

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Abu Batubara

Saat ini penggunaan batubara di kalangan industri semakin meningkat, karena selain harga yang relatif murah juga harga bahan bakar minyak untuk industri cenderung naik. Penggunaan batubara sebagai sumber energi pengganti BBM, disatu sisi sangat menguntungkan namun disisi lain menimbulkan masalah, yaitu abu batubara yang merupakan hasil samping pembakaran batubara. Dari sejumlah pemakaian batubara akan dihasilkan abu batubara sekitar 2 – 10 % (tergantung jenis batubaranya, *low calory* atau *hight calory*). Sampai saat ini pengelolaan limbah abu batubara oleh kalangan industri hanya ditimbun dalam areal pabrik saja (*ash disposal*). Abu batubara adalah bagian dari sisa pembakaran batubara yang berbentuk partikel halus amorf dan abu tersebut merupakan bahan anorganik yang terbentuk dari perubahan bahan mineral (*mineral matter*) karena proses pembakaran. Dari proses pembakaran batubara pada unit pembangkit uap (*boiler*) akan terbentuk dua jenis abu yaitu abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Komposisi abu batubara yang dihasilkan terdiri dari 10 - 20 % abu dasar, sedang sisanya sekitar 80 - 90 % berupa abu terbang. Abu terbang ditangkap dengan *electric precipitator* sebelum dibuang ke udara melalui cerobong.

2.2 Fly ash Batubara

Menurut SNI 03-6414-2002 mendefinisikan pengertian abu terbang (*fly ash*) batubara adalah limbah hasil pembakaran batubara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar dan bersifat pozolanik.

Abu terbang (*fly ash*) merupakan material yang memiliki ukuran butiran yang halus, berwarna keabu-abuan dan diperoleh dari hasil pembakaran batubara. Pada intinya abu terbang (*fly ash*) mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2),

alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), pospor oksida (P_2O_5) dan Karbon (Anonim, 2008).



Gambar 1. Abu Terbang (*Fly Ash*) Batubara

Sumber : Wikipedia (2010)

Sebenarnya abu terbang (*fly ash*) tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen, namun dengan kehadiran air dan ukurannya yang halus, oksida silika yang dikandung didalam abu batubara akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen dan akan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan yang mengikat (Djiwantoro, 2001).

Menurut PP 18 tahun 1999 juncto PP 85 tahun 1999 abu terbang (*fly ash*) digolongkan sebagai limbah B-3 (bahan berbahaya dan beracun) dengan kode limbah D 223 dengan bahan pencemar utama adalah logam berat, yang dapat menimbulkan pencemaran lingkungan (BAPEDAL, 1999).

2.2.1 Karakteristik Fisik dan Kimia *Fly Ash* Batubara

Menurut ACI Committee 226, dijelaskan bahwa abu terbang (*fly ash*) mempunyai butiran yang cukup halus, yaitu lolos ayakan No. 325 (45 mili mikron)

5 – 27 % dengan *specific gravity* antara 2,15 – 2,6 dan berwarna abu-abu kehitaman. Abu terbang (*fly ash*) batubara mengandung silika dan alumina sekitar 80 % dengan sebagian silika berbentuk amorf. Sifat-sifat fisik abu terbang (*fly ash*) batubara antara lain densitasnya 2,23 gr/cm³, kadar air sekitar 4 % dan komposisi mineral yang dominan adalah -kuarsa dan mullite. Selain itu, abu terbang (*fly ash*) batubara mengandung SiO₂ = 58,75 %, Al₂O₃ = 25,82 %, Fe₂O₃ = 5,30 %, CaO = 4,66 %, alkali = 1,36 %, MgO = 3,30 % dan bahan lainnya = 0,81 % (Misbachul Munir,2008). Beberapa logam berat yang terkandung dalam abu terbang (*fly ash*) batubara seperti tembaga (Cu), timbal (Pb), seng (Zn), kadmium (Cd), chrom (Cr).

Tabel 1. Kandungan Logam Berat pada Abu Batubara

No	Jenis abu batubara	Kandungan logam berat (ppm)				
		Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
1	Abu batubara bukit asam	298	19	391	11	224
2	Abu batubara ombilin	87	15	153	11	120

Sumber : Pusitbang Teknologi Mineral Batubara, Departemen ESDM, 2003

Tabel 2. Komposisi (%) Fly ash Batubara

Senyawa	Jenis Batubara		
	Bituminous (%)	Sub-bituminous (%)	Lignite (%)
SiO ₂	20 – 60	40 – 60	15 – 45
Al ₂ O ₃	5 – 35	20 – 30	10 – 25
Fe ₂ O ₃	10 – 40	4 – 10	4 – 15
CaO	1 – 12	5 – 30	14 – 40
MgO	0 – 5	1 – 6	3 – 10
K ₂ O	0 – 3	0 – 4	0 – 4
Na ₂ O	0 – 4	0 – 2	0 – 6
SO ₃	0 – 4	0 – 2	0 – 10
LOI	0 – 15	0 – 3	0 – 5

Sumber : Bruce Ramme, 2004

Sifat kimia dari abu terbang (*fly ash*) batubara dipengaruhi oleh jenis batubara yang dibakar dan teknik penyimpanan serta penanganannya. Pembakaran batubara lignit dan subbituminous menghasilkan abu terbang dengan kalsium dan magnesium oksida lebih banyak dari pada jenis bituminous. Namun, memiliki kandungan silika, alumina, dan karbon yang lebih sedikit dari pada bituminous.

Kandungan karbon dalam abu terbang (*fly ash*) diukur dengan menggunakan *Loss Of Ignition Method* (LOI), yaitu suatu keadaan hilangnya potensi nyala dari abu terbang (*fly ash*) batubara. Abu terbang (*fly ash*) batubara terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Ukuran partikel abu terbang (*fly ash*) hasil pembakaran batubara bituminous lebih kecil dari 0,075 mm. Kerapatan abu terbang (*fly ash*) berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m³ dan luas area spesifiknya (diukur berdasarkan metode permeabilitas udara *Blaine*) antara 170 sampai 1000 m²/kg, sedangkan ukuran partikel rata-rata abu terbang (*fly ash*) batubara jenis subbituminous 0,01 mm – 0,015 mm, luas permukaannya 1-2 m²/g, massa jenis (*specific gravity*) 2,2–2,4 dan bentuk partikel *mostly spherical*, yaitu sebagian besar berbentuk seperti bola, sehingga menghasilkan kelecakan (*workability*) yang lebih baik (Nugroho,P dan Antoni, 2007)

Tabel 3. Komposisi Abu Terbang (*Fly Ash*) Batubara PLTU PT. Bukit Asam (Persero), Tbk

Parameter Analisis	Satuan	Hasil Analisis
Silika (SiO ₂)	% wt	50,00 – 75,00
Iron (Fe ₂ O ₃)	% wt	3,00 – 7,00
Aluminium Oksida (Al ₂ O ₃)	% wt	10,00 – 33,00
Calcium Oksida (CaO)	% wt	1,00 – 3,00
Magnesium Oksida (MgO)	% wt	0,50 – 1,50
Natrium Oksida (Na ₂ O)	% wt	0,60 – 3,50
Kalsium Oksida (K ₂ O)	% wt	0,20 – 0,70

Sumber : Data Analisis Abu Batubara PLTU PT. Bukit Asam (Persero)

2.2.2 Pengelompokan Abu Terbang (*Fly Ash*) Batubara

Penggolongan *abu terbang (fly ash)* pada umumnya dilakukan dengan memperhatikan kadar senyawa kimiawi ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), kadar CaO (*high calcium* dan *low calcium*), dan kadar karbon (*high carbon* dan *low carbon*). Menurut ASTM C618 abu terbang (*fly ash*) dibagi menjadi dua kelas yaitu :

a. Abu Terbang (*Fly Ash*) Kelas F

Abu terbang (*fly ash*) kelas F merupakan abu terbang (*fly ash*) yang diproduksi dari pembakaran batubara *anthracite* atau *bituminous*, mempunyai sifat pozzolanic dan untuk mendapatkan sifat *cementitious* harus diberi penambahan *quick lime*, *hydrated lime*, atau semen. Abu terbang (*fly ash*) kelas F ini kadar kapurnya rendah ($\text{CaO} < 10\%$).

Abu terbang (*fly ash*) yang mengandung CaO lebih kecil dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran *anthracite* atau *bituminous*.

Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) $> 70\%$.

Kadar CaO $< 10\%$ (ASTM 20%, CSA 8%)

Kadar karbon (C) berkisar antara 5% -10%

Abu terbang (*fly ash*) kelas F disebut juga *low-calcium fly ash*, yang tidak mempunyai sifat *cementitious* dan hanya bersifat pozzolanic.

b. Abu Terbang (*Fly Ash*) Kelas C

Abu terbang (*fly ash*) kelas C disebut juga *high-calcium fly ash*. Ini dikarenakan mempunyai sifat pozzolanic juga mempunyai sifat *self-cementing* (kemampuan untuk mengeras dan menambah *strength* apabila bereaksi dengan air dengan waktu sekitar 45 menit) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur (Sri Prabandiyani Retno Wardani, 2008).

Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) $> 50\%$.

Kadar CaO $\geq 10\%$

Kadar karbon (C) sekitar 2%

Abu terbang (*fly ash*) yang mengandung CaO di atas 10% yang dihasilkan dari pembakaran *lignite* atau sub-bitumen batubara (batubara muda/*sub-bituminous*) (Wardani, 2008).

Perbedaan utama dari kedua abu tersebut adalah banyaknya calsium, silika, aluminium dan kadar besi di *ash* tersebut. Walaupun kelas F dan kelas C sangat ketat ditandai untuk digunakan abu terbang (*fly ash*) yang memenuhi spesifikasi ASTM C618, namun istilah ini lebih umum digunakan berdasarkan asal produksi batubara atau kadar CaO. Yang penting diketahui, bahwa tidak semua abu terbang (*fly ash*) dapat memenuhi persyaratan ASTM C618, kecuali pada aplikasi untuk beton, persyaratan tersebut harus dipenuhi (Wardani, 2008).

2.2.3 Pemanfaatan Abu Terbang (*Fly Ash*) Batubara

Keberadaan abu terbang (*fly ash*) yang semula masih dianggap sebagai polutan, kini telah mengalami pergeseran fungsi. Pada era modern ini abu terbang (*fly ash*) banyak diteliti baik sifat fisik maupun kimiawi untuk dapat dimanfaatkan keberadaannya. Pemanfaatan abu batubara (*fly ash*) menurut Wardani (2008) terdiri dari 3 macam, yaitu:

- a. Abu terbang (*fly ash*) dimanfaatkan tanpa *recovery* komponen berguna (penggunaan untuk semen dan bahan konstruksi).
- b. Pemanfaatan untuk produksi alumina secara langsung tanpa pemungutan kembali silika terlebih dulu.
- c. Pengolahan abu dengan pemungutan kembali silika.

Di Indonesia, abu terbang (*fly ash*) batubara yang dihasilkan dari PLTU banyak yang sudah dimanfaatkan sebagai campuran bahan baku semen atau sebagai campuran bahan konstruksi seperti beton.

Pemungutan kembali silika dari limbah abu terbang (*fly ash*) batubara bisa dimanfaatkan untuk berbagai produk kimia berbasis silika, seperti *adsorbent* berbasis silika dan *sodium silicate*. *Sodium silicate* merupakan nama lain dari *sodium*

metasilicate ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) dan juga dikenal dengan nama *water glass* atau *liquid glass*. *Sodium silicate* tersedia dalam bentuk larutan encer maupun padatan. *Sodium silicate* padatan mempunyai densitas $2,4 \text{ g/cm}^3$ dan merupakan serbuk putih yang larut dalam air membentuk larutan alkali. Sifat fisik larutan *sodium silicate* yang penting adalah ratio berat $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O}$ yang secara komersial berkisar antara 1,5 hingga 3,2.

Sodium silicate pertama kali diproduksi secara komersial pada tahun 1818 dengan cara mereaksikan pasir silika (SiO_2) dengan *sodium* karbonat (Na_2CO_3) pada suhu $1.100 - 1.200^\circ\text{C}$. Alur proses produksi ini dianggap mengeksploitasi sumber daya alam dan memerlukan energi yang cukup banyak untuk mencapai suhu reaksi lebih dari 1.100°C . *Sodium* silikat digunakan sebagai bahan baku untuk berbagai produk seperti produksi silika gel, *silicate based binders*, aditif semen khusus, koagulan pengolahan air limbah, gasket dan aditif air pendingin kendaraan, katalis, tinta, substrat pertumbuhan alga, komponen deterjen, dan sabun (Breuer, 1998).

2.3 Zeolit

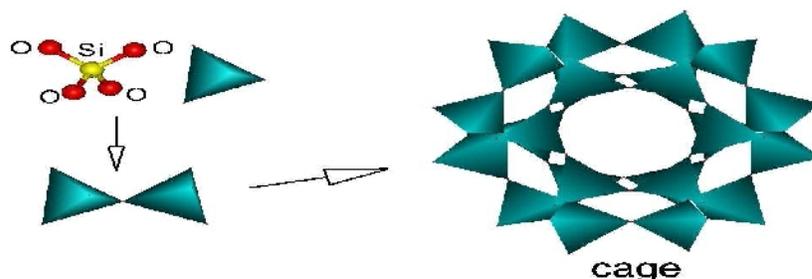
Zeolit merupakan mineral alumina silikat terhidrat yang tersusun atas tetrahedral-tetrahedral alumina (AlO_4^{5-}) dan silika (SiO_4^{4-}) yang membentuk struktur bermuatan negatif dan berongga terbuka/berpori. Muatan negatif pada kerangka zeolit dinetralkan oleh kation yang terikat lemah. Selain kation, rongga zeolit juga terisi oleh molekul air yang berkoordinasi dengan kation.

2.3.1 Karakteristik Zeolit

Sifat-sifat kimia dan fisika zeolit. Mineral zeolit adalah kelompok mineral aluminium silikat terhidrasi $\text{L}_m\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}_z \cdot n\text{H}_2\text{O}$, dari logam alkali dan alkali tanah (terutama Ca, dan Na), m, x, y, dan z merupakan bilangan 2 hingga 10, n koefisien dari H_2O , serta L adalah logam. Zeolit secara empiris ditulis $(\text{M}^+, \text{M}^{2+})\text{Al}_2\text{O}_3\text{gSiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$, M^+ berupa Na atau K dan M^{2+} berupa Mg, Ca, atau Fe. Li, Sr atau Ba dalam jumlah kecil dapat menggantikan M^+ atau M^{2+} , g dan z bilangan koefisien. Beberapa *specimen* zeolit berwarna putih, kebiruan, kemerahan, coklat, dll., karena hadirnya

oksida besi atau logam lainnya. Densitas zeolit antara $2,0 - 2,3 \text{ g/cm}^3$, dengan bentuk halus dan lunak. Kilap yang dimiliki bermacam-macam. Struktur zeolit dapat dibedakan dalam tiga komponen yaitu rangka aluminosilikat, ruang kosong saling berhubungan yang berisi kation logam, dan molekul air dalam fase *occluded* (Harben & Kuzvart, 1996).

Morfologi dan sistem kristal zeolit. Zeolit berbentuk kristal aluminosilikat terhidrasi yang mengandung muatan positif dari ion-ion logam alkali dan alkali tanah dalam kerangka kristal tiga dimensi (Hay, 1966), dengan setiap oksigen membatasi antara dua tetrahedral.



Gambar 2. Rangka zeolit yang terbentuk dari ikatan 4 atom O dengan 1 atom Si

Sumber : Bell (2001)

Zeolit pada dasarnya memiliki tiga variasi struktur yang berbeda yaitu:

- Struktur seperti rantai (*chain-like structure*), dengan bentuk kristal *acicular* dan *prismatic*, contoh : natrolit
- Struktur seperti lembaran (*sheet-like structure*), dengan bentuk kristal *platy* atau *tabular* biasanya dengan *basal cleavage* baik, contoh: heulandit
- Struktur rangka, dimana kristal yang ada memiliki dimensi yang hampir sama, contoh: kabasit.

Zeolit mempunyai kerangka terbuka, sehingga memungkinkan untuk melakukan adsorpsi Ca bertukar dengan $2(\text{Na}, \text{K})$ atau CaAl dengan $(\text{Na}, \text{K}) \text{Si}$. Morfologi dan struktur kristal yang terdiri dari rongga-rongga yang berhubungan ke segala arah menyebabkan permukaan zeolit menjadi luas. Morfologi ini terbentuk

dari unit dasar pembangunan dasar primer yang membentuk unit dasar pembangunan sekunder dan begitu seterusnya.

Zeolit pada umumnya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu zeolit alam dan zeolit sintetis. Zeolit alam biasanya mengandung kation-kation K^+ , Na^+ , Ca^{2+} atau Mg^{2+} sedangkan zeolit sintetis biasanya hanya mengandung kation-kation K^+ atau Na^+ . Zeolit sintetis dibuat dengan rekayasa yang sedemikian rupa sehingga mendapatkan karakter yang sama dengan zeolit alam. Zeolit sintetis sangat bergantung pada jumlah Al dan Si, sehingga ada 3 kelompok zeolit sintetis:

(1) Zeolit sintetis dengan kadar Si rendah

Zeolit jenis ini banyak mengandung Al, berpori, mempunyai nilai ekonomi tinggi karena efektif untuk pemisahan dengan kapasitas besar. Volume porinya dapat mencapai $0,5 \text{ cm}^3$ tiap cm^3 volume zeolit.

(2) Zeolit sintetis dengan kadar Si sedang

Jenis zeolit modernit mempunyai perbandingan $Si/Al = 5$ sangat stabil, maka diusahakan membuat zeolit Y dengan perbandingan $Si/Al = 1-3$. Contoh zeolit sintetis jenis ini adalah zeolit omega.

(3) Zeolit sintetis dengan kadar Si tinggi

Zeolit jenis ini sangat higroskopis dan menyerap molekul non polar sehingga baik untuk digunakan sebagai katalisator asam untuk hidrokarbon. Zeolit jenis ini misalnya zeolit ZSM-5, ZSM-11, ZSM-21, ZSM-24.

2.3.2 Kegunaan Zeolit

Pada umumnya, zeolit dapat digunakan atau dimanfaatkan dalam proses (Angraini, 2010) antara lain, sebagai berikut :

1. Zeolit sebagai agen pendehidrasi

Kristal zeolit normal mengandung molekul air yang berkoordinasi dengan kation penyeimbang. Zeolit dapat didehidrasi dengan memanaskannya. Pada keadaan ini kation akan berpindah posisi, sering kali menuju tempat dengan bilangan

koordinasi lebih rendah. Zeolit terdehidrasi merupakan bahan pengering (*drying agents*) yang sangat baik. Penyerapan air akan membuat kation kembali menuju keadaan koordinasi tinggi.

2. Zeolit sebagai penukar ion

Kation M^{n+} pada zeolit dapat ditukarkan oleh ion lain yang terdapat pada larutan yang mengelilinginya. Dengan sifat ini zeolit-A dengan ion Na^+ dapat digunakan sebagai pelunak air (*water softener*) dimana ion Na^+ akan digantikan oleh ion Ca^{2+} dari air sadah. Zeolit yang telah jenuh Ca^{2+} dapat diperbarui dengan melarutkannya ke dalam larutan garam Na^+ atau K^+ murni. Zeolit-A sekarang ditambahkan ke dalam deterjen sebagai pelunak air menggantikan polipospat yang dapat menimbulkan kerusakan ekologi. Produksi air minum dari air laut menggunakan campuran Ag dan Ba zeolit merupakan proses desalinasi yang baik walaupun proses ini tergolong mahal.

Beberapa zeolit mempunyai afinitas besar terhadap kation tertentu. *Clinoptilolite* (HFU) merupakan zeolit alam yang digunakan untuk *recovery* Cs dari sampah radioaktif. Zeolit-A juga dapat digunakan untuk mengisolasi strontium. Zeolit telah digunakan secara besar-besaran untuk membersihkan zat radioaktif pada kecelakaan *Chernobyl* dan *Three-Mile Island*.

Zeolit juga digunakan untuk mengurangi tingkat pencemaran logam berat seperti Pb, Cd, Zn, Cu^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} pada lingkungan. Modifikasi zeolit sebagai adsorben anion seperti NO_3^- , Cl^- , dan SO_4^- telah dikembangkan melalui proses kalsinasi zeolit-H pada suhu $550^{\circ}C$.

3. Zeolit sebagai adsorben

Zeolit yang terdehidrasi akan mempunyai struktur pori terbuka dengan *internal surface area* besar sehingga kemampuan mengadsorb molekul selain air semakin tinggi. Ukuran cincin dari jendela yang menuju rongga menentukan ukuran molekul yang dapat teradsorb. Sifat ini yang menjadikan zeolit mempunyai

kemampuan penyaringan yang sangat spesifik yang dapat digunakan untuk pemurnian dan pemisahan. *Chabazite* (CHA) merupakan zeolit pertama yang diketahui dapat mengadsorb dan menahan molekul kecil seperti asam formiat dan metanol tetapi tidak dapat menyerap benzena dan molekul yang lebih besar. *Chabazite* telah digunakan secara komersial untuk mengadsorb gas polutan SO₂ yang merupakan emisi dari cerobong asap. Hal yang sama terdapat pada zeolit-A dimana diameter jendela berukuran 410 pm yang sangat kecil dibandingkan diameter rongga dalam yang mencapai 1140 pm sehingga molekul metana dapat masuk rongga dan molekul benzena yang lebih besar tertahan diluar.

Selain itu zeolit juga dapat digunakan sebagai adsorben zat warna brom dan untuk pemucatan minyak sawit mentah.

Zeolit yang digunakan sebagai penyaring molekular tidak menunjukkan perubahan cukup besar pada struktur kerangka dasar pada dehidrasi walaupun kation berpindah menuju posisi dengan koordinasi lebih rendah. Setelah dehidrasi, zeolit-A dan zeolit lainnya sangat stabil terhadap pemanasan dan tidak terdekomposisi dibawah 700⁰C. Volume rongga pada zeolit-A terdehidrasi adalah sekitar 50% dari volume zeolit.

4. Zeolit sebagai katalis

Zeolit merupakan katalis yang sangat berguna yang menunjukkan beberapa sifat penting yang tidak ditemukan pada katalis amorf tradisional. Katalis amorf hampir selalu dibuat dalam bentuk serbuk untuk memberikan luas permukaan yang besar sehingga jumlah sisi katalitik semakin besar. Keberadaan rongga pada zeolit memberikan luas permukaan internal yang sangat luas sehingga dapat menampung 100 kali molekul lebih banyak daripada katalis amorf dengan jumlah yang sama. Zeolit merupakan kristal yang mudah dibuat dalam jumlah besar mengingat zeolit tidak menunjukkan aktivitas katalitik yang bervariasi seperti pada katalis amorf. Sifat penyaring molekul dari zeolit dapat mengontrol molekul yang masuk atau keluar dari

situs aktif. Karena adanya pengontrolan seperti ini maka zeolit disebut sebagai katalis selektif bentuk.

Aktivitas katalitik dari zeolit terdeionisasi dihubungkan dengan keberadaan situs asam yang muncul dari unit tetrahedral $[AlO_4]$ pada kerangka. Situs asam ini bisa berkarakter asam *Bronsted* maupun asam *Lewis*. Zeolit sintetik biasanya mempunyai ion Na^+ yang dapat dipertukarkan dengan proton secara langsung dengan asam, memberikan permukaan gugus hidroksil (situs *Bronsted*). Jika zeolit tidak stabil pada larutan asam, situs *Bronsted* dapat dibuat dengan mengubah zeolit menjadi garam NH_4^+ kemudian memanaskannya sehingga terjadi penguapan NH_3 dengan meninggalkan proton. Pemanasan lebih lanjut akan menguapkan air dari situs *Bronsted* menghasilkan ion Al terkoordinasi 3 yang mempunyai sifat akseptor pasangan elektron (situs *lewis*). Permukaan zeolit dapat menunjukkan situs *Bronsted*, situs *Lewis* ataupun keduanya tergantung bagaimana zeolit tersebut dipreparasi.

Tidak semua katalis zeolit menggunakan prinsip deionisasi atau bentuk asam. Sifat katalisis juga dapat diperoleh dengan mengganti ion Na^+ dengan ion lantanida seperti La^{3+} atau Ce^{3+} . Ion-ion ini kemudian memposisikan dirinya sehingga dapat mencapai kondisi paling baik yang dapat menetralkan muatan negatif yang terpisah dari tetrahedral Al pada kerangka. Pemisahan muatan menghasilkan gradien medan elektrostatis yang tinggi di dalam rongga yang cukup besar untuk mempolarisasi ikatan C-H atau mengionisasi ikatan tersebut sehingga reaksi selanjutnya dapat terjadi. Efek ini dapat diperkuat dengan mereduksi Al pada zeolit sehingga unit $[AlO_4]$ terpisah lebih jauh. Tanah jarang sebagai bentuk tersubstitusi dari zeolit-X menjadi katalis zeolit komersial pertama untuk proses *cracking* petroleum pada tahun 1960 an. Akan tetapi katalis ini telah digantikan oleh Zeolit-Y yang lebih stabil pada suhu tinggi. Katalis ini menghasilkan 20% lebih banyak petrol (gasolin) daripada zeolit-X.

Cara ketiga penggunaan zeolit sebagai katalis adalah dengan menggantikan ion Na^+ dengan ion logam lain seperti Ni^{2+} , Pd^{2+} atau Pt^{2+} dan kemudian mereduksinya secara *in situ* sehingga atom logam terdeposit di dalam kerangka zeolit.

Material yang dihasilkan menunjukkan sifat gabungan antara sifat katalisis logam dengan pendukung katalis logam (zeolit) dan penyebaran logam ke dalam pori dapat dicapai dengan baik.

2.3.3 Sifat – sifat Zeolit

Dari struktur kristal dan komposisi kimia yang ada dalam sistem kerangka zeolit, maka zeolit memiliki sifat-sifat yang khas, diantaranya memiliki luas permukaan yang besar, mampu mempertukarkan kation dengan baik, mempunyai keasaman internal, dan tahan terhadap panas yang tinggi.

1. Luas permukaan yang besar

Zeolit memiliki struktur berbentuk kerangka, sehingga memberikan permukaan yang lebar dan luas. Keadaan ini menguntungkan dalam pengembangan fungsi zeolit sebagai adsorben, penukar ion, maupun katalis.

2. Penukar kation yang baik

Kation yang berada diluar kerangka zeolit dapat dengan mudah dipertukarkan dengan kation lain. Kation yang dipertukarkan tersebut terlokasi berhampiran dengan tetrahedral AlO_4^- yang bermuatan negatif, sehingga kapasitas tukar kation Zeolit sebanding dengan konsentrasi ion – ion Al^{3+} yang dimilikinya.

3. Keasaman internal

Sifat asam zeolit terbentuk apabila kation M^{n+} yang terikat dipertukarkan dengan H^+ proton dimana H^+ mengambil tempat pada posisi tangan O dan bergabung menjadi O-H yang bermuatan positif.

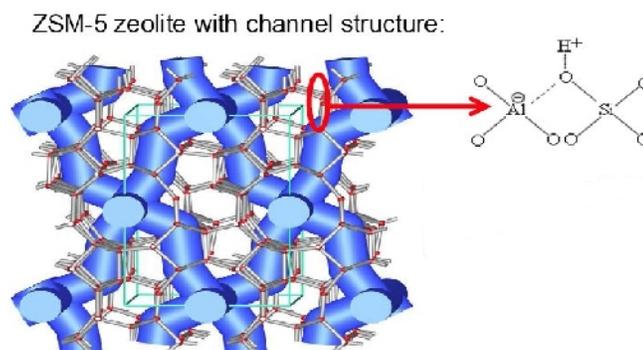
4. Kestabilan termal

Zeolit adalah kristal yang berkadar silika tinggi dan memiliki sifat stabil terhadap panas. Oleh karena reaksi – reaksi kimia umumnya berlangsung lebih cepat pada suhu tinggi maka sifat ini disukai sebagai alternatif katalis. Disamping itu juga, regenerasi katalis biasanya dilakukan pada suhu tinggi. Demikian keunggulan zeolit bila dibandingkan dengan katalis lain. Setiap jenis zeolit mempunyai suhu dekomposisi yang berbeda. Secara umum berkisar antara 700°C hingga 1300°C .

2.4 ZSM-5

ZSM-5 (*Zeolite Socony Mobile Number 5*) adalah zeolit dengan rasio silika dan alumina yang tinggi. ZSM-5 merupakan material *high porous* dan diseluruh strukturnya itu mempunyai sebuah struktur saluran tiga dimensi yang menyilang. ZSM-5 mempunyai dua jenis pori, keduanya dibentuk oleh oksigen cincin enam yang pertama dari jenis pori ini adalah berbentuk lurus dan ellips dan yang kedua adalah porinya lurus pada sudut kanan, polanya zig-zag dan melingkar. ZSM-5 dikenal sebagai jenis zeolit sintetis yang mempunyai permukaan inti asam dan struktur jaringan pori yang luas serta homogen. Struktur kerangka jenis bahan alumina-silikat tersebut terbentuk dari bahan dasar pembangun berupa tetrahedron atom silika atau aluminium.

ZSM-5 adalah jenis zeolit sintetis bersilika tinggi. Zeolit ini pertama kali ditemukan tahun 1973 oleh Argauer dan Landolt. ZSM-5 adalah material berkadar silika tinggi yang terdiri dari 96 tetrahedral dalam satu unit selnya. Delapan tetrahedral diantaranya disusun oleh atom aluminium. Rasio Si/Al digunakan untuk menyatakan jumlah kadar Al dalam zeolit, jika kadar aluminiumnya nol maka zeolit ini disebut silikalit (Lucas et al, 1997).



Gambar 3. Struktur Kerangka ZSM-5

Sumber : Paul Scherrer Institut (2011)

ZSM-5 dikenal sebagai jenis zeolit sintetis yang mempunyai permukaan inti asam dan struktur jaringan pori yang luas serta homogen. Kemampuan ZSM-5 untuk mengakselerasi berbagai jenis reaksi sangat berkait dengan sifat keasamannya yang dapat dikontrol dengan rasio Si/Al. Namun beragamnya variasi Si/Al ini sama sekali tidak akan mempengaruhi struktur kerangka ZSM-5 (Bhatia, 1999). Adapun komposisi dari struktur zeolit ZSM-5 terdapat dalam tabel 4 :

Tabel 4. Komposisi Struktur ZSM-5

Nama Zeolit	ZSM-5
Rasio SiO ₂ /Al ₂ O ₃	30
Bobot Na ₂ O	0,1%
Luas Permukaan	400 m ² /g
	ZnO 0,24%
	TiO ₂ 0,22%
	MgO < 0,001%
	BaO 0,23%
Komposisi	Na ₂ O < 0,001%
	Fe ₂ O ₃ 0,49%
	CaO 0,005%
	K ₂ O 0,073%
	SiO ₂ 89,651%
	Al ₂ O ₃ 4,66%

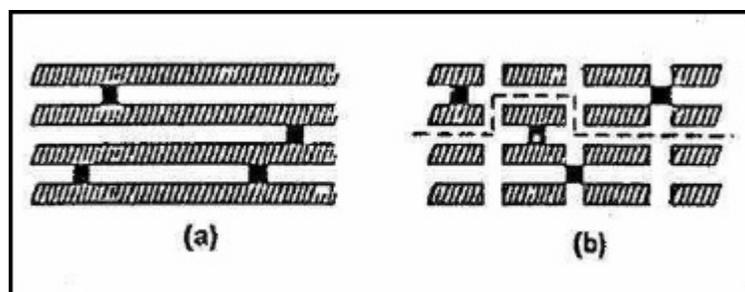
Sumber : savitri, et al (2012)

ZSM-5 dapat disintesis dari campuran silika dan alumina dengan komposisi dan kondisi operasi tertentu. Kedua komponen utama ini terdapat dalam zeolit alam. ZSM-5 merupakan zeolit yang kaya akan silika dengan rasio SiO₂/Al₂O₃ melebihi 10, sedangkan zeolit alam hanya memiliki nisbah molar SiO₂/Al₂O₃ hanya 2-5 (Zahrina, 2006).

ZSM-5 dikenal sebagai jenis zeolit sintetis yang mempunyai permukaan inti asam dan struktur jaringan pori yang luas serta homogen. Struktur kerangka jenis bahan aluminosilikat tersebut terbentuk dari bahan dasar pembangun berupa tetrahedral atom silikon atau aluminium. Kemampuan ZSM-5 untuk mengakselerasi

berbagai jenis reaksi sangat berkait dengan sifat keasamannya yang dapat dikontrol dengan rasio Si/Al. Namun beragamnya variasi Si/Al ini sama sekali tidak akan mempengaruhi struktur kerangka ZSM-5.

Saluran pada ZSM-5 tidak berongga sehingga tidak mudah terdeaktivasi oleh kokas yang biasanya menutupi pori pada berbagai katalis. Saluran yang ada memiliki dua macam bentuk, yaitu berbentuk ellips (bukaan 0,51 s.d 0,58 nm) yang tersusun secara paralel dan saluran berbentuk lingkaran (bukaan 0,54 s.d 0,56 nm) yang tersusun berkelok. Adanya dua jenis saluran pada ZSM-5 ini menyebabkan reaktan berdifusi melalui salah satu jenis pori dan produknya keluar melalui pori lainnya, sehingga memungkinkan reaksi dapat terjadi tanpa *counter diffusion*.



Gambar 4. Pembentukan Kokas Pada Saluran Zeolit.

- (a) Pada sistem saluran yang tidak saling berhubungan;
- (b) Pada sistem saluran tiga dimensi

Sumber : Mustain Zamhari (1997)

Pusat aktif katalis terdapat dalam ruang-ruang kosong yang ada pada perpotongan antar saluran. Ruang kosong ini mempunyai ukuran sekitar 0,9 nm (Zamhari, 1997).

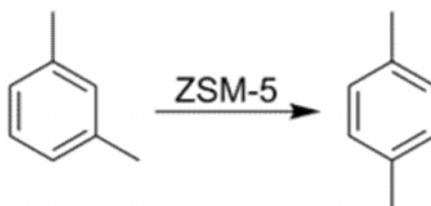
2.4.1 Karakteristik ZSM-5

Zeolit ZSM-5 pertama kali disintesis oleh Landolt dan Argauer (1965) yang diaplikasikan sebagai katalis dalam produksi propilena dan oktana gasolin karena adanya sisi asam pada permukaan (Yusri, 2012). ZSM-5 merupakan salah satu zeolit

dengan *framework* tipe MFI, dengan rumus umum $\text{Na}_n(\text{AlO}_2)_n(\text{SiO}_2)_{96-n} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ dan memiliki rasio Si/Al bervariasi dari 10 sampai ratusan dan biasa disintesis dengan menggunakan katalis Na^+ sebagai *counter ion framework* yang bermuatan negatif. Ion Na^+ ini dapat ditukar dengan kation lain yang dapat memasuki pori selama modifikasi zeolit.

2.4.2 Kegunaan ZSM-5

ZSM-5 memiliki silika yang tinggi terhadap aluminium. Setiap kali sebuah kation Al^{3+} menggantikan kation Si^{4+} , muatan positif tambahan diperlukan untuk menjaga muatan bahan netral. Dengan proton (H^+) sebagai kation, bahan menjadi sangat asam. Dengan demikian keasaman sebanding dengan kandungan Al. Struktur 3-D yang sangat teratur dan keasaman ZSM-5 dapat dimanfaatkan untuk reaksi asam-katalis seperti isomerisasi hidrokarbon dan alkilasi hidrokarbon. Salah satu reaksi tersebut adalah isomerisasi *meta-xilena* untuk *para-xilena*. Dalam pori-pori zeolit ZSM-5, *para-xilena* memiliki koefisien difusi jauh lebih tinggi daripada *meta-xilena*. Ketika reaksi isomerisasi diperbolehkan untuk terjadi dalam pori-pori dari ZSM-5, *para-xilena* mampu melintasi sepanjang pori-pori zeolit, menyebar dari katalis sangat cepat. Ini ukuran selektivitas memungkinkan reaksi isomerisasi terjadi dengan cepat dalam hasil yang tinggi.



Gambar 5. Perubahan rantai pada ZSM-5

Sumber : Wikipedia, 2013

ZSM-5 telah digunakan sebagai bahan pendukung untuk katalisis. Dalam salah satu contohnya, tembaga diendapkan pada zeolit dan aliran etanol dilewatkan

melalui pada suhu 240 sampai 320°C sebagai aliran uap, yang menyebabkan etanol untuk mengoksidasi menjadi asetaldehida, dua hidrogen hilang oleh etanol sebagai hidrogen gas. Tampak bahwa ukuran pori spesifik dari ZSM-5 yang bermanfaat untuk proses ini, yang juga berfungsi untuk alkohol dan oksidasi lainnya. Tembaga ini kadang-kadang dikombinasikan dengan logam lain, seperti kromium, untuk *fine tune* keragaman dan spesifisitas produk, karena ada kemungkinan akan lebih dari satu. Asam asetat adalah contoh dari satu kemungkinan produk sampingan dari oksidasi tembaga panas (Dyer, 2013).

ZSM-5 merupakan katalis penting di industri-industri kimia dan banyak jasa katalis ini digunakan dalam reaksi – reaksi. Pada Tabel 5 ditunjukkan beberapa proses reaksi kimia di industri dengan menggunakan ZSM-5 sebagai katalis. ZSM-5 mampu mengkatalisis lebih kurang 15 reaksi penting pada skala industri.

Tabel 5. Penggunaan Zeolit sebagai katalis pada skala industri dan produk yang dihasilkan

Proses	Tipe Zeolit	Produk
Perengkahan Katalitik	Faujasit	Gasolin, <i>Fuel Oil</i> , kerosin, <i>Jet Fuel</i>
<i>Hydrocracking</i>	Faujasit (<i>modified</i>)	Benzene, Toluene, Klisen
<i>Hydroisomerization</i>	Mordenit	Gasolin dan distilat (i- heksan, heptan)
<i>Dewaxing</i>	ZSM-5 Mordenit	<i>Low power point lubes</i>
Alkilasi Benzene	ZSM-5	Stiren, etil benzen
Isomerisasi Ksilena	ZSM-5	Paraksilen
Disproportionasi Toluene	ZSM-5	Benzen, Toluene
Konversi Metanol	ZSM-5	Gasolin
Konversi Metanol	ZSM-5 (<i>modified</i>)	Olefin
Fischer-Tropsch	ZSM-5 (<i>modified</i>)	Hidrokarbon

Sumber : Mustain Zamhari (1997)

2.4.3 Rasio Si/Al

Rasio Si/Al merupakan perbandingan jumlah atom Si terhadap jumlah atom Al di dalam kerangka zeolit. Zeolit-A merupakan zeolit sintetis yang mempunyai rasio Si/Al sama dengan satu. Beberapa zeolit mempunyai rasio Si/Al yang tinggi seperti zeolit ZK-4 (LTA), yang mempunyai struktur kerangka seperti zeolit-A, mempunyai rasio 2,5. Banyak zeolit sintetis yang dikembangkan untuk katalis mempunyai kadar Si yang tinggi seperti ZMS-5 (MFI) (*Zeolit Socony-Mobile*) dengan rasio Si/Al antara 20 sampai tak terhingga (murni SiO_2). Ini jauh melebihi mordenit (rasio Si/Al=5,5) yang merupakan zeolit alam yang dikenal paling banyak mengandung Si.

Perubahan rasio Si/Al dari zeolit akan mengubah muatan zeolit sehingga pada akhirnya akan mengubah jumlah kation penyeimbang. Lebih sedikit atom Al artinya lebih sedikit muatan negatif pada zeolit sehingga lebih sedikit pula kation penyeimbang yang ada. Zeolit berkadar Si tinggi bersifat hidrofobik dan mempunyai afinitas terhadap hidrokarbon.

2.5 Sintesis ZSM-5

Sintesis zeolit biasanya dilakukan melalui proses hidrotermal, yaitu proses kristalisasi gel aluminasilikat dalam sistem hidrotermal tertutup pada suhu yang bervariasi antara suhu kamar sampai suhu 200°C . Sistem hidrotermal memakai air sebagai pelarut, sehingga dihasilkan tekanan uap air pada sistem tersebut (Octaviani, 2012).

Tahap awal pembentukan zeolit adalah pembentukan gel aluminasilikat dalam suasana basa. Waktu yang dibutuhkan untuk pembentukan gel tergantung pada konsentrasi masing-masing spesies yang ada. Pada kondisi hidrotermal dan adanya kation logam serta molekul-molekul pengarah, gel aluminasilikat tersebut tertata ulang membentuk struktur zeolit yang diinginkan. Bahan dasar sintesis zeolit

biasanya meliputi sumber silika, sumber alumina, ion hidroksida dari basa kuat, zat pengarah (*structure irecting agent*), dan air sebagai pelarut (Octaviani, 2012).

ZSM-5 adalah zeolit sintetis, terkait erat dengan ZSM-11. Ada banyak cara untuk mensintesis ZSM-5, metode yang umum adalah sebagai berikut:

$\text{SiO}_2 + \text{NaAlO}_2 + \text{NaOH} + \text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4\text{BR} + \text{H}_2\text{O}$ ZSM-5+analcime+alpha-kuarsa

ZSM-5 biasanya disiapkan pada suhu tinggi dan tekanan tinggi di *autoclave* berlapis Teflon dan dapat dibuat dengan menggunakan berbagai rasio senyawa SiO_2 dan Al_2O_3 .

2.6 Analisa Karakteristik ZSM-5

Untuk mengetahui sifat-sifat dan kemampuan suatu material maka perlu dilakukan analisis. Beberapa jenis analisis yang sering dilakukan antara lain: analisa struktur yang menggunakan Spektrometri Serapan Atom (AAS), FTIR (*Fourier Transform Infra Red*), XRD (*X-Ray Diffraction*) dan *Scanning Elektron Microscopy* (SEM).

2.6.1 Spektrometri Serapan Atom (AAS)

Metode spektroskopi serapan atom (AAS) berprinsip pada absorpsi cahaya oleh atom. Atom-atom menyerap cahaya tersebut pada panjang gelombang tertentu, tergantung sifat unsurnya. Cahaya pada panjang gelombang ini mempunyai cukup energi untuk mengubah tingkat energinya ke tingkat elektronik suatu atom yang bersifat spesifik. Dengan absorpsi energi, atom pada keadaan dasar dari tingkat energinya berpindah ke tingkat eksitasi.

Teknik AAS merupakan perangkat yang canggih dalam analisis, hal itu disebabkan oleh kecepatan analisisnya. Kondisi analisis Si dan Al dengan AAS ini adalah silika dianalisis pada panjang gelombang 210,6 nm, tipe nyala N_2O -asetilen, sedangkan untuk Al pada panjang gelombang 309,3 nm, tipe nyala N_2O -asetilen. Pada alat AAS terdapat dua bagian utama yaitu suatu sel atom yang menghasilkan atom-atom gas bebas dalam keadaan dasarnya dan suatu sistem optik untuk pengukuran sinyal.

2.6.2 *Fourier Transform Infra Red (FT-IR)*

Fourier Transform Infra Red (FT-IR) merupakan variasi instrumental dari spektroskopi Inframerah (IR). *Fourier Transform Infra Red (FT-IR)* menggunakan prinsip interferometri. Kelebihan-kelebihan dari *Fourier Transform Infra Red (FT-IR)* mencakup persyaratan ukuran sampel yang kecil, perkembangan spektrum yang cepat dan dikarenakan instrumen ini memiliki komputer yang terdedikasi maka instrumen ini memiliki kemampuan untuk menyimpan dan memanipulasi spektrum. *Fourier Transform Infra Red (FT-IR)* memiliki kemampuan *men-scan* spektrum-spektrum, menyimpan dan mentransformasikan dalam hitungan detik. *Fourier Transform Infra Red (FT-IR)* memudahkan proses karakterisasi suatu senyawa. Persyaratan-persyaratan ukuran sampel yang sangat kecil mempermudah kopling instrumen *Fourier Transform Infra Red (FT-IR)* dengan suatu mikroskop untuk analisis bagian-bagian sampel yang terlokalisasi.

Kemampuan untuk substraksi digital memungkinkan seseorang untuk mendapatkan spektrum-spektrum yang tersembunyi. *Fourier Transform Infra Red (FT-IR)* digunakan juga pada karakterisasi zeolit dengan tujuan untuk mengetahui jenis ikatan dari zeolit tersebut dan karakterisasi zeolit dengan *Fourier Transform Infra Red (FT-IR)* memiliki keunggulan yaitu dapat membaca spektra dengan jelas (anonim, 2014).

2.6.3 *Spektroskopi difraksi sinar-X (X-Ray Diffraction/XRD)*

Spektroskopi difraksi sinar-X merupakan salah satu metoda karakterisasi material yang paling tua dan paling sering digunakan hingga sekarang. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel.

Difraksi sinar-X terjadi pada hamburan elastis foton-foton sinar-X oleh atom dalam sebuah kisi periodik. Hamburan monokromatis sinar-X dalam fasa tersebut memberikan interferensi yang konstruktif. Dasar dari penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal adalah berdasarkan persamaan Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta ; n = 1, 2, \dots$$

Dengan λ adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan, d adalah jarak antara dua bidang kisi, θ adalah sudut antara sinar datang dengan bidang normal, dan n adalah bilangan bulat yang disebut sebagai orde pembiasan.

Difraksi sinar-X digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal suatu padatan dengan cara membandingkan nilai jarak d (bidang kristal) dan intensitas puncak difraksi dengan data standar. Sinar-X merupakan radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang sekitar 100 μm yang dihasilkan dari penembakan logam dengan elektron berenergi tinggi. Melalui analisis XRD diketahui dimensi kisi (d = jarak antar kisi) dalam struktur mineral (Octaviani, 2012).

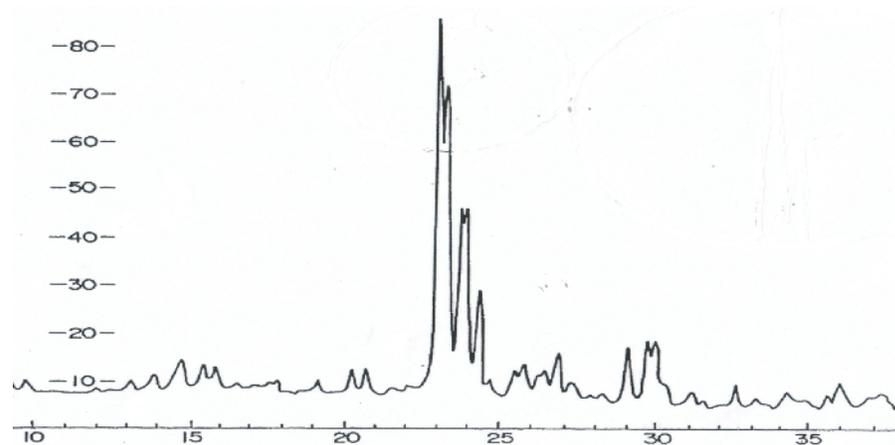
Komponen utama XRD yaitu terdiri dari tabung katoda (tempat terbentuknya sinar-X), sampel holder dan detektor. Pada XRD yang berada di lab pusat MIPA ini menggunakan sumber Co dengan komponen lain berupa *cooler* yang digunakan untuk mendinginkan, karena ketika proses pembentukan sinar-X dikeluarkan energi yang tinggi dan menghasilkan panas. Kemudian seperangkat komputer dan CPU.

Cara kerja alat ini adalah dengan meletakkan material uji pada sampel *holder difraktometer* sinar-X. Proses difraksi sinar-X dimulai dengan menyalakan difraktometer sehingga diperoleh hasil difraksi berupa difraktogram yang menyatakan hubungan antara sudut difraksi 2θ dengan intensitas sinar-X yang dipantulkan. Jika seberkas sinar-X dijatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal itu akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi. Makin banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel, makin kuat intensitas pembiasan yang dihasilkannya.

Tiap puncak yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Puncak-puncak yang didapatkan dari data pengukuran ini kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X untuk hampir semua jenis material. Standar ini disebut JCPDS. Dalam

sintesis zeolit perlu dilakukan karakterisasi dengan XRD dengan tujuan untuk mengetahui struktur kristal. Teknik difraksi sinar-X juga digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki orde yang sama.

Dengan menggunakan metode difraksi sinar-X, struktur molekul yang sangat kompleks dapat ditentukan. Misalnya struktur DNA yang sangat kompleks dapat ditentukan dengan metode sinar-X seperti yang telah dilakukan oleh Crick dan Watson.



Gambar 6. Spektrum Difraksi Sinar X ZSM-5 Standar

Dimana : sumbu X ; sudut 2 theta, sumbu Y ; tingkat kristalinitas (%)

Sumber : Onodera dkk (1990)

Karakterisasi produk sintesa dengan difraksi sinar-X ZSM-5 standar memiliki 3 puncak terkuat pada sudut 2 theta antara 22 – 25 derajat (Onodera dkk., 1990). Ketiga puncak terkuat tersebut tepatnya berada pada sudut 2 theta berturut-turut 23,11; 23,92; dan 24,43 derajat (Zahrina, 2002). Perbandingan spektrum difraksi sinar X produk sintesis pada nisbah Si/Al 40 pada temperatur 200°C selama 24 jam dengan ZSM-5 standar diperlihatkan pada Gambar 6.

Dari Gambar 6 terlihat bahwa pada spectrum difraksi sinar-X produk sintesa pada nisbah Si/Al 50 pada temperature 200°C selama 24 jam terdapat dua puncak

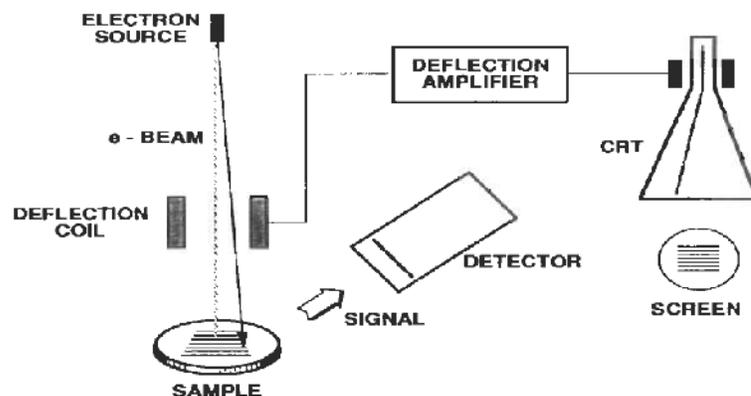
terkuat ZSM-5 standar yaitu pada $2\theta = 23,1$ dan $23,9$ derajat. Namun, puncak pada sudut $2\theta = 24,43$ derajat tidak terdapat pada produk sintesa. Kegunaan dan aplikasi XRD, yaitu :

1. Membedakan antara material yang bersifat kristal dengan amorf
2. Mengukur macam-macam keacakan dan penyimpangan kristal.

2.6.4 Scanning Elektron Microscopy (SEM)

Scanning Elektron Microscopy (SEM) digunakan untuk analisis mikrostruktur dan untuk melakukan investigasi yang berhubungan dengan proses, sifat, dan karakteristik material yang berhubungan dengan struktur mikronya.

Scanning Elektron Microscopy (SEM) menyediakan informasi yang berhubungan dengan topografi, morfologi, distribusi fasa, perbedaan komposisi, struktur kristal, orientasi kristal, adanya cacat pada struktur mikro dan lokasi cacat pada struktur mikro. Kelebihan *Scanning Elektron Microscopy* (SEM) terletak pada fleksibilitas dari pengujian dengan metode ini karena pembangkit menggunakan sinyal ganda, proses pembentukan gambar yang mudah, rentang pembesaran yang lebar, dan bidang kedalaman yang sangat besar.



Gambar 7. Mekanisme Scanning Elektron Microscopy (SEM)

Sumber : Jurnal ITB (2011)

Dalam sistematika *Scanning Elektron Microscopy* (SEM) seperti pada Gambar 7, sumber elektron difokuskan ke dalam *fine probe* yang bergaris pada permukaan spesimen. Elektron menembus permukaan, sejumlah interaksi yang terjadi dapat menghasilkan emisi elektron atau foton dari permukaan. Sebuah fraksi dari emisi elektron dapat dikumpulkan oleh detektor dan hasilnya dapat digunakan untuk modulasi kecerahan pada CRT (*cathode ray tube*) yang memiliki input x dan y dikendalikan dalam sinkronisasi dengan tegangan x-y. Dalam hal ini gambar diproduksi pada CRT, tiap titik yang sinar menabrak sampel dipetakan secara langsung dalam titik yang sesuai pada layar.