yang berukuran nano banyak dimanfaatkan pada proses-proses industri (misalnya sebagai tinta cetak, pigmen pada kosmetik) dan pada penanganan masalah-masalah lingkungan (misalnya sebagai *magnetitic carrier precipitation process* untuk menghilangkan anion atau pun ion logam dari air dan air limbah) (Cabrera *et al.*, 2007). Magnetit mempunyai rumus

kimia Fe_3O_4 dan mempunyai struktur spinel dengan sel unit kubik yang terdiri dari 32 ion oksigen, celah-celahnya ditempati oleh ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} . Nanopartikel magnetit sangat intensif dikembangkan karena sifatnya yang menarik dalam aplikasinya di berbagai bidang, seperti fluida dan gel magnetit, katalis, pigmen pewarna, dan diagnosa medik. Beberapa sifat nanopartikel magnetit ini bergantung pada ukurannya. Magnetit ini akan bersifat superparamagnetik ketika ukuran suatu partikel magnetisnya di bawah 10 nm pada suhu ruang, artinya bahwa energi termal dapat menghalangi anisotropi energi penghalang dari sebuah nanopartikel tunggal. Karena itu, sintesis nanopartikel yang seragam dengan mengatur ukurannya menjadi salah satu kunci masalah dalam ruang lingkup sintesis ini (Hook and Hall, 1991).

D. Logam Berat

Logam berat merupakan elemen yang berbahaya di permukaan bumi. Logam berat merupakan salah satu sumber polusi lingkungan, dimana logam berat dapat ditransfer dalam jangkauan yang sangat jauh di lingkungan, selanjutnya berpotensi mengganggu kehidupan biota lingkungan dan akhirnya berpengaruh terhadap kesehatan manusia walaupun dalam jangka waktu yang lama dan jauh dari sumber polusi utamanya (Suhendrayatna, 2001). Beberapa faktor yang mempengaruhi aktivitas keracunan setiap jenis logam antara lain: bentuk senyawa dari logam tersebut, daya kelarutan dalam cairan, ukuran partikel dan beberapa sifat kimia dan sifat fisiknya (Palar, 1994).

Adapun sifat-sifat logam berat menurut Sasongko (2002) yaitu:

1. Sulit didegradasi, sehingga mudah terakumulasi dalam lingkungan perairan dan keberadaannya secara alami sulit terurai atau berubah.
2. Dapat terakumulasi dalam organisme termasuk kerang dan ikan, yang nantinya dapat membahayakan kesehatan manusia yang mengkonsumsinya.
3. Mudah terakumulasi di sedimen, sehingga konsentrasinya selalu lebih tinggi dari konsentrasi logam dalam air.

1. Logam Seng (Zn)

Seng adalah unsur kimia dengan lambang Zn, dengan nomor atom 30 dan massa relatif 65,39. Seng tidak diperoleh bebas di alam, melainkan dalam bentuk terikat. Mineral yang mengandung seng di alam bebas antara lain kelamin, franklinit, smithsonit, willenit, dan zinkit. Seng merupakan logam putih kebiruan dan logam ini cukup reaktif. Seng melebur pada 410°C dan mendidih pada 906°C (Cotton dan Wilkinson, 1989). Seng dilepaskan ke lingkungan oleh proses alam, namun sebagian besar berasal dari kegiatan manusia seperti pertambangan, produksi baja, pembakaran batu bara, dan pembakaran sampah. Sebagian besar seng di dalam tanah tetap terikat pada partikel tanah. Toksisitas akut yang ditimbulkan oleh seng adalah kekeringan tenggorokan, batuk, kelemahan, menggigil, demam, mual dan muntah (Widowati dkk., 2008).

2. Logam Nikel (Ni)

Nikel adalah logam putih perak yang keras, bersifat liat, dapat ditempa dan sangat kukuh. Logam ini melebur pada 1455°C dan bersifat sedikit magnetitis. Dalam tabel periodik unsur kimia, Ni menempati posisi dengan nomor atom (NA) 28 dan mempunyai bobot atau berat atom (BA) 58,71 (Svehla, 1990). Unsur Ni berhubungan dengan batuan basa yang disebut norit. Ni ditemukan dalam mineral pentlandit, dalam bentuk lempeng-lempeng halus dan butiran kecil bersama pyrrhotin dan kalkopirit. Ni biasanya terdapat dalam tanah yang terletak di atas batuan basa (Cotton dan Wilkinson, 1989). Ni banyak digunakan dalam industri pembuatan baterai listrik, penyepuhan listrik, kontak listrik dan alat sejenis serta katalis. Ni juga dilepaskan ketika terjadi gasifikasi batu bara. Peleburan dan penggunaan dalam industri cenderung meningkatkan kadarnya dalam lingkungan. Ni dapat bersifat sebagai karsinogen. Kanker hidung merupakan jenis neoplasma utama, akan tetapi Ni juga menginduksi kanker paru-paru, laring, lambung, dan ginjal. Logam ini dapat menimbulkan hipersensitivitas terhadap kulit. Reaksi ini biasanya muncul setelah kontak dengan barang logam yang mengandung Ni, misalnya uang logam dan perhiasan (Lu, 1995).

E. Proses Sol Gel

Sol-gel adalah suatu suspensi koloid dari partikel silika yang digelkan ke bentuk padatan. Sol adalah suspensi dari partikel koloid pada suatu cairan atau molekul polimer (Rahaman, 1995).

Proses sol-gel berlangsung melalui langkah-langkah sebagai berikut :

1. Hidrolisis dan kondensasi
2. *Gelation* (transisi sol-gel)
3. *Aging* (pertumbuhan gel)
4. *Drying* (pengeringan)

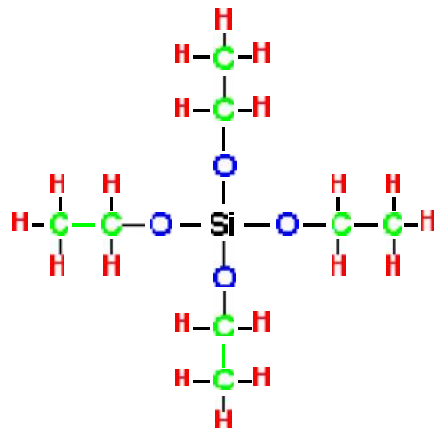
Melalui polimerisasi kondensasi akan terbentuk dimer, trimer, dan seterusnya sehingga membentuk bola-bola polimer. Sampai pada ukuran tertentu (diameter sekitar 1,5 nm) dan disebut sebagai partikel silika primer. Gugus silanol permukaan partikel bola polimer yang berdekatan akan mengalami kondensasi disertai pelepasan air sampai terbentuk partikel sekunder dengan diameter sekitar 4,5 nm. Pada tahap ini larutan sudah mulai menjadi gel ditandai dengan bertambahnya viskositas. Gel yang dihasilkan masih sangat lunak dan tidak kaku yang disebut *alkogel* (Farook and Ravendran, 2000).

Tahap selanjutnya adalah proses pembentukan gel. Pada tahap ini, kondensasi antara bola-bola polimer terus berlangsung membentuk ikatan siloksan menyebabkan menurunnya jari-jari partikel sekunder dari 4,5 nm menjadi 4 nm dan akan teramati penyusutan *alkogel* yang diikuti dengan berlangsungnya eliminasi larutan garam (Jamarun, 2000).

Tahap akhir pembentukan silika gel adalah *xerogel* yang merupakan fasa silika yang telah mengalami pencucian dan pemanasan. Pemanasan pada temperatur 110°C mengakibatkan dehidrasi pada *hidrogel* dan terbentuknya silika gel dengan struktur

$\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Enymia *et al.*, 1998). Produk akhir yang dihasilkan berupa bahan amorf dan keras yang disebut silika gel kering (Kalapathy *et al.*, 2000).

Tetraetilortosilikat (TEOS) memiliki rumus kimia $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$. Pada proses sol-gel, bahan dasar yang digunakan untuk membuat sol dapat berupa logam alkoksida seperti TEOS. TEOS mudah terhidrolisis oleh air dan mudah digantikan oleh gugus OH. Selanjutnya silanol (SI-OH) direaksikan antara keduanya atau direaksikan dengan gugus alkoksida non-hidrolisis untuk membentuk ikatan siloksan (Si-O-Si) dan mulailah terbentuk jaringan silika.



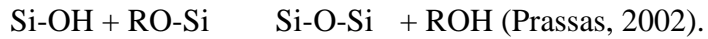
Gambar 1. Struktur TEOS (Brinker and Scherer, 1990)

Reaksi pada proses sol-gel dapat dilihat pada persamaan berikut:

- Reaksi Hidrolisis



- Reaksi Polikondensasi



Jaringan silika amorf 3 dimensi (3D) dapat terbentuk pada temperatur ruang.

Viskositas secara kontinu meningkat dimana pada saat itu larutan akan menjadi gel.

Parameter yang berpengaruh pada reaksi adalah pH, kandungan air, konsentrasi, temperatur dan kondisi pengeringan (Prassas, 2002).

F. Adsorpsi

Adsorpsi adalah akumulasi partikel pada permukaan. Zat yang mengadsorpsi disebut adsorben sedangkan yang teradsorpsi disebut adsorbat. Adsorpsi yang terjadi antara adsorben dengan adsorbat dapat dibedakan dengan adsorpsi fisika (*physisorption*) dan adsorpsi kimia (*chemisorption*). Jika adsorbat dan permukaan adsorben berinteraksi hanya dengan gaya van der Waals, maka yang terjadi adalah adsorpsi fisika. Molekul yang teradsorpsi terikat secara lemah pada permukaan dan panas adsorpsi rendah sehingga naiknya temperatur ditandai dengan turunnya jumlah adsorpsi. Dalam adsorpsi kimia partikel molekulnya pada permukaan dan membentuk ikatan kimia kovalen (Atkins, 1997).

Adsorpsi merupakan fenomena yang terjadi pada permukaan. Adsorpsi secara umum didefinisikan sebagai akumulasi sejumlah molekul, ion atau atom yang terjadi pada batas antara dua fasa. Adsorpsi menyangkut akumulasi atau pemutusan substansi adsorbat pada adsorben dan pada hal ini dapat terjadi pada antar muka dua fasa. Fasa

yang menyerap disebut adsorben dan fasa yang terserap disebut adsorbat.

Kebanyakan adsorben adalah bahan-bahan yang memiliki pori karena berlangsung terutama pada dinding-dinding pori atau letak-letak tertentu didalam adsorben (Alberty and Daniel, 1987). Menurut Oscik (1982), adsorpsi merupakan proses akumulasi adsorbat pada permukaan adsorben yang disebabkan oleh gaya tarik antar molekul atau suatu akibat dari medan gaya pada permukaan padatan (adsorben) yang menarik molekul-molekul gas, uap atau cairan.

Gaya tarik-menarik dari suatu padatan dibedakan menjadi dua jenis gaya, yaitu gaya fisika dan gaya kimia yang masing-masing menghasilkan adsorpsi fisika (*physisorption*) dan adsorpsi kimia (*chemisorption*) (Oscik, 1982). Adsorpsi fisika adalah proses interaksi antara adsorben dengan adsorbat yang melibatkan gaya-gaya antar molekul seperti gaya van der Waals, sedangkan adsorpsi kimia terjadi jika interaksi adsorben dan adsorbat melibatkan pembentukan ikatan kimia. Dalam proses adsorpsi melibatkan berbagai macam gaya yakni gaya van der Waals, gaya elektrostatik, ikatan hidrogen serta ikatan kovalen (Martell and Hancock, 1996).

Proses adsorpsi larutan secara teoritis berlangsung lebih rumit dibandingkan proses adsorpsi pada gas, uap atau cairan murni. Hal ini disebabkan pada adsorpsi larutan melibatkan persaingan antara komponen larutan dengan situs adsorpsi. Proses adsorpsi larutan dapat diperkirakan secara kualitatif dari polaritas adsorben dan komponen penyusun larutan. Kecenderungan adsorben polar lebih kuat menyerap adsorbat polar dibandingkan adsorbat non-polar, demikian pula sebaliknya.

Kelarutan adsorbat dalam pelarut umumnya substansi hidrofilik sukar teradsorpsi dalam larutan encer (Shaw, 1983).

1. Kinetika adsorpsi

Kinetika kimia mencakup suatu pembahasan tentang kecepatan (laju) reaksi dan bagaimana proses reaksi berlangsung. Laju reaksi merupakan laju yang diperoleh dari perubahan konsentrasi reaktan dalam suatu satuan waktu pada persamaan reaksi kimia yang mengalami kesetimbangan. Laju reaksi bergantung pada konsentrasi reaktan, tekanan, temperatur dan pengaruh katalis (Oxtoby, 1990).

Analisa kinetika didasarkan pada kinetika reaksi terutama pseudo orde pertama atau mekanisme pseudo pertama bertingkat. Untuk meneliti mekanisme adsorpsi, konstanta kecepatan reaksi sorpsi kimia untuk ion-ion logam, digunakan persamaan sistem pseudo orde pertama oleh Lagergren dan sistem pseudo orde kedua (Buhani *et al.*, 2010). Persamaan pseudo orde satu adalah persamaan yang biasa digunakan untuk menggambarkan adsorpsi dan ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (1)$$

Dimana q_e adalah jumlah ion logam yang teradsorpsi pada keadaan setimbang (mg g^{-1}), q_t adalah jumlah ion logam yang teradsorpsi pada waktu tertentu (mg g^{-1}), t adalah waktu (menit) dan k_1 adalah konstanta laju pseudo orde pertama (menit^{-1}).

Persamaan dapat diintegrasikan dengan memakai kondisi-kondisi batas $q_t = 0$ pada $t = 0$ dan $q_t = q_t$ pada $t = t$, persamaan menjadi:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

Model persamaan pseudo orde dua dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (3)$$

Dengan q_e adalah jumlah ion logam yang teradsorpsi pada keadaan setimbang (mg g^{-1}), q_t adalah jumlah ion logam yang teradsorpsi pada waktu tertentu (mg g^{-1}), k_2 adalah konstanta laju pseudo orde kedua (dalam $\text{g mmol}^{-1} \text{menit}^{-1}$). Setelah integrasi dan penggunaan kondisi-kondisi batas $q_t = 0$ pada $t = 0$ dan $q_t = q_t$ pada $t = t$, persamaan linier dapat diperoleh sebagai berikut :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

Laju penyerapan awal, h ($\text{mg g}^{-1} \text{menit}$) sedangkan $t = 0$ dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$h = k_2 q_e^2 \quad (5)$$

Laju adsorpsi awal (h), kapasitas adsorpsi kesetimbangan (q_e) dan konstanta laju pseudo orde dua (k_2) dapat ditentukan secara eksperimen dari slop dan intersep plot dari t/q_t versus t (Ho and McKay, 1998).

2. Kapasitas adsorpsi

Keseimbangan adsorpsi yaitu suatu penjabaran secara matematika suatu kondisi isotermal yang khusus untuk setiap sorbat/sorben. Jadi untuk masing-masing bahan penyerap (adsorben) dan bahan yang diserap (adsorbat) memiliki keseimbangan adsorpsi tersendiri dimana jumlah zat yang diserap merupakan fungsi konsentrasi pada temperatur tetap (Husin and Rosnelly, 2005).

Model keseimbangan adsorpsi yang sering digunakan untuk menentukan keseimbangan adsorpsi adalah isotermal Langmuir dan Freundlich.

a. Model isoterm adsorpsi Langmuir

Model kinetika adsorpsi Langmuir ini berdasarkan pada asumsi sebagai berikut: laju adsorpsi akan bergantung pada faktor ukuran dan struktur molekul adsorbat, sifat pelarut dan porositas adsorben, situs pada permukaan yang homogen dan adsorpsi terjadi secara *monolayer*. Proses adsorpsi heterogen memiliki dua tahap, yaitu: (a) perpindahan adsorbat dari fasa larutan ke permukaan adsorben dan (b) adsorpsi pada permukaan adsorben. Tahap pertama akan bergantung pada sifat pelarut dan adsorbat yang terkontrol (Oscik, 1982).

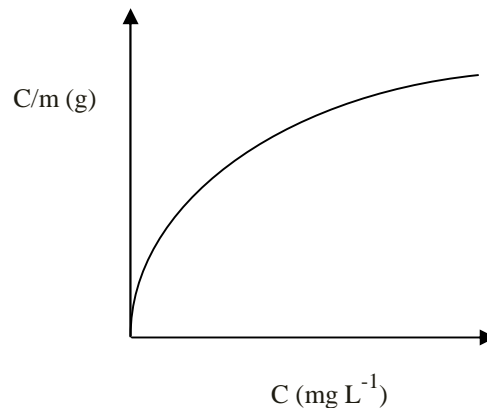
Bagian yang terpenting dalam proses adsorpsi yaitu situs yang dimiliki oleh adsorben yang terletak pada permukaan, akan tetapi jumlah situs-situs ini akan berkurang jika permukaan yang tertutup semakin bertambah (Husin and Rosnelly, 2005).

Persamaan isoterm adsorpsi Langmuir tersebut ditulis dalam bentuk persamaan linier yaitu sebagai berikut:

$$\frac{C}{m} = \frac{1}{bK} + \frac{C}{b} \quad (6)$$

Dengan C adalah konsentrasi kesetimbangan (mg L^{-1}), m adalah jumlah logam yang teradsorpsi per gram adsorben pada konsentrasi C (mmol g^{-1}), b adalah jumlah ion logam yang teradsorpsi saat keadaan jenuh (kapasitas adsorpsi) (mg g^{-1}) dan K adalah konstanta kesetimbangan adsorpsi (L mol^{-1}). Dari kurva linier hubungan antara C/m versus C maka dapat ditentukan nilai b dari kemiringan (slop) dan K dari intersep kurva (Oscik, 1982).

Adapun grafik isoterm adsorpsi Langmuir diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Isoterm adsorpsi Langmuir (Husin and Rosnelly, 2005)

Berdasarkan harga energi adsorpsinya, fenomena adsorpsi diperkirakan terjadi akibat adanya gaya-gaya yang tidak setimbang pada batas antar permukaan, sehingga

mengakibatkan perubahan jumlah molekul, atom atau ion. Proses adsorpsi melibatkan berbagai gaya yaitu: gaya Van der Waals, ikatan hidrogen, gaya elektrostatik (ikatan ionik), dan ikatan kovalen koordinasi, maka dapat diperkirakan jenis adsorpsi yang terjadi (Adamson and Gast, 1990). Adsorpsi fisika (fisisorpsi) melibatkan gaya antarmolekular diantaranya gaya Van der Waals dan ikatan hidrogen. Sedangkan adsorpsi kimia (kemisorpsi) melibatkan ikatan kovalen koordinasi akibat pemakaian bersama pasangan elektron oleh adsorbat dan adsorben (Oscik, 1982).

b. Model isoterm adsorpsi Freundlich

Model isoterm Freundlich menjelaskan bahwa proses adsorpsi pada bagian permukaan adalah heterogen dimana tidak semua permukaan adsorben mempunyai daya adsorpsi. Model isoterm Freundlich menunjukkan lapisan adsorbat yang terbentuk pada permukaan adsorben adalah *multilayer*. Hal tersebut berkaitan dengan ciri-ciri dari adsorpsi secara fisika dimana adsorpsi dapat terjadi pada banyak lapisan (*multilayer*) (Husin and Rosnelly, 2005).

Adapun bentuk persamaan linier Freundlich adalah sebagai berikut :

$$\log q_e = \log k_f + 1/n \log C_e \quad (7)$$

Dengan q_e adalah jumlah ion logam yang teradsorpsi per gram adsorben (mmol g^{-1}), C_e adalah konsentrasi setimbang adsorbat dalam fase larutan (mg L^{-1}), k_f adalah

faktor kapasitas Freundlich (mol g^{-1}), dan n adalah faktor intensitas Freundlich (Rousseau, 1987).

G. Karakterisasi

1. Spektrofotometer Inframerah (IR)

Spektrofotometri IR merupakan suatu metode yang mengamati interaksi molekul dengan radiasi elektromagnetik yang berada pada daerah panjang gelombang 0,75–1.000 μm atau pada bilangan gelombang 13.000–10 cm^{-1} dengan menggunakan suatu alat yaitu Spektrofotometer IR.

Konsep radiasi inframerah adalah mendispersikan radiasi matahari dengan prisma. Ternyata pada daerah sesudah sinar merah menunjukkan adanya kenaikan temperatur tertinggi yang berarti pada daerah panjang gelombang radiasi tersebut banyak kalori.

- 1) Absorpsi terhadap radiasi inframerah dapat menyebabkan eksitasi molekul ke tingkat energi vibrasi yang lebih tinggi dan besarnya absorpsi adalah terkuantitasi
- 2) Vibrasi yang normal mempunyai frekuensi sama dengan frekuensi radiasi elektromagnetik yang diserap
- 3) Proses absorpsi (spektra IR) hanya dapat terjadi apabila terdapat perubahan baik nilai maupun arah dari momen dua kutub ikatan

Spektrum serapan IR merupakan perubahan simultan dari energi vibrasi dan energi rotasi dari suatu molekul. Kebanyakan molekul organik cukup besar sehingga spektrum peresapannya kompleks. Konsep dasar dari spektra vibrasi dapat

diterangkan dengan menggunakan molekul sederhana yang terdiri dari dua atom dengan ikatan kovalen (Khopkar, 2003).

2. Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)

Dalam proses adsorpsi, keberhasilan pembuatan adsorben tercetak ion dapat dilihat menggunakan SSA. Adsorben yang telah tercetak ion diharapkan mengandung konsentrasi ion logam yang kecil. SSA juga dapat digunakan untuk mengetahui kadar ion logam yang teradsorpsi maupun yang terdapat dalam adsorben. Ion logam yang teradsorpsi dihitung secara kuantitatif berdasarkan selisih konsentrasi ion logam sebelum dan sesudah adsorpsi (Yuliasari, 2003).

Metode SSA berprinsip pada absorpsi cahaya oleh atom. Atom-atom menyerap cahaya tersebut pada panjang gelombang tertentu, tergantung pada sifat unsumnya. Transisi elektronik suatu unsur bersifat spesifik. Dengan absorpsi energi, berarti memperoleh energi yang lebih banyak, suatu atom dinaikkan tingkat energinya dari keadaan dasar ke tingkat eksitasi. Kita dapat memilih di antara panjang gelombang ini yang menghasilkan garis spektrum yang tajam dan dengan intensitas maksimum. Prinsip dasar SSA adalah sebagai berikut:

1. Pada SSA terjadi penyerapan sumber radiasi (sinar tampak atau ultraviolet) oleh atom-atom netral dalam keadaan gas yang berada dalam nyala.
2. Untuk jadi atom netral dalam keadaan gas butuh perlakuan khusus dipanaskan pada suhu tinggi.
3. Nyala digunakan untuk membuat atom netral dalam keadaan gas (Khopkar, 2003).

Pada dasarnya hubungan antara absorpsi atom dengan konsentrasi di dalam metode SSA dapat dinyatakan dengan hukum Lambert-Beer, yaitu secara matematik persamaannya adalah sebagai berikut:

$$I = I_0 e^{-abc}$$

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right) = a.b.c$$

$$A = a.b.c$$

Keterangan:

I_0 : Interaksi cahaya yang datang (mula-mula)

I : Interaksi cahaya yang ditransmisikan

a : Absorptivitas, yang besarnya sama untuk sistem atau larutan yang sama (g/L)

b : Panjang jalan cahaya atau tebalnya medium penyerap yang besarnya tetap untuk alat yang sama (cm)

c : Konsentrasi atom yang mengabsorpsi

A : Absorbansi = $\log I_0/I$

Dari persamaan di atas, nilai absorbansi sebanding dengan konsentrasi untuk panjang jalan penyerapan dan panjang gelombang tertentu. Ada dua cara untuk mengetahui konsentrasi cuplikan yang telah diketahui nilai absorbansinya yaitu:

1. Cara deret waktu dengan membandingkan nilai absorbansi terhadap Kurva kalibrasi dari standar-standar yang diketahui.
2. Cara penambahan standar dengan membandingkan konsentrasi dengan

perpotongan grafik terhadap sumbu dengan konsentrasi dari data absorbansi (Ismono, 1984).

3. Spektrofotometer Difraksi Sinar-X (XRD)

Karakterisasi struktur kristal dan fasa kristalin dapat ditentukan dengan alat difraktometer sinar-X (XRD). Sinar-X terjadi bila suatu sasaran logam ditumbuki oleh berkas elektron yang berenergi tinggi, kemudian elektron-elektron tersebut mengalami pengurangan kecepatan dengan cepat dan energi kinetik elektron yang menumbuk sebagian besar diubah menjadi panas, dan kurang dari 1 persen diubah menjadi sinar-X atau disebut dengan foton.

Analisis menggunakan alat difraktometer sinar-X didasarkan pada pola difraksi dari paduan atau senyawa yang dihasilkan oleh proses difraksi, ukuran panjang gelombang sinar-X harus tidak berbeda jauh dengan jarak antar atom di dalam kristal, sehingga pola berulang dari kisi kristal akan berfungsi seolah-olah seperti kisi difraksi untuk panjang gelombang sinar-X.

Sinar-X yang didifraksikan oleh setiap kristal mineral bersifat spesifik, dan bergantung bagaimana atom menyusun kisi kristal mineral tersebut serta bagaimana atom sejenis tersusun. Ketika sinar-X menumbuk sampel dan terdifraksi, maka jarak antar atom pada lapisan permukaan kristal dapat ditentukan berdasarkan hukum Bragg, yaitu:

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

Dimana n adalah bilangan bulat dan merupakan tingkat difraksi sinar-X, λ adalah panjang gelombang yang dihasilkan oleh katoda yang digunakan, seperti Cu K = 1,5414 Å, sedangkan d merupakan jarak antara batas lapisan permukaan, dan θ merupakan sudut difraksi sinar-X terhadap permukaan kristal (Cullity, 1978).