

## BAB II

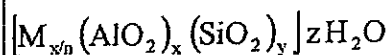
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Zeolit Alam

Sejarah zeolit dimulai dengan ditemukannya pada tahun 1756 oleh Cronsted ahli mineralogi Swedia (G. W. Morey, 1937). Zeolit dibentuk melalui hidrotermal pada pergantian aliran lava *basalt* dan rangkaian batuan *hyaloclastic* pada daerah geotermal yang berada di banyak bagian dunia (Barrer, 1982). Zeolit merupakan mineral yang terdiri dari kristal aluminasilikat yang terhidrasi yang mengandung kation alkali atau alkali tanah dalam kerangka tiga dimensinya. Ion-ion logam tersebut dapat diganti oleh kation lain tanpa merusak struktur zeolit dan dapat menyerap air secara reversibel.

Kerangka dasar struktur zeolit terdiri dari unit-unit tetrahedral  $[AlO_4]^{3-}$  dan  $[SiO_4]^{4-}$  yang saling berhubungan melalui atom O membentuk pori-pori zeolit. Ion Si bervalensi 4 sedangkan Al bervalensi 3, hal ini menyebabkan struktur zeolit kelebihan muatan negatif yang diseimbangkan oleh kation-kation logam alkali atau alkali tanah seperti  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^+$ , atau  $Sr^+$  maupun kation-kation lainnya. Kation-kation tersebut terbentuk di luar tetrahedral sebagai *counter ion* yang dapat dipertukarkan dengan kation-kation lainnya, sifat inilah yang mendasari zeolit sebagai penukar kation (Arifin, 1995; Dyer, 1988; Tsitsivilli, 1992).

Rumus molekul zeolit adalah



Keterangan:

$M_{x/n}$  : kation bermuatan  $n$  yang dapat dipertukarkan

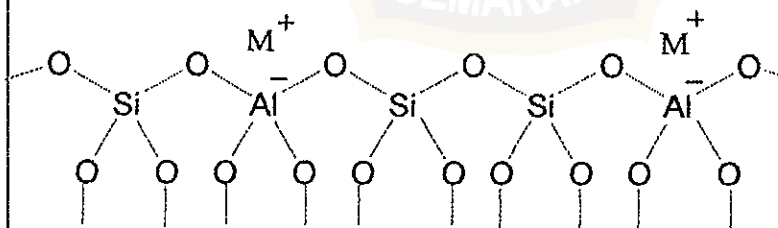
[ ] : kerangka aluminasilikat

X : jumlah  $AlO_2$

Y : jumlah  $SiO_2$

Z : jumlah  $H_2O$

Jadi zeolit terdiri dari 3 komponen yaitu kation yang dipertukarkan, kerangka aluminasilikat, dan fase air. Ikatan Si – O – Al membentuk struktur kristal sedangkan logam alkali merupakan sumber kation yang mudah dipertukarkan. Rumus kerangka dasar struktur zeolit yang merupakan tetrahedron, dimana pusat struktur zeolit ditempati oleh atom silikon dan aluminium dengan atom oksigen berada di puncak dapat digambarkan seperti dibawah ini. Masing-masing atom oksigen berada dibagian dua tetrahedral sehingga bentuk tetrahedral ini merupakan struktur yang kontinu (Tsitsivilli, 1992). Rumus kerangka zeolit (Ribeiro dkk, 1984):



Gambar 2.1 Rumus Kerangka Zeolit

Mineral zeolit merupakan kelompok aluminasilikat terhidrasi dengan unsur utama terdiri dari kation alkali dan alkali tanah, berstruktur 3 dimensi serta mempunyai pori-pori yang dapat diisi oleh molekul air. Kandungan air yang

terperangkap dalam rongga zeolit biasanya berkisar antara 10–35%. Molekul-molekul air yang terdapat dalam zeolit merupakan molekul yang mudah terlepas (Rabo, 1967). Sifat umum dari zeolit antara lain: mempunyai struktur yang agak lunak, berat jenis antar 2-2,4, berwarna kebiruan, putih dan coklat, dapat digunakan sebagai penukar kation, dan sebagai penyerap dan katalis. Zeolit juga mempunyai struktur berongga yang diisi oleh air dan kation yang bisa dipertukarkan dan memiliki ukuran pori tertentu. Karena itu zeolit dapat dimanfaatkan sebagai penyaring molekul, penukar ion, penyerap bahan/adsorben, dan katalisator. Adapun sifat karakteristik zeolit alam meliputi:

a) Dehidrasi

Sifat dehidrasi zeolit akan berpengaruh terhadap sifat adsorpsinya. Zeolit dapat melepaskan molekul air dari dalam rongga permukaan yang menyebabkan medan listrik meluas ke dalam rongga utama dan efektif berinteraksi dengan molekul air sesuai dengan jumlah pori-pori atau volume ruang kosong yang akan terbentuk bila unit sel kristal zeolit tersebut dipanaskan.

b) Adsorpsi

Dalam keadaan normal, ruang hampa dalam kristal zeolit terisi oleh molekul air bebas yang berada di sekitar kation. Bila kristal zeolit dipanaskan pada suhu 300-400°C, air tersebut akan keluar sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai penyerap gas atau cairan. Dehidrasi menyebabkan zeolit mempunyai struktur pori yang sangat terbuka dan mempunyai luas permukaan internal yang luas sehingga mampu mengadsorpsi sejumlah besar substansi selain air. Ukuran utama dalam rongga menentukan ukuran molekul yang dapat diadsorpsi. Zeolit

mempunyai kemampuan spesifik yang tinggi dan dapat dimanfaatkan untuk pemurnian/pemisahan.

c) Penukar ion

Ion-ion pada rongga atau kerangka berguna untuk menjaga kenetralan zeolit. Ion-ion ini dapat bergerak bebas sehingga pertukaran ion yang terjadi tergantung dari ukuran dan muatan maupun jenis zeolitnya. Sifat sebagai penukar ion dari zeolit tergantung dari sifat kation dan suhu. Penukaran kation dapat menyebabkan perubahan beberapa sifat zeolit seperti stabilitas terhadap panas, sifat adsorpsi dan aktivitas katalitik.

d) Katalis

Ciri dari zeolit yang menentukan sifat khusus senyawa ini adalah adanya ruang kosong yang akan membentuk saluran di dalam strukturnya. Bila zeolit digunakan pada proses penyerapan atau katalitik, maka akan terjadi difusi molekul ke dalam ruang bebas diantara kristal. Zeolit merupakan katalisator yang baik karena mempunyai pori-pori yang besar dengan permukaan yang luas.

e) Penyaring/pemisah

Zeolit dapat memisahkan molekul zat/gas dari suatu campuran tertentu karena mempunyai ruang hampa yang cukup besar dengan garis tengah yang bermacam-macam. Volume dan ukuran garis tengah ruang kosong dalam kristal-kristal ini menjadi dasar kemampuan zeolit untuk bertindak sebagai penyaring molekul. Molekul yang berukuran lebih kecil dapat masuk ke dalam pori, sedangkan yang berukuran lebih besar dari pori akan tertahan (Rabo, 1967).

Sampai saat ini lebih dari 50 mineral pembentuk zeolit alam sudah diketahui tetapi hanya 9 diantaranya yang sering ditemukan, yaitu analsim, khabasit, klinoptilolit, erionit, mordenit, ferierit, healandit, laumonit, dan filipsit (Arifin, 1995). Adapun komposisi mineral zeolit alam Wonosari adalah sebagai berikut: (Imedai, 2002)

Tabel 2.1 Komposisi Mineral Zeolit Alam Wonosari

Jenis mineral	Kadar (%)
SiO <sub>2</sub>	62,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,05
CaO	0,96
MgO	1,80
K <sub>2</sub> O	1,60
Na <sub>2</sub> O	0,29

## 2.2 Modifikasi Zeolit Alam

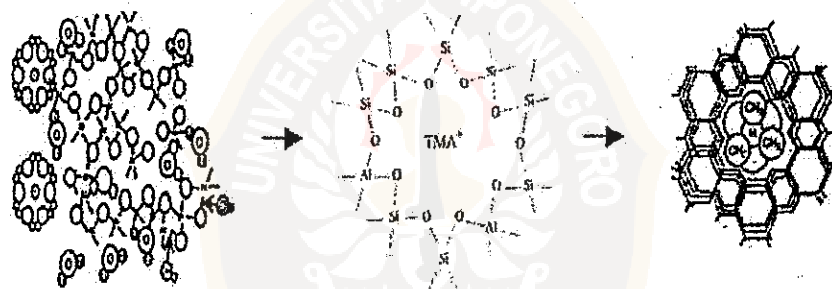
Proses modifikasi zeolit alam dilakukan untuk mengubah sifat zeolit alam dengan cara sebagai berikut:

### 2.2.1 Hidrotermal

Proses hidrotermal dilakukan dengan memanaskan padatan yang telah dicampur dengan air sampai terbentuk gel. Pemanasan dilakukan sampai temperatur yang melebihi titik didih air sehingga akan terbentuk uap air yang tetap tertahan di dalam sistem atau disuplai terus-menerus dari luar sistem

(Stowell, 1992). Tahap awal pembentukan zeolit adalah pembentukan gel alumina silika dalam suasana basa ( $\text{pH} > 9$ ). Pada kondisi hidrotermal dengan adanya kation logam dan senyawa pengarah maka gel alumina silika akan tertata ulang kembali membentuk inti kristal zeolit, sehingga terbentuk struktur zeolit yang diinginkan.

Proses hidrotermal sangat berpengaruh terhadap porositas dari suatu sintesis padatan berpori. Reaksi yang terjadi dalam proses hidrotermal adalah pembentukan inti kerangka zeolit yang pada proses kalsinasi nantinya akan tumbuh sebagai kristal (Barrer, 1982). Kerangka zeolit akan terbentuk kembali dengan bantuan molekul pengarah sehingga dihasilkan struktur yang lebih seragam (Ishizaki dkk., 1998).



Gambar 2.2 Mekanisme Reaksi Hidrotermal Zeolit Termodifikasi

Gambar di atas menggambarkan mekanisme penataan ulang kerangka zeolit termodifikasi (Wason, 1989). Jadi proses hidrotermal menyebabkan kerangka zeolit mengalami penataan ulang. Pada proses ini juga terjadi sintering hidrotermal dimana partikel kecil akan bergabung menjadi lebih besar. Ukuran partikel yang bertambah besar berakibat ruangan antar partikel menjadi lebih luas sehingga pori padatan akan semakin besar. Akan tetapi, dengan penambahan waktu hidrotermal penggabungan (polimerisasi) secara terus-menerus akan menyebabkan pori menjadi tertutup. Penggabungan ini dapat dicegah oleh

molekul pengarah sehingga pori tidak tertutup (Ishizaki dkk., 1998). Namun demikian penggabungan kembali kerangka zeolit memiliki waktu yang optimum untuk mencapai suatu kestabilan. Apabila telah terjadi kestabilan tetapi proses hidrotermal tetap berlangsung maka terjadi perubahan kestabilan menuju ke bentuk stabilitas yang baru, yang berakibat struktur dari padatan tersebut berbeda tetapi memiliki komposisi yang sama (Barrer, 1982).

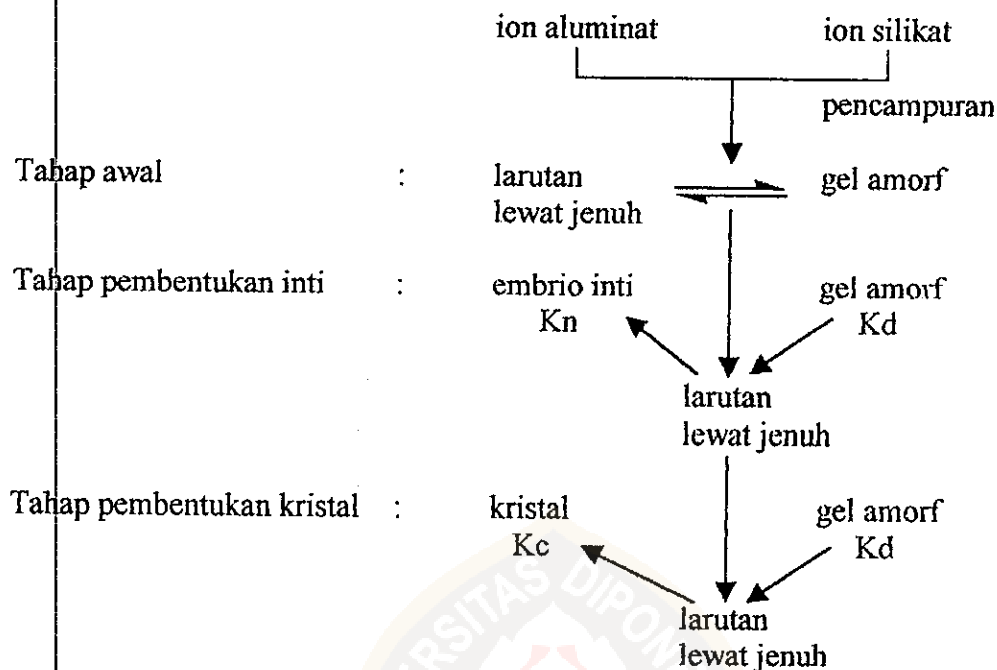
### 2.2.2 Kristalisasi Zeolit

Sintesis zeolit dibuat dengan meniru proses alam yaitu di bawah kondisi hidrotermal. Zeolit sintesis dibuat dalam larutan beralkali tinggi pada temperatur sampai 200°C yang dapat menghasilkan kristal dengan ukuran pori pada interval 0,1-10 µm. Proses sintesis zeolit melibatkan pembentukan gel aluminasilika. Setelah sampai waktu tertentu kristal zeolit akan terbentuk tanpa pengendapan dari fase larutan. Karena itu, campuran sintesa yang terbentuk sangat kompleks, dimana sistem tersusun dari gel amorf, larutan jenuh dan kristal zeolit (Hamdan, 1985; West, 1984; Cheetham, 1992). Terdapat 2 postulat yang diusulkan dalam mekanisme sintesis zeolit, yaitu:

1. Pengangkutan fase massa dalam larutan
2. Perubahan fase padatan (Hsin dkk, 1990)

Postulat pertama menyatakan bahwa kristalisasi dicapai dengan cara deposisi spesies aluminat dan silikat pada kristal dan pelarutan silika alumina amorf. Kemudian spesies-spesies tersebut secara kontinu akan berpindah dari fase larutan

menuju ke daerah permukaan kristal. Mekanisme ini diilustrasikan pada gambar berikut.



Gambar 2.3 Mekanisme Sintesis Zeolit (Hsin dkk, 1990)

Kd = Tetapan kelajuan pelarutan gel amorf

Kn = Tetapan kelajuan pertumbuhan kristal

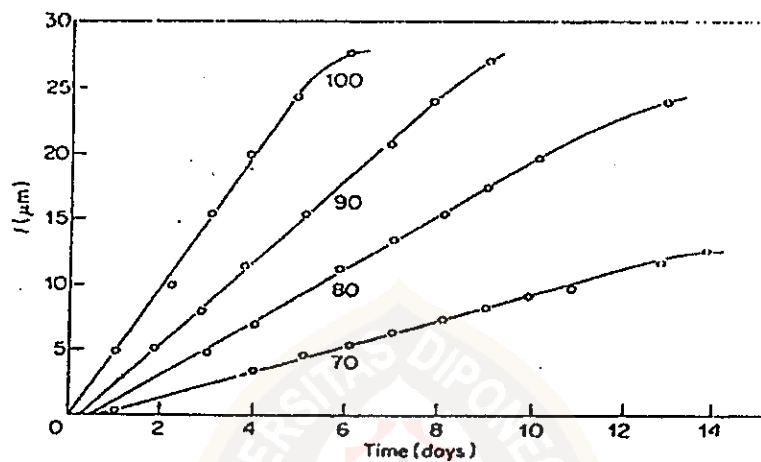
Kc = Tetapan kelajuan kristalisasi

Sedangkan pada postulat 2 dinyatakan bahwa kristalisasi terjadi secara langsung oleh gel amorf.

Pembentukan kristal zeolit dilakukan dengan cara kondensasi yang disertai terjadinya polimerisasi spesies-spesies  $\text{AlO}_4^{5-}$  dan  $\text{SiO}_4^{4-}$  dalam larutan lewat jenuh untuk membentuk ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al. Dua hal penting dalam sintesis zeolit proses pembentukan inti dan pertumbuhan kristal. Sebelum kristal tumbuh terlebih dahulu terjadi pembentukan inti. Pertumbuhan kristal akan



memperbesar ukuran inti kristal sehingga mencapai suatu ukuran tertentu yang disebut dengan ukuran kritis (*critical size*) dan kemudian secara spontan tumbuh sebagai kristal. Laju pertumbuhan kristal bergantung pada temperatur dan lamanya hidrotermal, dengan temperatur yang tinggi biasanya akan mempercepat laju pertumbuhan kristal.

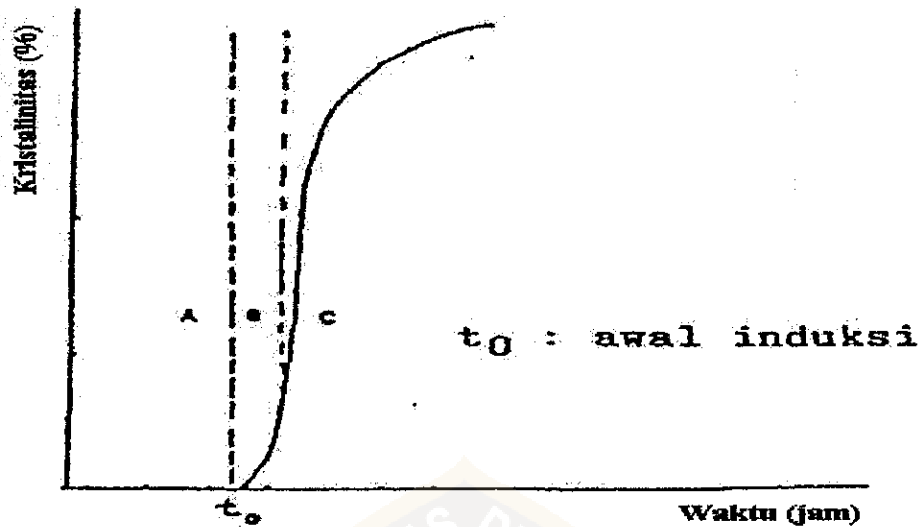


Gambar 2.4 Pertumbuhan Ukuran Kristal (Barrer, 1982)

Waktu kristalisasi dari satu peneliti ke peneliti lainnya sangat beragam, hal ini gayut dengan variabel yang digunakan, seperti sumber silika, senyawa pengarah dan sebagainya. Untuk mencapai kristalinitas 100% adakalanya dibutuhkan waktu sampai 300 jam bahkan lebih. Dari sini terlihat waktu kristalisasi dapat menjadi masalah pokok dalam banyaknya energi yang dihabiskan dalam suatu sintesis.

Kurva tipikal pertumbuhan kristal sebagai fungsi waktu,  $\alpha = f(t)$  (Gambar 2.5) mempunyai dua daerah cakupan yaitu pengintian dan pertumbuhan kristal. Daerah pengintian dapat dibagi menjadi dua perioda selang waktu. Selang waktu (A) kalau tidak dijumpai fasa kristal dan selang waktu antara (transisi) (B) yang

melibatkan pertumbuhan lambat fasa kristal. Selanjutnya daerah (C) yang merupakan pertumbuhan yang relatif cepat sabagai kelanjutannya (mintova dkk, 1992).



Gambar 2.5 Kurva Tipikal Pertumbuhan Kristal (Mintova, 1992)

Proses pertumbuhan kristal diungkapkan oleh Avrami-Erofeev dengan persamaan:

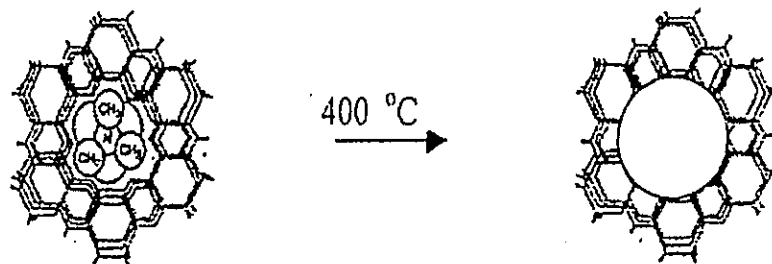
$$\alpha = 1 - \exp(-k \cdot t)^n$$

Dalam persamaan di atas  $\alpha$  dan  $t$  adalah fraksi konversi dan waktu,  $k$  dan  $n$  tetapan. Pangkat  $n$  merupakan penjumlahan dari dua tetapan lainnya yaitu tahap pengintian dan propagasi kristal (Mintova, dkk, 1992).

### 2.2.3 Kalsinasi

Kalsinasi adalah proses pemanasan yang dilakukan pada suhu yang relatif tinggi. Proses kalsinasi ditujukan untuk mendekomposisi molekul pengarah dengan jalan pemanasan pada temperatur yang lebih tinggi daripada titik didih molekul pengarahnya, sehingga akan dihasilkan pori yang terbuka dan ukurannya

sesuai dengan ukuran molekul pengarahnya. Tujuan lain dari kalsinasi adalah untuk pemantapan kerangka padatan (Ribeiro dkk, 1984 dan Zones, 1994). Mekanisme dekomposisi molekul pengarah pada saat kalsinasi digambarkan sebagai berikut (West, 1984).



Gambar 2.6 Dekomposisi Molekul Pengarah oleh Kalsinasi

Secara umum reaksi kalsinasi zat padat dapat digambarkan sebagai berikut:



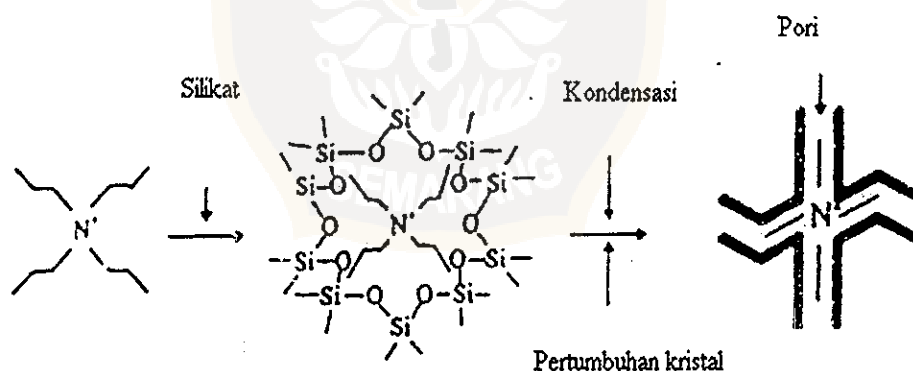
Diperkirakan dengan pemanasan yang tepat menyebabkan terjadinya dekomposisi tiap kristal A hingga dapat menaikkan jumlah kristal B. Kristal B metastabil atau merupakan pseudo kristal A, artinya keadaan atom atau ion B tetap berada dalam posisi yang sama dengan A sehingga ruang yang ditinggalkan oleh pelepasan gas C tetap ada dan berpengaruh terhadap proses adsorpsinya. Proses kalsinasi diharapkan akan terjadi proses transisi fasa yang akan merubah tata struktur padatan (Hamdan, 1985).

### 2.3 Surfaktan

Surfaktan merupakan zat aktif permukaan yang pada konsentrasi rendah dalam suatu sistem mempunyai sifat teradsorpsi di permukaan atau antarmuka dan

menurunkan tegangan atau energi bebas antarmuka. Surfaktan sebagai molekul pengarah dapat digunakan untuk mengontrol ukuran pori dalam sintesis zeolit dengan perlakuan hidrotermal.

Surfaktan dapat digunakan untuk memodifikasi permukaan eksternal zeolit. Interaksi surfaktan-zeolit terjadi karena adanya pertukaran kation-kation penyeimbang muatan (seperti  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , dan  $\text{Mg}^{2+}$ ) dengan molekul surfaktan dimana pertukaran ini bersifat kuantitatif dan irreversible. Molekul surfaktan yang memiliki ukuran besar tidak dapat masuk ke dalam struktur internal (pori). Molekul-molekul surfaktan yang teradsorpsi akan membentuk suatu lapisan pada permukaan eksternal zeolit. Lapisan tersebut menyebabkan perubahan sifat kimia zeolit, meliputi pengurangan sifat hidrofilik, penambahan muatan positif, permukaan penuh dengan rantai karbon dan cenderung bersifat sebagai penukar anion (Bowman, 2000).



Gambar 2.7 Mekanisme Pembentukan Pori dengan TPA

Gambar di atas menggambarkan mekanisme pembentukan pori dengan menggunakan molekul surfaktan tetrapropilammonium (TPA). TPA disini digunakan sebagai *templating agent* dalam pembentukan pori. Ukuran dari TPA

sangat berpengaruh pada pori zeolit yang terbentuk. Atas dasar ini diketahui bahwa ukuran dari surfaktan menentukan ukuran pori padatan yang disintesis.

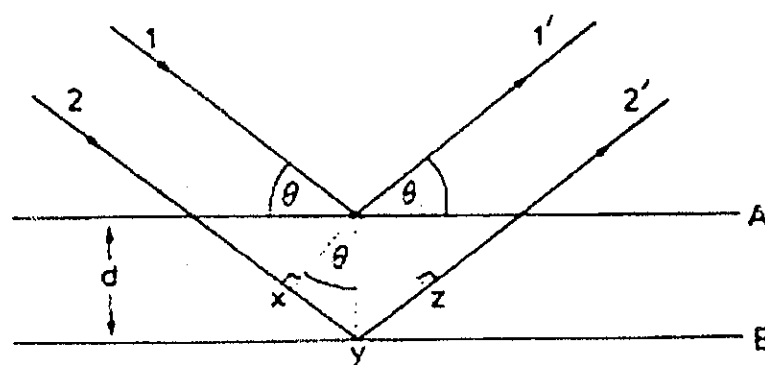
#### 2.4 Metode Analisis Difraksi Sinar-X

Difraksi sinar-x serbuk merupakan metode penting untuk mengkarakterisasi kristal secara kualitatif, karena setiap kristal memberikan difraksi yang khas. Identifikasi dilakukan dengan membandingkan 3 atau 4 harga  $d$  dengan intensitas relatif yang terkuat dari difraktogram suatu sampel dengan difraktogram senyawa standar. Kristalinitas yang tinggi dari suatu bahan memberikan puncak-puncak difraksi yang sempit dan tajam atau kuat pola difraksinya. Makin tinggi derajat kristalinitas, makin tinggi intensitasnya. Menurut Bragg suatu berkas sinar-x dapat dipantulkan dengan terang jika memenuhi persamaan:

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

dengan  $\lambda$  adalah panjang gelombang,  $d$  adalah jarak antara tiap satuan bidang atom pada kisi kristal,  $\theta$  adalah sudut difraksi dan  $n$  adalah orde difraksi.

Penjabaran persamaan ini dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.8 Difraksi Sinar-X

Pada gambar 2, garis-garis horizontal menggambarkan bidang-bidang dalam kristal yang terpisah oleh jarak  $d$ . Dua berkas sinar  $x$  yang paralel yaitu 1 dan 2 dipantulkan oleh bidang A dan B menjadi berkas sinar 1' dan 2' yang keduanya berada pada fase yang sama. Perbedaan jarak yang ditempuh oleh berkas 2-2' dan 1-1' sebesar  $xyz$ . Karena berkas 1-1' dan 2-2' adalah sefase maka jarak  $xyz$  merupakan kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang  $n \lambda$ , sehingga dapat dituliskan (West, 1984):

$$x y z = n \lambda \quad (1)$$

jika jarak antar bidang adalah  $d$  maka

$$x y = y z = d \sin \theta \quad (2)$$

$$x y z = 2 d \sin \theta \quad (3)$$

dari persamaan 1 dan 2 diperoleh

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (4)$$

Posisi berkas sinar difraksi sinar-X kristal bergantung pada ukuran dan bentuk ulangan satuan sel kristal dan panjang gelombang sinar-X. Intensitas sinar yang telah terdifraksi juga bergantung pada jenis atom dan kedudukannya dalam satuan sel kristal. Oleh karena itu, setiap zat mempunyai pola difraksi yang spesifik, sehingga sidik jari setiap senyawa kristal dapat diidentifikasi meskipun berada dalam campuran.

## 2.5 Luas Permukaan

Metode penentuan luas permukaan padatan didasarkan pada adsorpsi gas. Adsorpsi gas terjadi karena ada interaksi gaya-gaya pada permukaan padatan

dengan molekul-molekul gas. Metode umum yang digunakan untuk menentukan luas permukaan didasarkan pada adsorpsi lapis tunggal (monolayer). Langmuir menurunkan persamaan dengan menyamakan kecepatan adsorpsi dan kecepatan desorpsi. Teori yang lebih umum digunakan adalah teori *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) (Lowell, 1984).

Berdasarkan teori BET, luas permukaan zat padat berpori dapat dihitung dengan menggunakan isoterm adsorpsi. Metode ini sesuai untuk mengukur pori material meso dan mikro semacam zeolit. Persamaan BET dalam interpretasi adsorpsi isotermis pada tahun 1983 diterima sebagai metode yang umum untuk menentukan luas permukaan dari data adsorpsi, persamaannya dapat diambil dari:

$$\frac{1}{W \left[ \left( \frac{P^0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m \times C} + \frac{C - 1}{W_m \times C} \left( \frac{P}{P^0} \right) \quad (6)$$

Dimana  $W_m$  : berat gas yang teradsorpsi pada monolayer

$W$  : berat gas yang teradsorpsi

$P$  : tekanan gas adsorbat pada suhu  $T$

$P^0$  : tekanan uap jenuh adsorbat

$C$  : konstanta BET

$C$  dan  $W_m$  dapat ditentukan dari slope dan intersep dari grafik

$$\frac{1}{W \left[ \left( \frac{P^0}{P} \right) - 1 \right]} \text{ VS } \frac{P}{P^0} \quad (7)$$

Teori BET menyebutkan bahwa permukaan tidak tertutup secara sempurna selama tekanan uap jenuh belum tercapai. Teori BET pada keadaan awal atau tekanan rendah cocok digunakan untuk menghitung luas permukaan. Untuk gas

nitrogen pada suhu 77 K, teori BET sesuai diterapkan pada tekanan relatif ( $P/P_0$ ) dari 0,05 sampai 0,35 (Lowell, 1984).

Selanjutnya luas permukaan dapat diketahui dari persamaan

$$St = \frac{W_m \times N \times A}{M} \quad (8)$$

dimana

$W_m$  : berat gas yang teradsorpsi pada monolayer

$N$  : bilangan Avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$  molekul/mol)

$A$  : luas permukaan molekul teradsorpsi ( $16,2 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup> untuk gas N<sub>2</sub>)

$M$  : berat molekul adsorbat (N<sub>2</sub> = 28,0314 g/mol)

$St$  : luas permukaan total spesifik (m<sup>2</sup>/g)

Hubungan antara luas permukaan dengan volume pori dapat dihitung dari persamaan:

$$\frac{V_p}{St} = \frac{r}{2} \quad (9)$$

dimana  $V_p$  : volume pori total

$r$  : jari-jari pori rata-rata

## 2.6 Spektra IR Zeolit

Spektra infra merah khususnya tipe *Transformasi Fourier Infra Red* (FTIR) merupakan salah satu metode yang cukup penting untuk mengkarakterisasi struktur kerangka zeolit. Spektra khusus zeolit terdapat pada daerah infra merah sedang yaitu 400-1800 cm<sup>-1</sup>. Flanigen, Khatami dan Syamanski (Rabo, 1967) mengklasifikasikan spektrum vibrasi IR sedang zeolit menjadi dua jenis vibrasi



yaitu vibrasi internal yang berhubungan dengan posisi simetri tetrahedral dalam polihedral. Karena zeolit mempunyai spektrum yang spesifik, maka ia dapat dijadikan alat untuk mengidentifikasi sifat-sifat zeolit.

Bilangan gelombang untuk model vibrasi ulur O-H bervariasi pada daerah  $3650\text{ cm}^{-1}$  dan  $3550\text{ cm}^{-1}$ , untuk model vibrasi tekuk O-H dalam bidang akan muncul pada bilangan gelombang sekitar  $1050\text{ cm}^{-1}$ , sedangkan vibrasi tekuk O-H luar bidang akan muncul pada bilangan gelombang sekitar  $400\text{ cm}^{-1}$ . Spektra IR secara umum menunjukkan vibrasi untuk ikatan Si-O pada bilangan gelombang  $770\text{-}800\text{ cm}^{-1}$  dan Al-O pada  $680\text{-}780\text{ cm}^{-1}$ . Semua daerah yang dipengaruhi oleh vibrasi internal akan sensitif terhadap struktur dan kerangka. Dengan bertambahnya kandungan atom Si, maka intensitas pada bilangan gelombang sekitar  $585\text{ cm}^{-1}$  akan menurun dan bergeser ke arah bilangan gelombang yang lebih tinggi (Rabo, 1967).

