

ANALISA KUALITATIF DAN STRUKTUR KRISTAL
BAHAN SEMEN PORTLAND JENIS I DENGAN
DIFRAKSI SINAR - X



TESIS

Untuk melengkapi tugas-tugas dan
memenuhi syarat-syarat untuk
mencapai gelar Sarjana



Oleh

SUDIRMAN LB. PARTANG

83 03 148

PERPUSTAKAAN PUSAT UNIV. HASANUDDIN	
Tgl. terima	13/3-91
Asal dari	Pah. Kadh.
Janyaknya	1 xp.
Harga	-
No. Inventaris	91 05 380
No. Klas	

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN

1990

ANALISA KUALITATIF DAN STRUKTUR KRISTAL
BAHAN SEMEN PORTLAND JENIS I DENGAN
DIFRAKSI SINAR-X

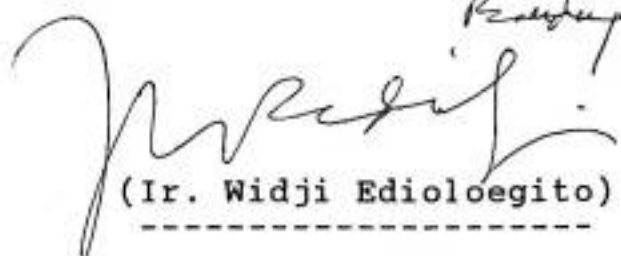
Disetujui oleh ;

Pembimbing Utama



(Dra. Nurlaela Rauf, MSc.)

Pembimbing Pertama



(Ir. Widji Edioloeigito)

Rauf 26/6-90

Pada tanggal, 16 Juni 1990

Tulisan ini aku persembahkan:

Buat Ayah dan Ibundaku
serta gadis pujaan idaman
kalbuku.

Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi
dan silih bergantinya malam dan siang terdapat
tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal.

(Q. S 3 : 190)

Tuntutlah ilmu dari buaian sampai ke liang
kubur

(Al Hadist)

SELAMAT TINGGAL KAMPUSKU

Engkau keras dan kejam
Terkadang kaupun sadis
Tapi...sesungguhnya kau penyayang

Wahai si Kepala merah sang menara
Dalam dirimu aku temukan diriku
Dalam lambangmu aku lukis jiwaku
Dalam warnamu aku bangkitkan semangatku
Dalam lagumu aku ayunkan langkahku
Dalam dharmamu aku baktikan ilmuku

Kepada kawan segenerasi yang tegar dalam idealisme
kemahasiswaan dan penegak panji Alma Mater :

1. Drg. Arsunan Arsin
2. Ir. Ansar Anca Rahman
3. Drs. Nasruddin Budiman
4. Drs.Med. Abraham
5. Budi Amin
6. Aminuddin Syam
7. Hidayat Hafid

SARI BACAAN

Pada bahan semen portland terkandung berbagai macam senyawa dengan kadar tertentu, masing-masing senyawa mempunyai struktur geometri kristal .

Identifikasi senyawa dari setiap langkah proses pembuatan semen portland digunakan metoda difraksi sinar-x. Untuk menginterpretasi pola difraksi, digunakan metoda Hanawalt . Dan sebagai data pembanding diambil dari hasil flouresensi sinar-x.

Hasil pola difraksi sinar-x menunjukkan bahwa senyawa yang dikandung pada semen portland jenis I adalah ; tricalcium silikat berstruktur heksagonal, dicalcium silikat berstruktur monoklinik, tricalcium aluminat berstruktur kubik, tetracalcium aluminoferrit berstruktur orthorombik dan CaO bebas berstruktur kubik.

Kata pustaka : difraksi sinar-x
struktur kristal
calcium silikat

ABSTRACT

The Portland cement materials are consist of various chemical compound with certain degree and each of them crystal-geometrical structure.

Chemical compound identification by x-ray diffraction method for every step of processing. The Hanawalt method is used to interpret the diffraction patterns, and x-ray flouresence results are taken as comparative data.

The result of x-ray diffraction pattern implied that the chemical compound of portland cement type I in the following geometrical structure :tricalcium silicate is hexagonal, dicalcium silicate is monoclinic, tricalcium aluminate is cubic, tetracalcium aluminoferrite is orthorombic, and CaO -free is cubic respectively.

Key wards ; x-ray diffraction
crystal structure
calsium silicate

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah, Tuhan Yang Maha Esa, senantiasa melimpahkan hidayah dan rahmat kepada hambanya, sehingga atas izinNya, penulis dapat merampungkan tugas akhir ini, sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar kesarjanaan pada jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengatahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Dengan segala keterbatasan kemampuan dan fasilitas penulis menyadari adanya kekurangsempurnaan dari tulisan ini. Meskipun demikian penulis masih mengharapkan tulisan ini dapat bermanfaat.

Kepada ibu Dra. Nurlaela Rauf, MSc dan bapak Ir. Widji Edioloeigito, penulis menghaturkan terima kasih atas perhatian yang diberikan dalam membimbing penulis dari penelitian sampai rampungnya tulisan ini.

Kepada kedua orang tua; ayah dan ibu serta kak Via yang tidak mengenal lelah dan jenuh dan tak henti-hentinya memberikan bantuan, iringan doa yang tidak ternilai lagi. Mudah-mudahan Tuhanlah yang akan membalas segalanya.

Demikian pula penulis menghaturkan terima kasih kepada :

1. Bapak DR. Dadang Ahmad sebagai ketua jurusan Fisika dan seluruh staf dosen Fisika
2. Bapak Drs. Arsyad Sumah yang menjadi penasehat akademik penulis sejak awal kuliah
3. Bapak direktur utama PT.Semen Tonasa yang telah

mengizinkan penulis mengambil sampel dan memanfaatkan fasilitas laboratoriumnya

4. Bapak Drs. Ilyas Ginting, MSc atas bantuan fasilitas dan bimbingannya selama penelitian di Pusat Penelitian Teknik Nuklir (PPTN) Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) Bandung.
5. Kakak Drs. Ek. L. Partang dan keluarga yang banyak memberikan bantuan dalam merampungkan tulisan ini
6. Segenap kawan-kawan mahasiswa Fisika, khususnya Hairil Amri, Rusdi, Ummu serta Linda dan siapa saja yang telah memberikan bantuan baik langsung maupun tidak langsung.

Kepada semua pihak ,yang telah memberikan bantuan semoga Allah yang akan membalasnya.

Tamalanrea Ujung Pandang, Juni 1990

P e n u l i s

DAFTAR ISI

SARI BACAAN		i
ABSTRACT		ii
KATA PENGANTAR		iii
DAFTAR ISI		v
DAFTAR GAMBAR		vii
DAFTAR TABEL		viii
BAB I	PENDAHULUAN	
I.1	Latar Belakang	1
I.2	Ruang Lingkup	2
I.3	Tujuan Penelitian	2
I.4	Sistematika Penulisan	2
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA	
II.1	Semen Portland	4
II.1.1	Bahan Baku Dan Kandungannya	5
II.1.2	Proses Pembuatan Semen	8
II.1.3	Senyawa Utama Semen dan Fungsinya	11
II.2.	Struktur Kristal	13
II.2.1	Kisi Kristal	15
II.2.2	Geometri Kristal	15
II.2.3	Hamburan Kisi Kristal	23
II.3	Difraksi Sinar-x	26
BAB III	METODOLOGI	
III.1	Difraksi Sinar-x	34
III.2	Flouresensi Sinar-x	37

BAB IV	HASIL DAN BAHASAN	
IV.1	Hasil Analisa Difraksi Sinar-X	38
IV.2	Hasil Analisa Flouresensi Sinar-X	49
IV.3	Bahasan	49
BAB V	SIMPULAN DAN SARAN	
V.1	Simpulan	54
V.2	Saran-Saran	55
DAFTAR PUSTAKA		57
LAMPIRAN		59

DAFTAR GAMBAR

2.1	Proses Pembuatan Semen	10
2.2	Kisi Bravais untuk dua dimensi	16
2.3	Kisi Bravais untuk tiga dimensi	18
2.4	Kedudukan bidang hkl	21
2.5	Jarak bidang hkl	22
2.6	Arah vektor hamburan	25
2.7	Model kartu ASTM	31
3.1	Bagan difraktometer sinar-x	35
3.2	Susunan celah dalam difraktometer	35
4.1	Grafik difraksi sinar-x bahan raw meal	39
4.2	Grafik difraksi sinar-x bahan kiln feed	40
4.3	Grafik difraksi sinar-x bahan klinker	41
4.4	Grafik difraksi sinar-x bahan gipsum	42
4.5	Grafik difraksi sinar-x bahan semen	43

DAFTAR TABEL

2.1	Komposisi kimia semen Portland menurut Bogue	6
2.2	Pembagian kisi Bravais untuk tiga dimensi	17
4.1	Data difraksi sinar-x bahan raw meal	44
4.2	Data difraksi sinar-x bahan kiln feed	45
4.3	Data difraksi sinar-x bahan klinker	46
4.4	Data difraksi sinar-x bahan gipsum	47
4.5	Data difraksi sinar-x bahan semen	48
4.6	Kandungan senyawa dan struktur kristal	50
4.7	Data flouresensi sinar-x	52

BAB I

P E N D A H U L U A N

I.1 Latar Belakang

Bumi Indonesia dengan daratan yang terbentang luas dari berbagai pulau terkandung banyak sekali mineral yang dapat diambil sebagai bahan baku industri. Pegunungan kapur misalnya dapat dijadikan sebagai bahan baku utama untuk industri semen .

Semen sendiri adalah suatu hasil industri kimia yang diproduksi secara besar-besaran dan penggunaannyapun sudah sedemikian luas diberbagai bidang pembangunan fisik seperti gedung-gedung bertingkat, jembatan, bendungan, dan proyek pembuatan jalan layang bebas hambatan.

Bahan baku semen hampir semuanya diambil dari alam dan sebahagian kecil bahan tambahan dari hasil industri petrokimia. Jenis semen yang paling banyak diproduksi oleh industri semen adalah semen portland terutama jenis I karena tidak memerlukan persyaratan- persyaratan khusus.

Penelitian dari sifat-sifat fisis dari semen dan bahan bakunya sangat penting terutama menunjang peningkatan dan pengendalian mutu serta penggunaannya.

I.2 Ruang Lingkup

Dalam meneliti sifat-sifat fisis dari semen dan bahan bakunya digunakan metoda difraksi sinar-x dan flouresensi sinar-x sebagai data pembanding.

Dalam penelitian ini pula dijajaki tentang langkah-langkah pembuatan semen dan hasil setiap langkah. Dari sifat fisis yang ada, maka penelitian difokuskan pada analisa kualitatif bahan dengan metoda Hanawalt dan struktur mikro pada senyawa pada setiap bahan dalam proses pembuatan semen portland jenis I, serta perbandingan komposisi senyawa.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengidentifikasi senyawa-senyawa yang terkandung dalam bahan.
2. Menentukan struktur geometri kristal dari masing-masing senyawa.
3. Menganalisa mutu semen dari segi komposisi

I.4 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan ini adalah sebagai berikut :

- BAB I Dibahas mengenai latar belakang masalah, ruang lingkup dan tujuan penelitian.
- BAB II Dibahas mengenai bahan baku, semen dan kandungannya, proses pembuatan semen, struktur

kristal, sinar-x, dan hamburan oleh kristal.

- BAB III Dibahas mengenai cara pengambilan data dari kedua metode, alat yang digunakan.
- BAB IV Ditampilkan hasil yang didapatkan dengan menggunakan metoda pada BAB III.
- BAB V Berisi simpulan dan saran yang diambil berdasarkan pengalaman yang didapatkan selama mengadakan pengamatan sesuai pada BAB IV.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Semen Portland

Semen adalah bahan perekat yang dapat menyatukan atau mengikat bahan-bahan padat menjadi satu kesatuan massa yang kokoh. Atau dapat pula dikatakan bahwa semen adalah bahan perekat yang berupa oksida-oksida tanah, tidak terdapat di alam, tetapi dibuat dengan sengaja.

Menurut Standar Industri Indonesia (SII) nomor 0013-81 bahwa semen portland didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat calcium yang bersifat hidrolis bersama bahan tambahan dan biasanya digunakan gips.

Klassifikasi semen portland, menurut Standar Industri Indonesia (SII) nomor 0013-81, dibedakan atas lima (5) jenis sebagai berikut :

Jenis I : semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.

Jenis II : semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang.

- Jenis III : semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan yang tinggi pada fase permukaan setelah pengikatan terjadi.
- Jenis IV : semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan panas hidrasi yang rendah.
- Jenis V : Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan yang tinggi terhadap sulfat.

Tabel yang khusus memuat secara lengkap tentang komposisi kimia dari masing-masing jenis dapat dilihat pada tabel (2.1).

II.1.1 Bahan Baku Dan Kandungannya

Dalam proses pembuatan semen digunakan dua bahan baku utama yaitu ; batu kapur dan tanah liat, serta beberapa bahan tambahan sebagai pengoreksi komposisi, senyawa-senyawa yang menyusun semen berasal dari tanah liat dan batu kapur.

Batu kapur merupakan sumber utama senyawa calsium. Batu kapur murni umumnya berupa kalsit atau aragonit yang secara kimia keduanya dinamakan calsium karbonat (CaCO_3). Selain calsium karbonat yang merupakan komponen terbesar, dalam batu kapur juga didapati senyawa karbonat dan silikat dari magnesium, aluminium dan besi dalam jumlah yang kecil. Senyawa karbonat dan magnesium dalam batu kapur umumnya

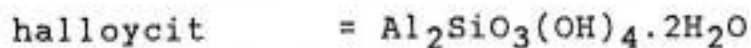
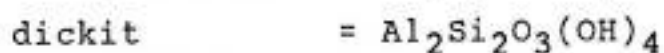
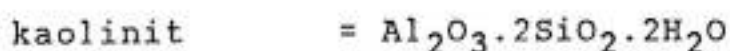
Tabel 2.1. KOMPOSISI KIMIA SEMEN PORTLAND
MENURUT BOGUE 1955 (ref 3)

S E N Y A W A	J E N I S S E M E N				
	I	II	III	IV	V
C S (%) 3	45	44	53	28	38
C S (%) 2	27	31	19	49	43
C A (%) 3	11	5	11	4	4
C A F (%) 4	8	13	9	12	9
MgO (%)	2,9	2,5	2,0	1,8	1,9
CaO (%)	0,5	0,4	0,7	0,2	0,5
CaSO ₄ (%) 4	3,1	2,8	4,0	3,2	2,7
T O T A L (%)	98	99	99	98	99

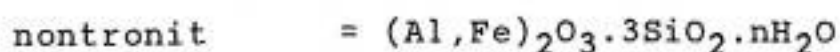
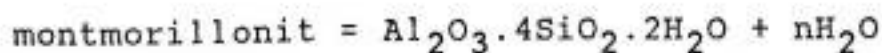
berupa dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Dalam proses pembuatan semen dolomit ini umumnya berubah bentuk menjadi kristal oksida magnesium bebas (MgO). MgO ini sebagai penyebab pemuaihan dalam penggunaan semen, yang dapat merendahkan mutu semen. Keseluruhan senyawa-senyawa karbonat yang terdapat dalam batu kapur umumnya dinyatakan dalam persen karbonat total.

Tanah liat merupakan sumber utama senyawa silikat. Disamping itu juga merupakan sumber senyawa-senyawa penting lainnya seperti senyawa-senyawa alumina dan besi. Dalam jumlah yang amat kecil kadang didapati juga senyawa alkali (natrium dan calsium). Senyawa tersebut dalam tanah liat umumnya dalam bentuk kelompok mineral misalnya :

- kelompok kaolinit, terdiri dari :



- kelompok montmorillonit, terdiri dari :



- kelompok illit = $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Biasanya dalam tanah liat kadar senyawa-senyawa SiO_2 dan Fe_2O_3 sebagai senyawa utama belumlah memenuhi syarat, maka sering digunakan pasir silika sebagai pengoreksi kadar SiO_2 yang relatif rendah. Sedangkan pasir besi digunakan sebagai pengoreksi kadar oksida besi (Fe_2O_3) atau pengoreksi perbandingan antara Al_2O_3 dengan Fe_2O_3 . Dan sebagai bahan baku pembantu gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) harus ada dalam semen portland dan merupakan sumber oksida belerang (SO_3) yang amat penting.

II.1.2 Proses Pembuatan Semen

Dalam proses pembuatan semen dikenal dua proses pengolahan yakni proses basah dan proses kering. Dalam pembahasan ini akan dipaparkan tentang proses kering sesuai proses sampel.

Pada proses kering, batu kapur sebagai salah satu bahan baku semen diambil dari "quarry" dipecah-pecah sehingga diperoleh butiran yang berukuran lebih kecil dari 35 mm. Butiran ini disimpan dalam silo batu kapur.

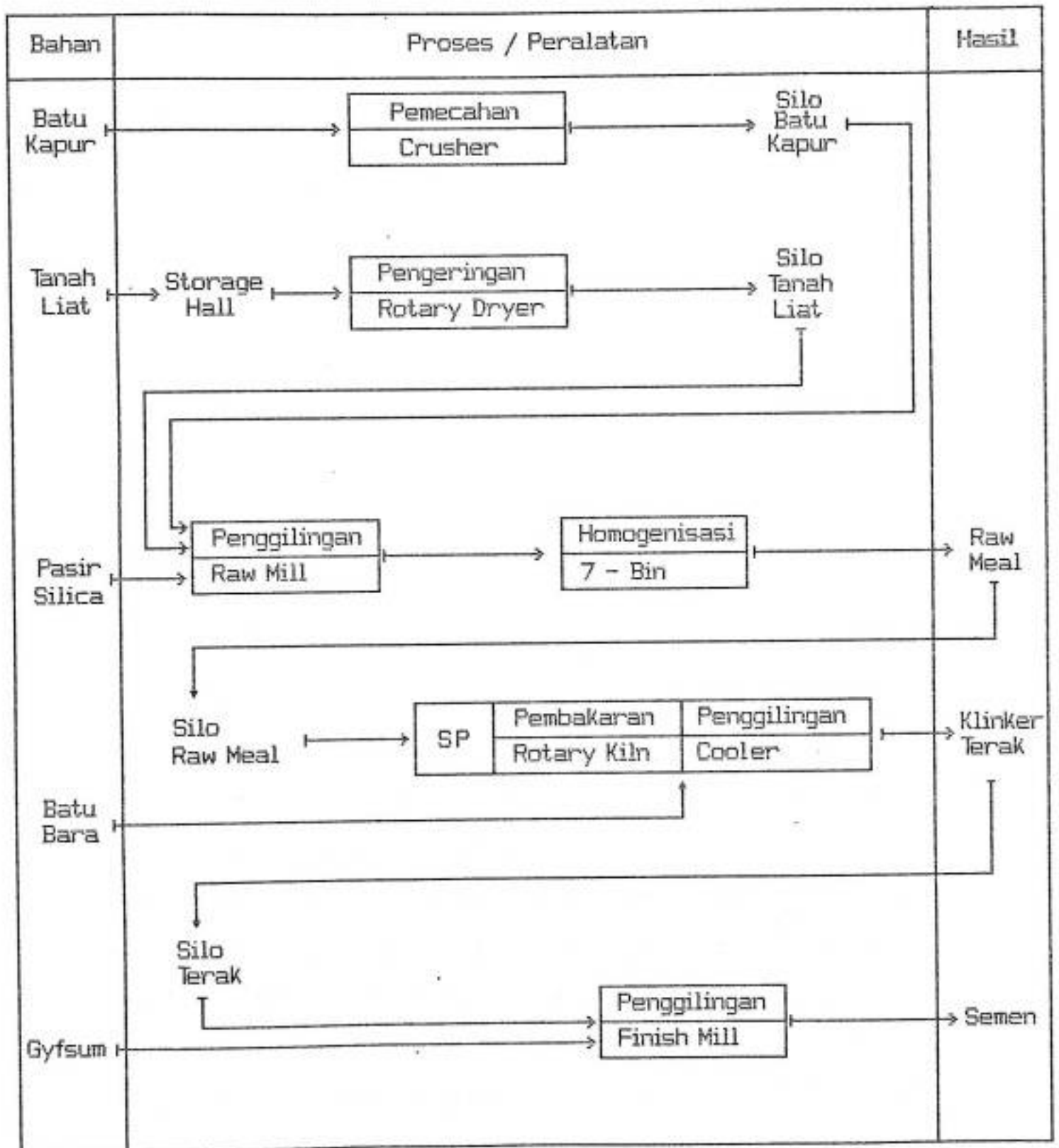
Demikian pula tanah liat yang diambil dari "clay pit", disimpan dalam gudang tanah liat kemudian diangkut untuk dikeringkan dalam "rotary dryer". Tanah liat hasil pengeringan disimpan dalam silo tanah liat.

Bahan koreksi pasir silika, jika dibutuhkan dapat dicampurkan pada tanah liat dengan perbandingan tertentu untuk kemudian dikeringkan seperti proses pengeringan tadi.

Batu kapur, tanah liat, dan pasir silika dengan perbandingan tertentu, digiling dalam "raw mill" sehingga diperoleh tepung campuran bahan baku. Tepung campuran ini dimasukkan ke dalam tujuh buah bin untuk dicampur agar diperoleh homogenisasi yang lebih baik. Campuran tadi lalu diumpankan ke dalam tanur putar melalui empat tingkat "cyclone suspension preheater konvensional". Dalam preheater, umpan tanur tadi dipanasi oleh hasil pembakaran batu bara dan udara. Umpan tanur yang suhunya tinggi, kemudian dimasukkan ke dalam tanur putar, umpan tanur dikenakan lagi suhu yang lebih tinggi secara bertahap.

Akibatnya terjadilah reaksi-reaksi kimia secara bertahap sesuai dengan tahapan suhu yang dilalui. Suhu tertinggi mencapai sekitar 1450°C . Keseluruhan proses tadi umumnya disebut proses pembakaran.

Campuran hasil-hasil yang terbentuk disebut terak. Terak ini kemudian didinginkan dengan bantuan "planetary cooler" selanjutnya diangkut ke silo untuk disimpan.



Gambar (2.1) Diagram Proses Pembuatan Semen Portland (ref 7)

Bersama-sama dengan sejumlah gipsum tertentu, terak lalu digiling dalam finish mill untuk menjadi semen. Perhatikan gambar (2.1).

II.1.3 Senyawa Utama Semen Dan Fungsinya

Semen terdiri dari berbagai senyawa-senyawa sebagai komponen utama dari hasil proses pembuatan (pembakaran) yaitu :

1. Tricalcium silikat
2. Dicalcium silikat
3. Tricalcium aluminat
4. Tetracalcium aluminoferrit
5. Gipsum

Tricalcium silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) yang biasa disingkat dengan C_3S merupakan komponen penentu utama kekuatan awal semen. Hal ini disebabkan karena jumlahnya sangat besar dan reaksi hidrasinya berlangsung cepat sehingga diperoleh kekuatan awal yang tinggi, khusus pada minggu-minggu pertama sampai 28 hari sesudah pengikatan. Sifat termal, khusus pemuaian, peranannya cukup kecil karena volumenya tidak terlalu besar dibandingkan dengan ruang yang ada sebelum reaksi hidrasi. Sedangkan panas hidrasi yang ditimbulkan oleh komponen tricalcium silikat ini adalah kedua terbesar sesudah tricalcium aluminat.

Dicalcium silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) yang biasa disingkat dengan C_2S merupakan komponen penentu utama kekuatan akhir semu. Reaksi hidrasinya lambat menyebabkan pengaruhnya terhadap kekuatan berlangsung lambat. Peranannya dapat kelihatan setelah 28 hari sesudah pengikatan. Sifat termal, untuk pemuaian tidak memberikan pengaruh yang berarti. Sedangkan panas hidrasinya termasuk yang terendah diantara komponen utama lainnya.

Tricalcium aluminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) yang biasa disingkat dengan C_3A ini memegang peranan penting dalam kekuatannya untuk umur 1 - 3 hari. Ini disebabkan karena panas hidrasinya sangat tinggi dan dapat mempercepat reaksi hidrasi semen secara keseluruhan. Tricalcium aluminat setelah reaksi hidrasi memberikan daya ikat yang rendah terhadap semen, tetapi kadar dari senyawa ini sangat menentukan ketahanan semen terhadap senyawa-senyawa sulfat. Makin rendah kadar tricalcium aluminat dalam semen, makin tahan terhadap serangan sulfat. Sifat termal, makin tinggi kadar tricalcium aluminat, makin besar pemuaian yang terjadi. Untuk kadar tricalcium aluminat tertentu, makin tinggi kadar gipsum tersebut, makin besar juga pemuaian yang terjadi.

Tetracalcium aluminoferrit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) yang biasa disingkat C_4AF ini hampir tidak berpengaruh

pada pengembangan kekuatan semen. Peranannya yang lain adalah menentukan warna semen. Panas hidrasi yang ditimbulkan relatif rendah.

Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) merupakan pengatur waktu pengikatan semen. Jika kadar gipsum ini terlalu banyak, dapat menyebabkan terjadinya pemuaian karena bereaksi dengan tricalcium aluminat pada waktu semen digunakan. Dan ini menimbulkan keretakan-keretakan.

II.2 Struktur Kristal

Suatu zat padat yang terlihat sebagai benda tegar yang padat, secara mikro ia terdiri dari atom-atom. Benda padat yang atom-atomnya tersusun rapih dalam ruang dinamakan kristal. Susunan atom dalam kristal ternyata tidak semuanya sama, ada berbagai macam susunan atau ada beberapa macam struktur kristal, bergantung dari susunan geometriknya .

Dalam kenyataannya tidak ada kristal yang sempurna karena berbagai keterbatasan fisik sebagai berikut :

1. Ukurannya terbatas
2. Tidak mungkin dibuat kristal tanpa cacat geometrik
3. Tidak mungkin dibuat kristal tanpa adanya ketakmurnian zat.
4. Pada suhu $T > 0^\circ$ Kelvin, atom-atom dalam kristal

bergetar di sekitar posisi kesetimbangannya.

Karena adanya faktor di atas, maka perlu ditentukan derajat kristalinitas. Derajat kristalinitas suatu bahan dapat menentukan yang bukan kristal murni dan polikristal, digunakan perbandingan massa kristal dan massa totalnya. Massa total diambil dari penjumlahan antara massa bagian kristal dan massa bagian amorp. Persamaanya :

$$X = \frac{M_k}{M_t} = \frac{M_k}{M_k + M_a} \quad (2.1a)$$

Dimana : X = derajat kristalinitas

Mt = massa total

Mk = massa kristal

Ma = massa amorp

Yang menghasilkan puncak-puncak difraksi adalah bahagian kristal, sedangkan amorp menghasilkan pola intensitas yang dibatasi oleh garis melengkung. Dengan pendekatan kasar, derajat kristalinitas, dapat dihitung dengan melihat grafik melalui persamaan :

$$X = \frac{I_k}{I_t} = \frac{I_k}{I_k + I_a} \quad (2.1b)$$

dimana : Ik = intensitas bagian kristal

Ia = intensitas bagian amorp

It = intensitas total

II.2.1 Kisi Kristal

Setiap atom dalam kristal dianggap sebagai suatu titik, tepat pada kedudukan setimbang tiap di dalam ruang. Pola geometrik yang diperoleh dinamakan kisi-kisi kristal atau kisi. Khusus untuk kisi Bravais, semua itu ekuivalen, artinya semua titik mempunyai lingkungan geometrik yang tepat sama. Ada beberapa macam dasar kisi kristal ditinjau dari dimensinya.

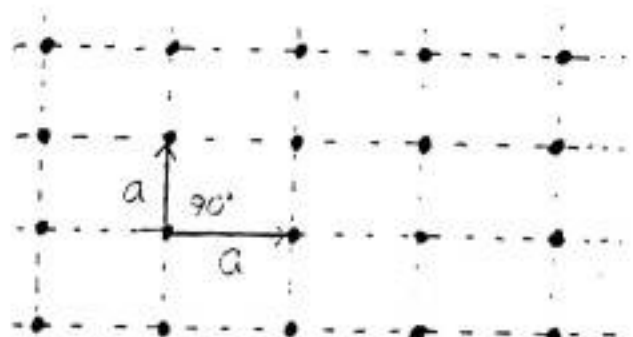
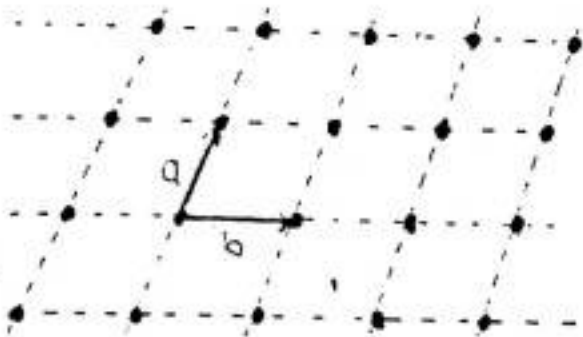
Ditinjau dari dua dimensi, maka kisi Bravais dibagi atas lima (5) macam. Untuk kesetangkupan dua dimensi dengan sisi yang sama ($a = b$), sudut antara dua sisi itu terbatas pada harga-harga :

$$\alpha = 0^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}, 180^{\circ}$$

Bentuk kisi Bravais yang ditinjau dari dua dimensi dapat dilihat pada gambar (2.2). Untuk tiga dimensi, maka ada tujuh (7) buah sistim kristal dengan empat belas (14) buah kisi Bravais. Dan selanjutnya dapat dilihat pada tabel (2.2) dan gambar (2.3).

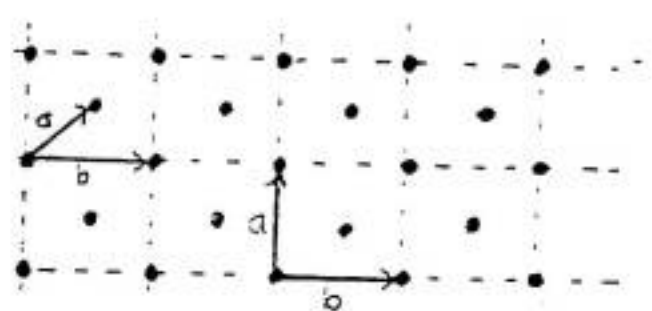
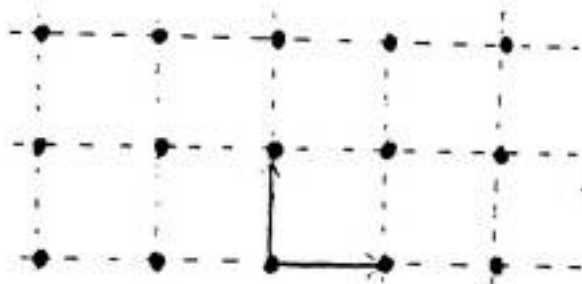
II.2.2 Geometri Kristal

Dalam membahas lebih jauh tentang geometri kristal, vektor basis dan kisi resiprok dapat



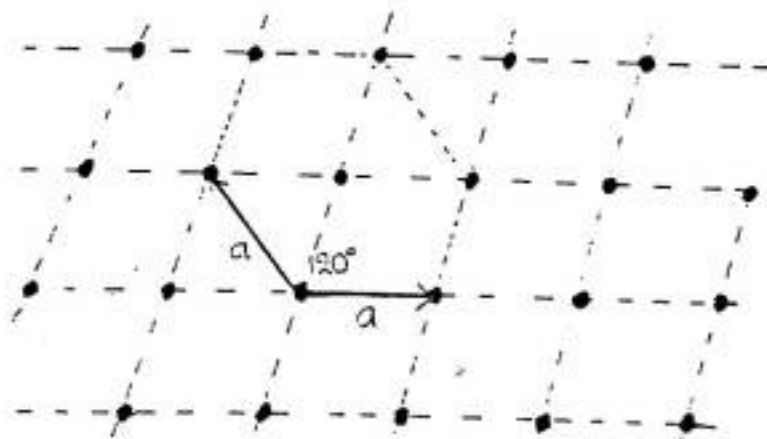
a) Genjang, $a \neq b$, $\varphi \neq 90^\circ$

b) Segi empat, $a = b$, $\varphi = 90^\circ$



c) Segi empat panjang,
 $a \neq b$, $\varphi = 90^\circ$

d) Segi empat panjang berpusat,
 $a \neq b$, $\varphi = 90^\circ$

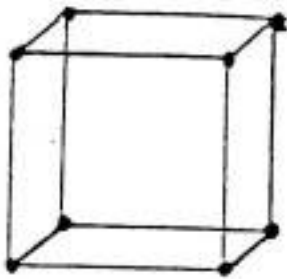


e) Heksagonal, $a = b$, $\varphi = 120^\circ$

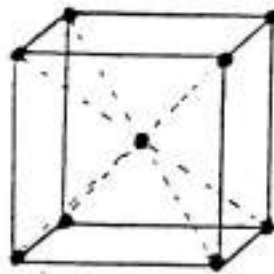
Gambar (2.2) Kisi Bravais untuk dua dimensi (ref.12)

tabel (2.2) PEMBAGIAN KISI BRAVAIS UNTUK TIGA DIMENSI (ref 13)

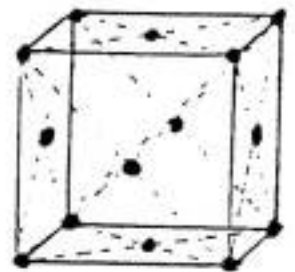
SISTIM KRISTAL	KISI BRAVAIS	GEMETRI SEL
- TRICLINIK	P (primitive)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$
- MONOCLINIK	P (primitive) C (base centred)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90$ $\beta \neq 90$
- ORTHOROMBIC	P (primitive) C (base centred) I (body centred) F (face centred)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90$
- TETRAGONAL	P (primitive) I (body centred)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90$
- KUBIK	P (primitive) I (body centred) F (face centred)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90$
- TRIGONAL	R (rhombohedral primitive)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma$ (120 tapi bukan 90
- HEKSAGONAL	P (primitive)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90$ $\gamma = 120$



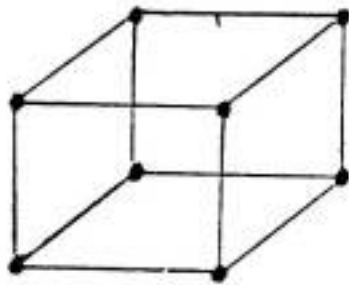
Kubik P



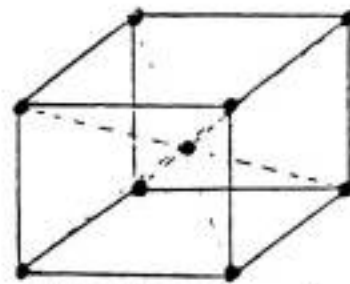
Kubik I



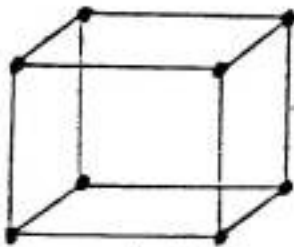
Kubik F



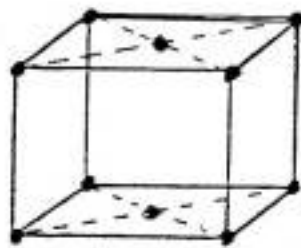
Tetragonal P



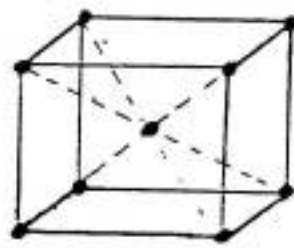
Tetragonal F



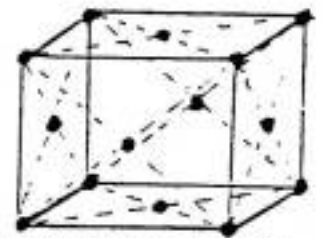
Orthorombik P



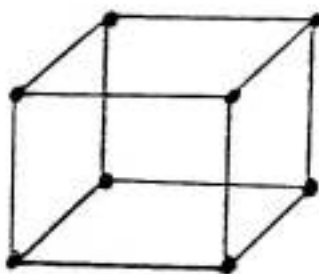
Orthorombik I



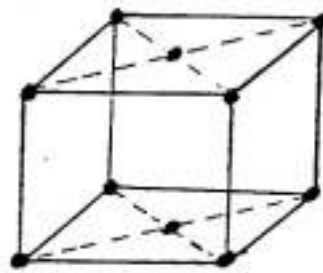
Orthorombik F



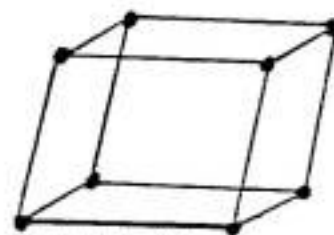
Orthorombik F



Monoklinik P



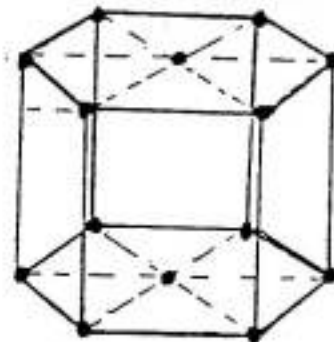
Monoklinik C



Triklinik



Trigonal R



Heksagonal P

Gambar (2.3) Kisi Bravais untuk tiga dimensi (ref.13)

mempermudah pemahaman kita pada pembahasan selanjutnya. Andaikan bahwa setiap titik dalam kisi dua dimensi, dapat ditulis sebagai ujung dari vektor \bar{R} , dengan :

$$\bar{R} = n_1 \bar{a} + n_2 \bar{b} \quad (2.2a)$$

dengan (n_1, n_2) bilangan bulat positif atau negatif, maka \bar{a} dan \bar{b} dinamakan vektor basis. Jika ditinjau dari tiga dimensi, \bar{a} , \bar{b} , dan \bar{c} merupakan vektor basis untuk suatu kisi, besar dan arahnya sebarang, dan tidak ko-planar. Arah tertentu dalam kisi tersebut dinyatakan sebagai :

$$\bar{R} = n_1 \bar{a} + n_2 \bar{b} + n_3 \bar{c} \quad (2.2b)$$

Arah vektor \bar{R} dinyatakan dengan (n_1, n_2, n_3) , lazimnya dalam perbandingan bilangan bulat yang terkecil.

Jika dibataskan basis vektor sebagai berikut

$$\bar{a}^* = 2\pi \frac{(\bar{b} \times \bar{c})}{\bar{a} \cdot (\bar{b} \times \bar{c})} \quad (2.3a)$$

$$\bar{b}^* = 2\pi \frac{(\bar{c} \times \bar{a})}{\bar{b} \cdot (\bar{c} \times \bar{a})} \quad (2.3b)$$

$$\bar{c}^* = 2\pi \frac{(\bar{a} \times \bar{b})}{\bar{c} \cdot (\bar{a} \times \bar{b})} \quad (2.3c)$$

Maka dengan anggapan bahwa \bar{a}^* tegak lurus terhadap bidang (b,c); dan demikian pula permutasi siklisnya :

$$\bar{a} \cdot (\bar{b} \times \bar{c}) = \bar{b} \cdot (\bar{c} \times \bar{a}) = \bar{c} \cdot (\bar{a} \times \bar{b}) \quad (2.3d)$$

merepresentasikan volume benda yang rusuk-rusuknya dibentuk oleh vektor \bar{a} , \bar{b} , dan \bar{c} . Maka vektor basis baru ini dapat dipakai untuk membentuk kisi baru yang dibataskan oleh vektor :

$$\bar{G}_n = n_1 \bar{a}^* + n_2 \bar{b}^* + n_3 \bar{c}^* \quad (2.4)$$

dengan n_1 , n_2 dan n_3 bilangan bulat. Maka \bar{G}_n membataskan suatu kisi resiprok ; dan \bar{a}^* , \bar{b}^* , dan \bar{c}^* dinamakan vektor basis resiprok.

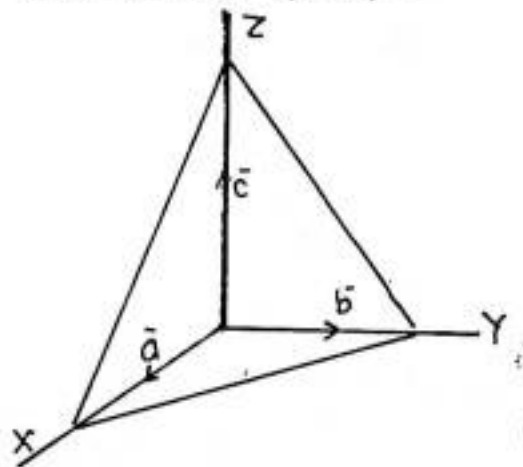
Untuk menunjukkan lebih nyata geometri kristal, maka kita melihat bagaimana menetapkan bidang kristal dalam kisi kristal. Andaikan vektor basisnya \bar{a} , \bar{b} , \bar{c} , sedangkan bidang yang ingin ditetapkan memotong sumbu vektor basis itu di x, y, dan z. Dan andaikan bahwa panjang vektor basis dinyatakan dengan a, b, dan c, maka dapat ditulis perangkat tiga bilangan ;

$$\left(\frac{x}{a} , \frac{y}{b} , \frac{z}{c} \right) \quad (2.5)$$

kemudian diambil kebalikan dari perangkat yang dimaksud

$$\left(\frac{a}{x}, \frac{b}{y}, \frac{c}{z} \right) \quad (2.6)$$

kemudian perangkat ini dinyatakan sebagai perbandingan bilangan-bilangan bulat yang terkecil yang disebut indeks Miller (h k l). Kedudukan bidang (hkl) dapat dilihat pada gambar (2.4) .



Gambar (2.4) Kedudukan bidang hkl dalam tiga dimensi (ref.13).

Untuk menghitung indeks Miller digunakan persamaan :

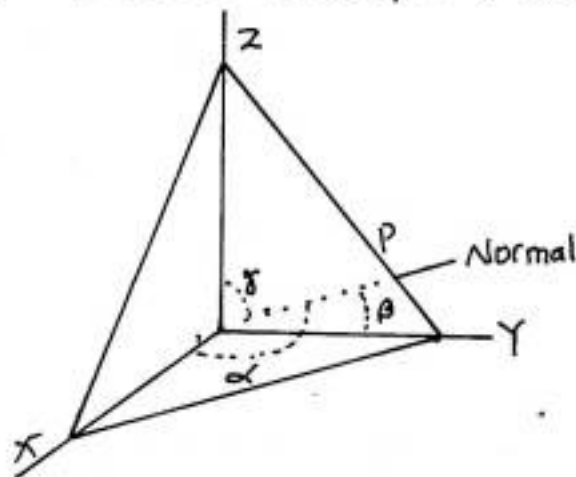
$$(h^2 + k^2 + l^2) = \frac{(a^2 + b^2 + c^2)}{d_{hkl}^2} \quad (2.6a)$$

Untuk jarak antar bidang dalam kristal biasanya disimbolkan dengan d_{hkl} , dapat dihitung dengan menggunakan suatu persamaan. Andaikan kita meninjau bahwa suatu sistim sumbu yang orthogonal, dengan $a \neq b \neq c$ dan α , β , dan γ adalah sudut garis

normal masing-masing sumbu x , y , dan z .

Jarak dari titik pusat O ke titik potong P kita namakan saja d_{hkl} , maka apabila x , y , dan z merupakan titik potong bidang (hkl) dengan sumbu x , y , dan z . Perhatikan gambar (2.5).

$$d_{hkl} = x \cos \alpha = y \cos \beta = z \cos \gamma \quad (2.7)$$



Gambar (2.5) Jarak bidang terhadap titik pusat (ref.13)

dan jika dikombinasikan dengan

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$$

akan menghasilkan :

$$d_{hkl} = \frac{1}{(1/x^2 + 1/y^2 + 1/z^2)^{1/2}} \quad (2.8)$$

Harga x , y , dan z terkait dengan bilangan hkl , sebagai berikut :

$$h = n \frac{a}{x} \quad ; \quad k = n \frac{b}{y} \quad ; \quad l = n \frac{c}{z}$$

sehingga diperoleh :

$$d_{hkl} = \frac{n}{(h^2/a^2 + k^2/b^2 + l^2/c^2)^{1/2}} \quad (2.9)$$

II.2.3 Hamburan Oleh Kisi Kristal

Pemantulan oleh kisi kristal terjadi apabila panjang gelombang sinar-x lebih kecil dari pada dua kali jarak antar bidang pemantul. Dalam kasus ini hamburan dilakukan oleh seluruh kristal, ini dilakukan dengan menjumlah gelombang yang datang dari semua atom kristal tersebut. Andaikan bahwa atom-atom dalam kristal tersebut terletak pada kedudukan \bar{R} , maka kita bataskan faktor hamburan kristal :

$$f_{cr} = \sum_{l=1}^N f_{al} \exp. i\bar{S} \cdot \bar{R}_l \quad (2.10)$$

dimana : f_{cr} = faktor hamburan atom ke-l
 \bar{R}_l = kedudukan atom yang ke-l
 \bar{S} = vektor hamburan

Dengan mengelompokkan atom-atom tersebut menurut sel satuannya :

$$\bar{R}_l = \bar{R}_l^c + \bar{\delta}_j$$

dengan : \bar{R}_l^c = kedudukan sel satuan ke-1
 $\bar{\delta}_j$ = kedudukan atom dalam sel satuan

sehingga :

$$\begin{aligned} f_{cr} &= \sum_1 f_{al} \exp. i\bar{s} \cdot [\bar{R}_l^c + \bar{\delta}_j] \\ &= \sum_1 f_{al} \exp. i\bar{s} \cdot \bar{\delta}_j \exp. i\bar{s} \cdot \bar{R}_l^c \\ f_{cr} &= \sum_j f_{aj} \exp. i\bar{s} \cdot \bar{\delta}_j \sum_1 \exp. i\bar{s} \cdot \bar{R}_l^c \quad (2.11) \end{aligned}$$

dimana :

$F = \sum_j f_{aj} \exp. i\bar{s} \cdot \bar{\delta}_j$; bergantung dari bentuk dan isi sel satuan sebagai faktor struktur geometrik

$S = \sum_1 \exp. i\bar{s} \cdot \bar{R}_l^c$; bergantung dari kisi kristal sebagai faktor struktur kisi

Dengan mengambil S sebagai faktor struktur kisi yaitu :

$$S = \sum_1 \exp. i\bar{s} \cdot \bar{R}_l^c \quad (2.12)$$

serta $\bar{s} = \bar{k} - \bar{k}_0 = \Delta \bar{k}$

\bar{R} = adalah kedudukan sel satuan yang ke-1

Dengan melihat hubungan dari penyelesaian di-bawah, yaitu:

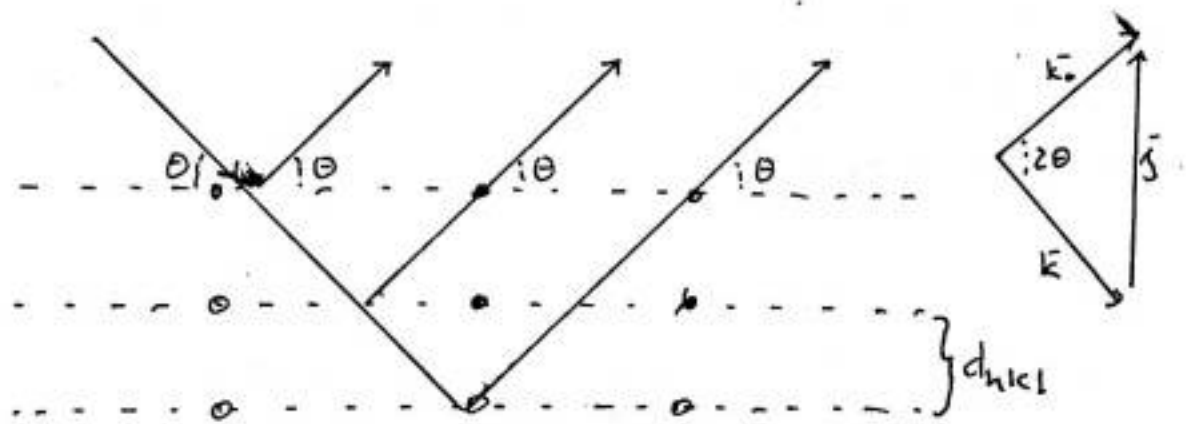
$$S = \sum \exp. i\bar{s} \cdot \bar{R}_v^c = N_{S,Ghkl} \quad (2.13)$$

yang artinya S berbeda dari nol hanya apabila

$$\bar{s} = \Delta \bar{k} = \bar{G}_{hkl}$$

Jadi syarat untuk difraksi sinar-x adalah bahwa vektor hamburan \bar{s} sama dengan suatu vektor dalam kisi resiprok

Perhatikan gambar (2.6).



Gambar (2.6) Arah vektor hamburan dan sudutnya (ref.13)

Diketahui bahwa $S = |\bar{s}| = 2k \sin \theta$, dan bahwa ;

$$G_{hkl} = \left| \bar{G}_{hkl} \right| = \frac{2 \pi}{d_{hkl}}$$

Jadi diperoleh ;

$$2 k \sin \theta = \frac{2 \pi}{d_{hkl}}, \text{ atau}$$

$$2 d_{hkl} \sin \theta = \lambda \quad (2.14)$$

dimana ; d_{hkl} = jarak bidang
 θ = sudut hamburan
 λ = panjang gelombang

Persamaan ini dikenal dengan persamaan Bragg

II. 3 Difraksi Sinar-X

Sinar-x adalah energi yang dilepaskan secara serentak dalam bentuk gelombang elektromagnetik sebagai akibat perpindahan elektron dari kulit yang tingkat energinya lebih tinggi ke kulit yang tingkat energinya lebih rendah.

Besarnya energi yang dipancarkan oleh sinar-x dengan λ sebagai panjang gelombangnya .

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.15)$$

dimana : E = energi

h = konstanta Plank = $6,626 \times 10^{-34}$ J.det

c = kecepatan cahaya = 3×10^8 m/det

λ = panjang gelombang

Panjang gelombang sinar-x berada dibawah 200 A. Jika energi dinyatakan dalam elektron volt, maka $1 \text{ eV} = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ Joule}$.

Menurut Rontgen sinar-x mempunyai sifat-sifat sebagai berikut :

1. Bila sinar-x mengenai bahan, maka akan terjadi absorpsi. Besar koefisien absorpsi bergantung pada nomor atom bahan tersebut.
2. Sinar-x memberi efek pada foto
3. Dapat mengionisasi udara
4. Sinar-x dapat dihambur oleh materi

Intensitas difraksi sinar-x sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain :

1. Polarisasi
2. Struktur
3. Multiplisitas
4. Lorentz
5. Temperatur
6. Absorpsi

Pada umumnya sinar-x adalah tidak terpolarisasi, tetapi kebanyakan radiasi setelah hamburan atau difraksi adalah terpolarisasi. Derajat polarisasi yang terjadi bergantung pada sudut difraksi.

Sedangkan pada faktor struktur, amplitudo intensitas difraksi dari atom yang terdiri dari 2 elektron untuk segala arah ternyata tidak sama dengan 2 kali amplitudo intensitas difraksi satu elektron, kecuali untuk sudut $2\theta = 0$. Efisiensi hamburan ini juga bergantung pada panjang gelombang sinar datang.

Faktor Multiplisitas, pada metoda serbuk, kristal tersusun secara acak. Dengan demikian ada dua bidang kristal yang indeksnya berlainan pada sudut tertentu dapat menyebabkan besar intensitas difraksi berlipat. Jadi intensitas relatif sebanding dengan jumlah bidang yang mempunyai d_{hkl} sama.

Faktor Lorentz, hasil difraksi sinar-x didapatkan sempurna bila dipenuhi keadaan ideal dimana sumber monokromatik dan paralel serta kristal yang sempurna. Yang sering didapati adalah sumber polikromatik dan divergen serta kristal melakukan rotasi pada sumbunya.

Dan intensitas terhadap sudut difraksi yang diperoleh, kurva puncak melebar. Sedangkan energi total difraksi yang juga disebut intensitas integrasi dapat dihitung melalui luas di bawah kurva.

Faktor temperatur, karena adanya gerakan-gerakan atom dan molekul yang ada dalam kristal menimbulkan

panas, membuat atom-atom mengalami sedikit vibrasi pada keseimbangan posisi di ruang kisi. Pada temperatur mutlak $T=0$, maka amplitudo vibrasi semakin besar dan intensitas difraksi berkurang. Efek temperatur akan lebih jelas kelihatan jika temperatur mendekati titik leleh kristal, hampir meniadakan pola difraksi.

Efek absorpsi bahan ini jelas sekali menyebabkan turunnya intensitas difraksi yang terjadi. Dari beberapa faktor yang mempengaruhi intensitas difraksi tadi dapat dirumuskan dalam suatu persamaan :

$$I = |F|^2 P L J A T \quad (2.16)$$

dimana : F = faktor struktur untuk bidang hkl

$$F = \sum_{n=1}^N f_n \exp 2 i (hU_n + kV_n + lW_n)$$

(U_n, V_n, W_n) menyatakan koordinat atom ke- n dalam limit sel, dengan jumlah atom dalam sel satuan = N

$$P = 1/2 (1 + \cos^2 2\theta) ; \text{ faktor polarisasi}$$

$$L = (\sin^2 \theta \cos \theta)^{-1}; \text{ faktor Lorentz}$$

J = faktor multiplisitas, yaitu jumlah bidang dengan indeks hkl yang berbeda tetapi menghasilkan jarak d yang sama

A = faktor absorpsi dari bahan penghambur

T = $\exp.(-2B\lambda^{-2} \sin^2 \theta)$; faktor temperatur

Setiap bahan dapat dikenali dengan melihat karakteristik bahan tersebut yaitu berupa pola difraksi yang dihasilkan. Dengan adanya pola difraksi tersebut, maka bahan-bahan tadi dapat diketahui unsur atau senyawa yang dikandungnya.

Pada tahun 1936 JD. Hanawalt telah menyusun suatu tabel guna mempercepat proses pengenalan tersebut. Pada setiap pola difraksi yang didapatkan posisi garis-garis dan intensitas relatifnya. Posisi di atas bergantung pada panjang gelombang yang digunakan. Karena panjang gelombang yang digunakan telah diketahui dan sudut θ dapat diamati langsung pada percobaan, maka jarak antar bidang (d) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Bragg.

Setiap puncak difraksi mempunyai satu harga d. Harga yang diambil adalah pasangan I dan d setiap garis difraksi sebagai acuan pola difraksi.

Pada tahun 1938 Hanawalt, Rinn, dan Frevel membuat penabelan kedua harga pasangan tersebut dengan menampilkan tiga harga d yang mempunyai intensitas terbesar yaitu d_1 , d_2 , dan d_3 , dimana :

$$I(d_1) > I(d_2) > I(d_3).$$

Kemudian pada tahun 1941 American Society For Testing And Material (ASTM) memperkenalkan penabelan tersebut dalam bentuk kartu-kartu yang berukuran 3 x 5 Cm. mewakili satu pola difraksi.

Model kartu data difraksi ASTM dapat dilihat pada gambar (2.7) Tanda (★) pada sudut kanan atas berarti bahwa data tersebut diakui dan dipercaya sedangkan tanda (0) berarti belum dipastikan (ref.7).

1

d	2					
I/I	3	8				
4	dA	I/I	hkl	dA	I/I	hkl
5						
6						
7				9		

Gambar (2.7) Model kartu data difraksi ASTM (ref.2).

Keterangan gambar :

1. Nomor seri kartu, dua digit pertama menyatakan tahun dimana bahan tersebut pertama kali diteliti, sedangkan digit berikutnya merupakan nomor urut bahan yang diteliti pada tahun itu.
2. Tiga harga yang memberikan harga intensitas terbesar dan harga d terbesar.
3. Intensitas yang dimiliki oleh harga d di atas.
4. Kondisi percobaan yang diberlakukan pada sampel.
5. Data kristalografi
6. Data fisika.
7. Analisa kimia, pemeriksaan sampel.
8. Rumus, nama, dan sebutan kimia.
9. Daftar nilai d , intensitas relatif dan indeks Miller

Selain penabelan dengan sistim kartu , ASTM juga melengkapi dengan buku indeks :

1. Indeks alfabetik, yang berdasarkan nama setiap bahan. Penyebutan nama diikuti dengan rumus kimianya, harga dan intensitas relatif terbesar serta nomor seri kartu
2. Indeks numerik, yang memberikan keterangan tentang 3 harga d dengan intensitas terkuat, rumus dan nama kimia serta nomor seri kartu .Setiap bahan akan tercantum tiga kali, yaitu pertama dengan 3 garis terkuat $d_1d_2d_3$, $d_2d_3d_1$ dan $d_3d_1d_2$.

Untuk harga d pertama penunjukan secara interval, dimana harga d tersebut tidak disebutkan secara urut. Baru untuk harga d kedua ditulis berurutan dari besar kekecil .

BAB III

M E T O D O L O G I

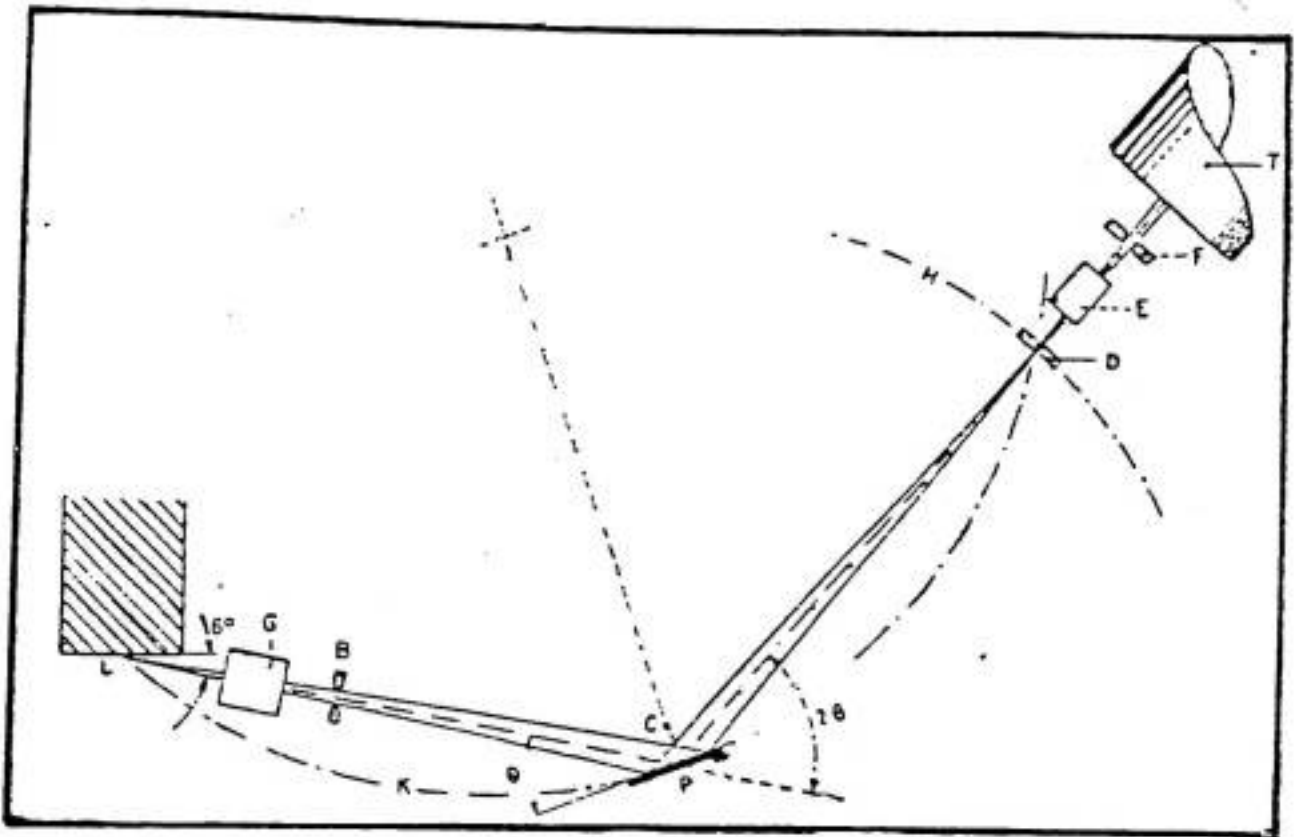
III.1 Difraksi Sinar-X

Dalam penelitian ini digunakan difraksi sinar-x jenis XD-5A buatan Shimadzu Jepang dengan menggunakan radiasi monokromatik $\text{CuK-}\alpha$ dengan panjang gelombang 1,54051 A di Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) Pusat Penelitian Teknik Nuklir (PPTN) Bandung.

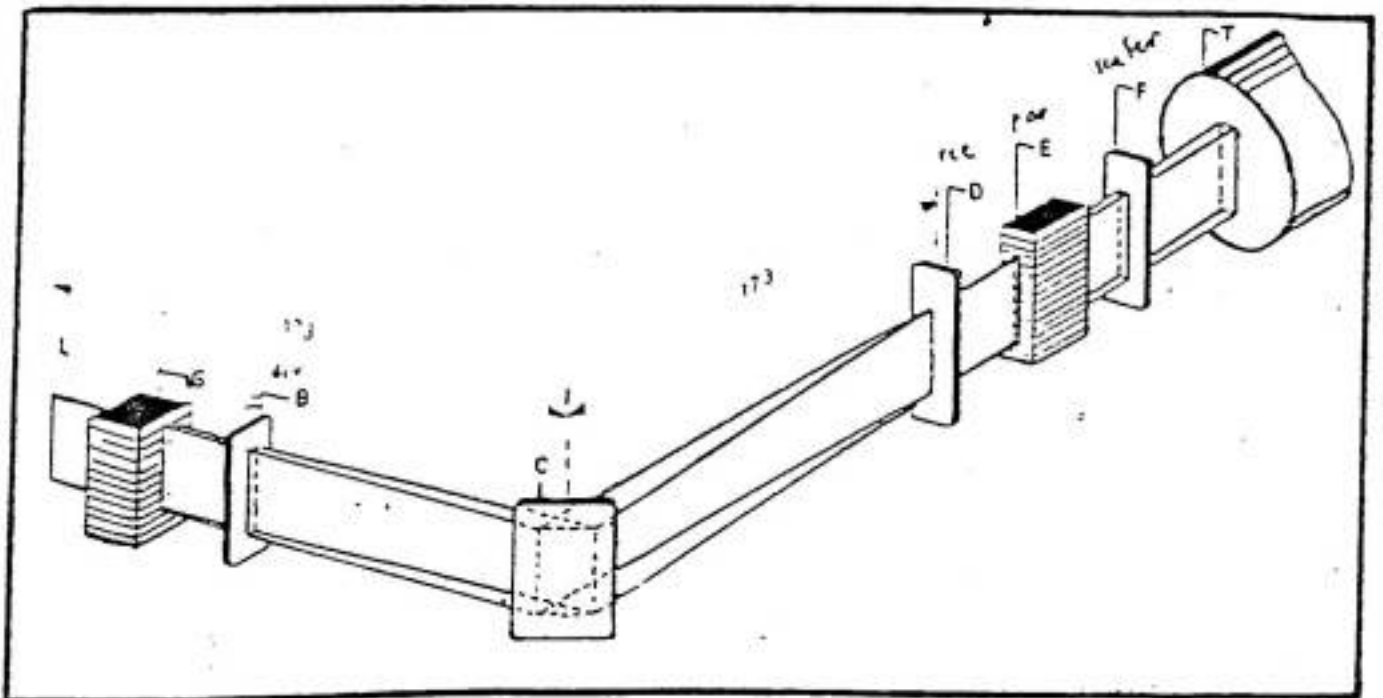
Sampel yang diambil dari laboratorium quality control industri semen yang terdiri dari raw meal, kiln feed, klinker, gipsum dan semen jenis I.

Sampel yang tersedia masing-masing dipadatkan dalam suatu wadah khusus , dimasukkan ke dalam pusat lingkaran C. Berkas sinar-x dari sumber L melalui celah paralel G dan celah pemancar B sebelum mengenai permukaan sampel C. Perhatikan gambar (3.1).

Berkas sinar-x difraksi akan diterima oleh celah parameter D .Dibelakang celah penerima diletakkan sistim celah parameter dan celah penghambur F. Kemudian berkas ini masuk ke detektor T .Perangkat celah penerima dan detektor bergerak sepanjang lingkaran H dengan sumbu di P , dan dikopling secara mekanis, sehingga perputaran detektor 2X derajat. Dan secara otomatis disertai dengan perputaran sampel X derajat.



Gambar (3.1) Bagan difraktometer sinar-x (ref.6)



Gambar (3.2) Susunan celah dalam difraktometer (ref.6)

Sistim celah paralel G dan E menjamin agar berkas sinar-x yang datang dan didifraksi cukup sempit. Sistim celah paralel ini dapat dilihat pada gambar (3.2).

Demikian sampel dimasukkan secara bergantian dengan interval 25° sampai 70° . Dan hasil difraksi yang diperoleh berupa grafik difraktometri dengan sudut 2θ sebagai sumbu datar dan intensitas sebagai sumbu tegak.

Dalam melakukan penelitian ini langkah-langkah yang harus dilalui sebagai berikut :

1. Buat pola difraksi (grafik difraktometri) dari bahan
2. Dari sudut θ yang dapat dibaca langsung dan panjang gelombang yang digunakan, hitung harga d masing-masing puncak pola difraksi
3. Buat tabel dari d dan I/I dari I/I yang terbesar.
4. Lihat pada kedua nilai-nilai d yang mendekati nilai d_2 , kemudian ambil urutan yang mempunyai nilai d ketiga mendekati nilai d_3 (mendekati $\pm 0.01 \text{ \AA}$ dari harga yang tertera).
5. Jika nilai d_1 , d_2 , d_3 sudah sesuai maka nomor kartu seri ASTM dapat dicari
6. Perhatikan nama, rumus kimianya serta data kristalografi yang tertera pada kartu tersebut.

III.4 Flouresensi Sinar-X

Dalam meneliti senyawa yang terkandung dan kadar senyawa dalam bahan dapat juga digunakan flouresensi sinar-x, seperti yang digunakan oleh Bagian Quality Control salah satu industri semen. Jenis alat ini adalah 7400S Quantometer yang dilengkapi dengan komputer.

Sampel yang akan diteliti, terlebih dahulu ditimbang seberat 15 gram dan dicampur dengan boraks seberat 45 gram. Sampel yang sudah dicampur ini dipanaskan dalam suatu ruang pemanas dengan temperatur mencapai 1200° C. Setelah mencair, bahan tersebut dituangkan kedalam suatu wadah khusus, kemudian didinginkan (dipadatkan).

Padatan tadi lalu dimasukkan ke dalam alat Quantometer tadi, dengan perintah lewat komputer, alat tersebut bekerja dan hasil pengukurannya dapat dilihat pada layar monitor komputer.

BAB IV

HASIL DAN BAHASAN

IV.1 Hasil Analisa Difraksi Sinar-X

Penentuan senyawa-senyawa dan struktur geometri kristal dari senyawa yang terkandung dalam raw meal, kiln feed, klinker, gipsum dan semen jenis I digunakan difraktometer sinar-x dengan panjang gelombang 1.54051\AA

Hasil pengukuran difraktometer berupa grafik difraktometri yaitu antara sudut difraksi 2θ dengan intensitas I . Di dalam grafik ditunjukkan pola difraksi berupa puncak-puncak tertentu untuk tiap sudut.

Pada grafik (4.1) untuk raw meal, grafik (4.2) untuk kiln feed, grafik (4.3) untuk klinker, grafik (4.4) untuk gipsum dan grafik (4.5) untuk semen jenis I

Perhitungan untuk memperoleh jarak antar bidang kristal (d_{hkl}) digunakan persamaan (2.14), dan penentuan indeks Miller dapat digunakan persamaan (2.6a) atau pada kartu ASTM di lampiran. Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel (4.1) untuk raw meal, tabel (4.2) untuk kiln feed, tabel (4.3) untuk klinker, tabel (4.4) untuk gipsum dan tabel (4.5) untuk semen jenis I.