



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II.1 Uraian Proses Secara Teoritis

##### II.1.1 Teknologi Pembuatan Semen

###### 1. Proses Basah (*Wet Process*)

Menurut Walter H Duda, 1983, pada proses ini bahan baku dihancurkan dalam *raw mill* kemudian digiling dengan ditambah air dalam jumlah tertentu. Hasilnya berupa *slurry* / buburan, kemudian dikeringkan dalam *rotary dryer* sehingga terbentuk umpan tanur berupa *slurry* dengan kadar air 25 - 40%. Pada umumnya menggunakan “*Long Rotary Kiln*” untuk menghasilkan terak. Terak tersebut kemudian didinginkan dan dicampur dengan *gypsum* untuk selanjutnya digiling dalam *finish mill* hingga terbentuk semen.

Keuntungan dan Kerugian Proses Basah antara lain :

Keuntungan :

- Pencampuran dari komposisi *slurry* lebih mudah karena berupaluluhan.
- Kadar  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{K}_2\text{O}$  tidak menimbulkan gangguan penyempitandalam saluran *preheater* atau pipa.
- Debu yang dihasilkan relatif sedikit.
- Deposit yang tidak homogen tidak berpengaruh karena mudahmencampur dan mengoreksinya.

Kerugian :

- Tanur putar yang digunakan ukurannya lebih panjang dibandingkan tanur putar pada proses kering.
- Pemakaian bahan bakar lebih banyak dibandingkan proses lain karena kebutuhan panas pembakaran tinggi 1.500 - 1.900 kcal untuk setiap kilogram teraknya.
- Memerlukan air proses untuk membentuk material menjadi seperti lumpur.



Kapasitas produksi lebih sedikit dibandingkan dengan proses lain apabila menggunakan peralatan dengan ukuran yang sama, maka akan didapatkan hasil yang relatif lebih sedikit akibat adanya pencampuran bahan dengan air pada awal proses, yaitu pada proses penggilingan.

## 2. Proses Semi Basah (*Semi Wet Process*)

Pada proses semi basah, bahan baku (batu kapur, pasir besi, pasir silika) dipecah, kemudian pada unit homogenisasi ditambahkan air dalam jumlah tertentu serta dicampur dengan luluhan tanah liat, sehingga terbentuk bubur halus dengan kadar air 15 - 25% (*slurry*) disini umpan tanur disaring terlebih dahulu dengan *filter press*. *Filter cake* yang berbentuk pellet kemudian mengalami kalsinasi dalam tungku putar panjang (*Long Rotary Kiln*). Dengan perpindahan panas awal terjadi pada rantai (*chain section*). Sehingga terbentuk Clinker sebagai hasil proses kalsinasi. (Walter H. Duda, 1983).

Keuntungan dan Kerugian Proses Semi Basah antara lain :

Keuntungan :

- a. Umpan mempunyai komposisi yang lebih homogen dibandingkan dengan proses kering.
- b. Debu yang dihasilkan sedikit. (I Ketut Arsha Putra, 1995)
- c. Tanur yang digunakan masih lebih panjang dari tanur putar pada proses kering.
- d. Membutuhkan *filter* yg berupa *filter* putar kontinyu untuk menyaring umpan yang berupa buburan sebelum dimasukkan ke *kiln*.
- e. Energi yang digunakan 1.000 - 1.200 kcal untuk setiap kg terak.

## 3. Proses Semi Kering (*Semi Dry Process*)

Proses semi kering dikenal sebagai grate proses, dimana merupakan transisi dari proses basah dan proses kering dalam pembuatan semen.

Umpan tanur pada proses ini berupa tepung baku kering, dengan alat granulator (*pelletizer*) umpan disemprot dengan air untuk dibentuk menjadi granular dengan kadar air 10 - 12% dan ukurannya 10 - 12 mm seragam. Kemudian *kiln feed* dikalsinasi dengan menggunakan tungku tegak (*shaft kiln*)



atau *long rotary kiln*. Sehingga terbentuk Clinker sebagai hasil akhir proses kalsinasi.

Keuntungan dan Kerugian Proses Semi Kering antara lain :

Keuntungan :

- a. Tanur yang digunakan lebih pendek dari proses basah.
- b. Pemakaian bahan bakar lebih sedikit.

Kerugian :

- a. Menghasilkan debu
- b. Campuran tepung baku kurang homogen karena pada saat penggilingan bahan dalam keadaan kering.

#### 4. Proses Kering (*Dry Process*)

Pada proses ini bahan baku dipecah dan digiling disertai pengeringan dengan jalan mengalirkan udara panas ke dalam *raw mill* sampai diperoleh tepung baku dengan kadar air 0,5 - 1%. Selanjutnya, tepung baku yang telah homogen ini diumpukan ke dalam *suspension preheater* sebagai pemanasan awal, disini terjadi perpindahan panas melalui kontak langsung antara gas panas dengan material dengan arah berlawanan (*Counter Current*). Adanya sistem *suspension preheater* akan menghilangkan kadar air dan mengurangi beban panas pada *kiln*.

Material yang telah keluar dari *suspension preheater* siap menjadi umpan *kiln* dan diproses untuk mendapatkan terak. Terak tersebut kemudian didinginkan secara mendadak agar terbentuk kristal yang bentuknya tidak beraturan (amorf) agar mudah digiling. Selanjutnya dilakukan penggilingan di dalam *finish mill* dan dicampur dengan *gypsum* dengan perbandingan 96 : 4 sehingga menjadi semen.

Keuntungan dan Kerugian Proses Kering antara lain:

Keuntungan :

- a. *Rotary kiln* yang digunakan relatif pendek.
- b. *Heat consumption* rendah yaitu sekitar 800 – 1000 kcal untuk setiap kilogram terak sehingga bahan bakar yang digunakan lebih sedikit.
- c. Kapasitas produksi besar dan biaya operasi rendah



Kerugian :

- a. Impuritas  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{K}_2\text{O}$  menyebabkan penyempitan pada saluran *preheater*.
- b. Campuran tepung kurang homogen karena bahan yang digunakan dicampur dalam keadaan kering.
- c. Adanya air yang terkandung dalam material sangat mengganggu operasi karena material lengket pada *inlet chute*.
- d. Banyak debu yang dihasilkan sehingga dibutuhkan alat penangkap debu.

Dari keempat teknologi pembuatan semen di atas pada PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban digunakan teknologi proses kering karena mempunyai keuntungan yaitu biaya operasi yang rendah dan kapasitas produksi yang besar sehingga sangat menguntungkan pabrik.

## II.2. Proses Umum Pembuatan Semen

Berdasarkan Diktat Teknologi Semen PT. Semen Indonesia (Persero), Tbk. tahun 1995, secara umum proses pembuatan semen dengan proses kering dibagi atas lima bagian yaitu :

### 1. Penyediaan Bahan Baku

Untuk pembuatan semen menggunakan bahan baku yang terdiri dari :

#### a. Calcareous group

Batuan yang mengandung kadar  $\text{CaCO}_3$  lebih dari 75% contohnya limestone dengan kadar  $\text{CaCO}_3$  96 – 98% yang tergolong “High grade limestone”, yang lebih sering dipakai untuk membuat semen.

#### b. Silicious group

Material yang mengandung mineral silica ( $\text{SiO}_2$ ) dan alumina besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) serta kandungan  $\text{CaCO}_3$  nya kurang dari 75%, contohnya clay atau tanah liat.



c. Argillaceous group

Material yang menyumbangkan komponen alumina.

d. Ferruginous group

Material yang menyumbangkan komponen besi.

Langkah - langkah penyediaan bahan baku, antara lain :

1) Pembersihan (*Cleaning*)

Hal ini dilakukan untuk membuka daerah penambangan yang baru. Tujuannya untuk membersihkan permukaan tanah dari kotoran yang mengganggu proses penambangan.

2) Pengupasan (*Stripping*)

Dilakukan dengan cara mengupas tanah yang berada di lapisan atas permukaan batuan dengan menggunakan bulldozer dan shovel.

3) Pengeboran (*Drilling*)

Pengeboran dilakukan untuk membuat lubang-lubang pada batuan kapur yang akan diberi bahan peledak. Jarak dan kedalaman lubang pengeboran disesuaikan dengan kondisi batuan dan lokasi. Umumnya kedalaman lubang 5 – 9 m, diameter lubang 3 inch dan jarak antar lubang 1,5 – 3 m.

Peralatan yang digunakan untuk pengeboran adalah :

1. Alat bor (*Crawl Air Drill*)
2. Alat penggerak bor (*Compressor*)

4) Peledakan (*Blasting*)

Untuk melepaskan batuan kapur yang diinginkan dari batuan induknya perlu dilakukan peledakan. Setelah dilakukannya pengeboran lubang-lubang tersebut akan diisi dengan bahan peledak.

Batuan kapur hasil dari peledakan memiliki ketentuan ukuran



maksimal 300 mm dan siap diangkut menuju *hopper limestone*.

Bahan-bahan peledak yang digunakan adalah :

1. Dynamit ammonium gelatin (*Damotin*), merupakan bahan peledak premier.
2. Campuran 96% Ammonium Nitrat dan 4% Fuel Oil (*ANFO*), merupakan bahan peledak sekunder

#### 1. *Detonator*

Peralatan-peralatan yang digunakan untuk peledakan adalah :

- a. Mesin peledak (*Blasting Machine*)
- b. Alat ukur daya ledak (*Blasting Ohmmeter*)
- c. Pengangkutan dan pengerukan

Batuan kapur yang sudah diledakkan kemudian dikeruk dan diangkut dengan menggunakan *shovel* atau *loader* menuju *hopper limestone* menggunakan *dump truck* yang mempunyai kapasitas 20-30 ton setiap trucknya, pengangkutan yang dilakukan 25-30 kali/ hari.

#### 2. Penyediaan Bahan Lain

Bahan tambahan selain bahan baku berupa *copper slag*, pasir silica dan *gypsum* tidak berasal dari tambang yang dimiliki PT Semen Indonesia Pabrik Tuban.

- a. *Copper Slag* diperoleh dari PT Smelting
- b. Pasir silica diperoleh dari daerah Cilacap, Bangkalan dan sekitar Tuban
- c. *Gypsum* diperoleh dari PT Petrokimia Jepara

#### 3. Pengolahan Bahan

Bahan-bahan yang sudah dikumpulkan seperti bahan baku dan bahan tambahan selanjutnya dengan komposisi tertentu diumpankan kedalam *raw mill*. Dalam *raw mill* bahan-bahan

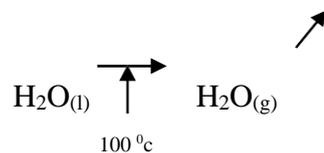


tersebut mengalami penggilingan dan pencampuran serta pengeringan, sehingga dapat diperoleh produk *raw mill* dengan kehalusan 90% lolos ayakan dengan ukuran 90 mikron dan kandungan air kurang dari 1%. Dari *raw mill* material selanjutnya dimasukkan ke dalam *blending silo*. Fungsinya adalah sebagai tempat penampungan sementara material sebelum diumpankan ke *kiln*, *blending silo* juga berguna sebagai alat homogenisasi produk *raw mill* agar komposisi kimia produk tersebut lebih merata sehingga siap diumpankan ke *kiln*.

#### 4. Pembakaran dan Pendinginan

Umpan yang berasal dari *raw mill* selanjutnya diumpankan ke *kiln*. Unit pembakaran inilah merupakan bagian terpenting karena terjadi pembentukan komponen utama semen. Unit ini terdapat *suspenser preheater*, *kiln* dan *great cooler*. Menurut I Ketut Arsha Putra, 1995, proses yang terjadi pada unit ini adalah

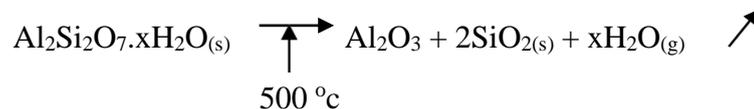
1. Proses pengurangan kadar air Terjadi pada suhu 100°C Reaksi :



2. Pelepasan air hidrat *clay* (tanah liat)

Air kristal akan menguap pada suhu 500°C. Pelepasan kristal initerjadi pada kristal hidrat dari tanah liat.

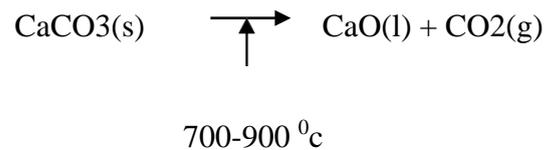
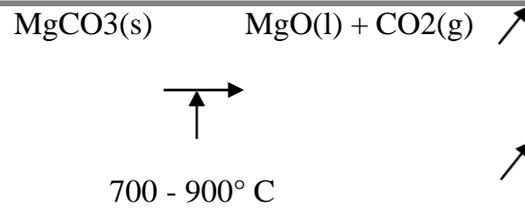
Reaksi :



3. Terjadi proses kalsinasi

Tahapan penguapan CO<sub>2</sub> dari *limestone* dan mulai *calsinasi* terjadipada suhu 700 - 900 °C.

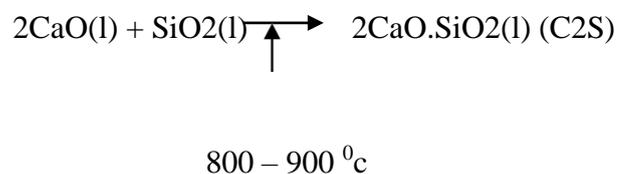
Reaksi :



#### 4. Reaksi pembentukan senyawa semen $\text{C}_2\text{S}$

Pada suhu  $800 - 900^\circ \text{C}$  terjadi pembentukan *calcium silikat*, sebenarnya sebelum suhu  $800^\circ \text{C}$  sebagian kecil sudah terjadi pembentukan garam *calcium silikat* terutama  $\text{C}_2\text{S}$ .

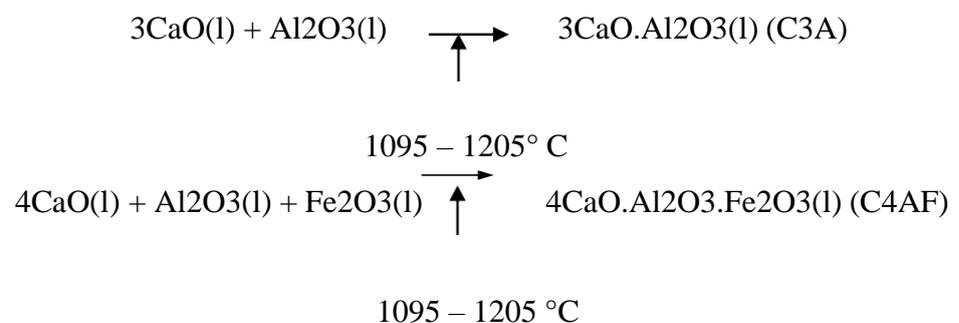
Reaksi :



#### 5. Reaksi pembentukan senyawa semen $\text{C}_3\text{A}$ dan $\text{C}_4\text{AF}$

Pada suhu  $1095 - 1205^\circ \text{C}$  terjadi pembentukan kalsium aluminat dan kalsium alumina ferrit.

Reaksi :

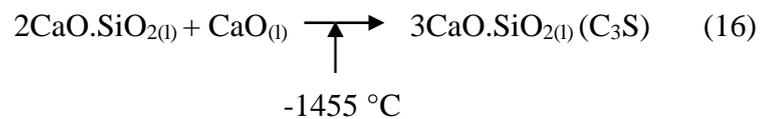




## 6. Reaksi pembentukan senyawa semen $C_3S$

Pada suhu 1260 - 1455 °C terjadi pembentukan *calcium silikat* terutama  $C_3S$  yang mana persentase  $C_2S$  mulai menurun karena membentuk  $C_3S$ .

Reaksi :



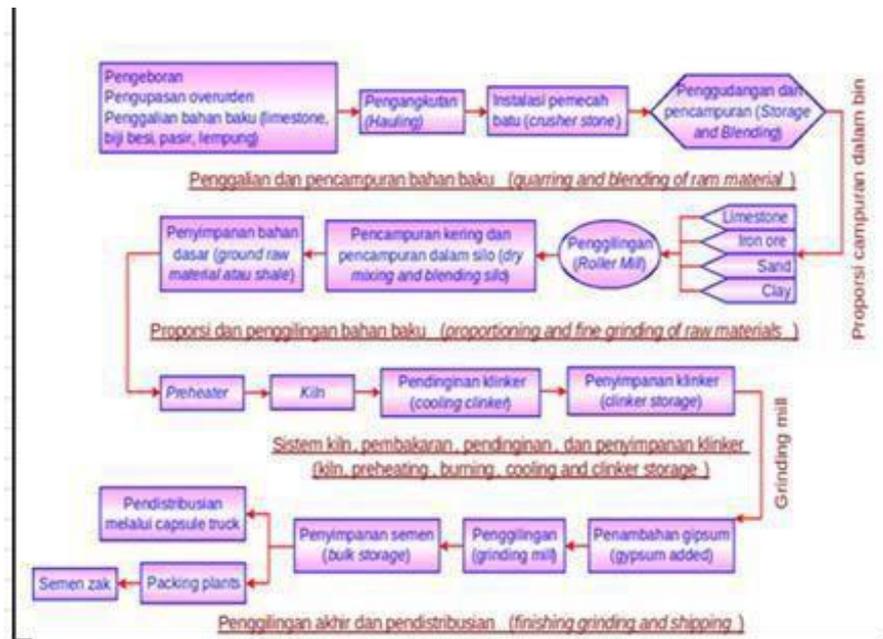
## 2. Penggilingan Semen

Clinker hasil *kiln* yang sudah didinginkan di dalam *cooler* selanjutnya dilakukan proses penggilingan di *finish mill*. Pada proses ini bahan-bahan tadi diberi tambahan *gypsum* dengan kadar 91% dengan perbandingan 96 : 4 berfungsi sebagai penghambat proses pengeringan pada semen. Penggilingan dilakukan dalam *Tube mill* yang di dalamnya terdapat bolabola (*grinding ball*) yang berfungsi sebagai penggiling bahan. Dalam proses ini semen mengalami pengecilan ukuran dari 100 mesh menjadi 325 mesh dan lolos ayakan 90%.

## 3. Pengisian dan Pengantongan Semen

Hasil produk dari *finish mill* kemudian diangkut oleh *air slide* menuju *cement silo*. Semen dilewatkan *vibrating screen* untuk dipisahkan semen dari kotoran pengganggu seperti logam, kertas, plastic atau bahan lainnya yang terikut. Selanjutnya semen dimasukkan ke dalam *bin*. Semen yang sudah jadi selanjutnya melalui tahap pengantongan. Semen curah akan langsung dibawa ke *bin* dan selanjutnya dimasukkan dalam truck dengan kapasitas 18-40 ton untuk didistribusikan kepada konsumen. Sedangkan untuk semen kantong dibawa menuju bagian *packer* untuk dilakukan pengisian dan pengantongan semen. Kapasitas harian atau jumlah kantong semen yang dihasilkan setiap harinya bervariasi sesuai dengan Rencana Kerja Anggaran Perusahaan (RKAP), kebijakan pemerintah, dan kemampuan dari pabrik, sehingga sifatnya tergantung pada permintaan pasar maupun konsumen. Terdapat 2 jenis ukuran

kemasan, yaitu kemasan 40 dan 50 kg sesuai standar SNI. Kantong dengan kapasitas 50 kg semen untuk semua type 1 (OPC) yang merupakan produksi utama pabrik Tuban dan 40 kg semen untuk jenis PPC yang hanya digunakan sesuai pesanan.



Gambar II. 1. Bagan Alir Proses Pabrikasi Semen Di PT. SemenIndonesia (Persero) Tbk. Pabrik Gresik

## II.2.1. Sifat – Sifat Semen

### A. Sifat Fisika Semen

Sifat fisika semen merupakan salah satu segi penting yang perlu diperhatikan, karena sifat fisik sangat mempengaruhi kualitas dan kemampuan semen. Sifat–sifat fisik tersebut antara lain:

#### 1) Kehalusan

Kehalusan sangat berpengaruh terhadap kecepatan hidrasi semen, semakin tinggi kehalusan kecepatan hidrasi semen akan semakin meningkat. Efek kehalusan dapat dilihat setelah 7 hari setelah reaksi semen dengan air. Alat pengukur kehalusan adalah ayakan dan alat *blaine*.



2) Pengembangan Volume

Sifat ini mengarah pada kemampuan pengerasan dan pengembangan volume semen setelah bereaksi dengan air. Kurangnya pengembangan volume semen disebabkan karena jumlah CaO bebas dan MgO yang terlalu tinggi. Alat pengembangan volume adalah *autoclave*.

3) Penyusutan (Shrinkage)

Penyusutan dibagi dalam tiga macam, yaitu hidration shrinkage, drying shrinkage dan carbonation shrinkage. Penyebab keretakan yang terbesar pada beton adalah drying shrinkage, yang disebabkan oleh penguapan air yang terkandung dalam pasta semen selama berlangsungnya proses setting dan hardening. Shrinkage dipengaruhi oleh komposisi semen, jumlah air pencampur, concentrate mix dan curing condition.

4) Konsistensi

Konsistensi semen adalah kemampuan semen mengalir setelah bercampur dengan air. Alat pengujinya adalah *vicat*.

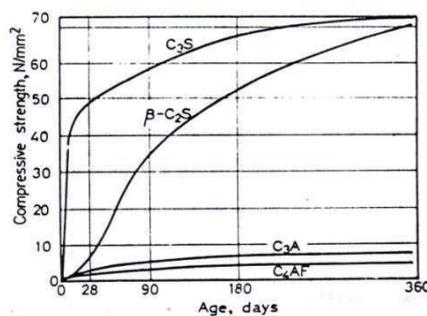
5) Pengikatan (setting) dan Pengerasan (hardening)

Pengikatan adalah timbulnya gejala kekakuan pada semen. Semen yang bereaksi dengan air pada awalnya membentuk lapisan yang bersifat plastis dan lama-kelamaan akan membentuk kristal. Waktu mulai terbentuknya kristal atau timbulnya kekakuan pada semen disebut *initial set*. Setelah melalui tahap ini rongga yang ada di dalam semen terisi oleh senyawa-senyawa hidrat dan membentuk titik-titik kontak yang menghasilkan kekakuan. Proses ini berlangsung hingga semua rongga terisi kristal dan akan semakin kaku akhirnya tercapai *final set*. Selanjutnya proses pengerasan secara tetap (*hardening*) mulai terjadi. Faktor-faktor yang mempengaruhi semen adalah temperatur, rasio semen dengan air, karakteristik semen, kandungan dan kereaktifan  $SO_3$ , jumlah dan reaktifitas  $C_3S$  serta kehalusan semen. Waktu yang dibutuhkan untuk mengeras ditunjukkan melalui analisa *setting time*. Analisa setting time dapat menunjukkan normal atau tidaknya reaksi

hidrasi semen. Alat pengujinya adalah alat *vicat* dan *gillmore*.

#### 6) Kekuatan kompresi

Kekuatan kompresi atau kuat tekan adalah sifat kemampuan semen menahan suatu beban tekan. Kekuatan kompresi semen sangat dipengaruhi oleh jenis komposisi semen dan kehalusan semen. Semakin halus ukuran partikel semen, maka kuat tekan yang dimilikinya akan semakin tinggi. Kadar  $C_3S$  di dalam semen memberikan kontribusi yang besar pada tekanan awal semen. Sedangkan  $C_2S$  memberikan kontribusi pada kekuatan tekan dalam umur yang panjang. Pengaruh komponen-komponen penyusun terak terhadap kuat tekan dapat dilihat pada gambar 11 berikut.



Gambar II. 2. Grafik Hubungan Antara Komponen-Komponen Penyusun Semen Dengan Kuat Tekan

#### 7) Densitas

Densitas semen tidak berpengaruh pada kualitas, tetapi sangat diperlukan dalam perhitungan.

#### 8) False set

*False set* atau pengikatan semu adalah pengikatan tidak wajar yang terjadi ketika air ditambahkan dalam semen. Setelah beberapa menit semen akan mengeras, tetapi jika diaduk sifat plastis semen akan timbul kembali. *False set* disebabkan karena hilangnya air kristal pada gypsum akibat tingginya temperatur saat penggilingan terak.

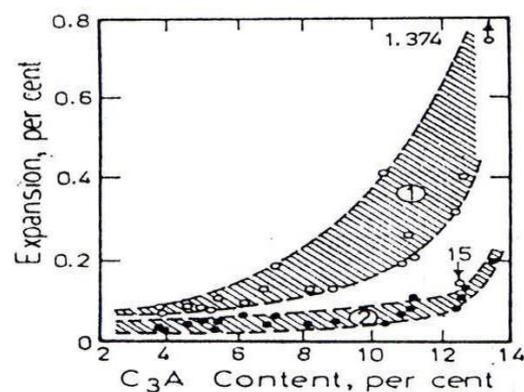
## 9) Soundness

*Soundness* adalah kemampuan pasta semen untuk mempertahankan volumenya setelah proses pengikatan. Berkurangnya *soundness* berarti timbulnya kecenderungan beton untuk berekspansi, ini disebabkan oleh tingginya kadar *free lime* (kapur bebas) dan magnesia.

Adapun reaksi-reaksi yang memungkinkan timbulnya sifat ekspansi pada beton adalah:

- 1) Reaksi antara  $C_3A$  dengan  $SO_3$  yang membentuk *ettringite* ( $C_6AS_3H_{32}$ )
- 2) Hidrasi free lime, yaitu reaksi  $CaO$  dengan  $H_2O$
- 3) Hidrasi free  $MgO$ , yaitu reaksi  $MgO$  dengan  $H_2O$

Ekspansi beton tersebut akan menimbulkan keretakan konstruksi beton yang berarti menurunkan kuat tekan beton. Pengaruh kadar  $C_3A$  terhadap ekspansi yang dihasilkan akibat reaksi  $C_3A$  dengan sulfat dapat dilihat pada gambar 12 berikut.



Gambar II. 3. Grafik Hubungan Reaksi  $C_3A$  dengan Sulfat terhadap Efek Ekspansi

Dapat dilihat pada grafik di atas bahwa daerah kurva 1 menunjukkan pengaruh dari reaksi  $C_3A$  dengan sulfat terhadap efek ekspansi setelah satu tahun dan kurva 2 setelah satu bulan.



#### 10) Konsistensi

Konsistensi semen adalah kemampuan semen mengalir setelah bercampur dengan air. Alat pengujinya adalah *vicat*.

#### 11) Pengikatan (*setting*) dan Pengerasan (*hardening*)

Pengikatan adalah timbulnya gejala kekakuan pada semen. Semen yang bereaksi dengan air pada awalnya membentuk lapisan yang bersifat plastis dan lama-kelamaan akan membentuk kristal. Waktu mulai terbentuknya kristal atau timbulnya kekakuan pada semen disebut *initial set*. Setelah melalui tahap ini rongga yang ada di dalam semen terisi oleh senyawa-senyawa hidrat dan membentuk titik-titik kontak yang menghasilkan kekakuan. Proses ini berlangsung hingga semua rongga terisi kristal dan akan semakin kaku akhirnya tercapai *final set*. Selanjutnya proses pengerasan secara tetap (*hardening*) mulai terjadi. Faktor-faktor yang mempengaruhi semen adalah temperatur, rasio semen dengan air, karakteristik semen, kandungan dan kereaktifan  $SO_3$ , jumlah dan reaktifitas  $C_3S$  serta kehalusan semen. Waktu yang dibutuhkan untuk mengeras ditunjukkan melalui analisa *setting time*. Analisa *setting time* dapat menunjukkan normal atau tidaknya reaksi hidrasi semen. Alat pengujinya adalah alat *vicat* dan *gillmore*.

### B. Sifat Kimia Semen

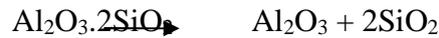
Pembahasan sifat kimia semen di sini meliputi pembahasan komposisi zat yang ada di dalam semen, reaksi-reaksi yang terjadi dan perubahan yang terjadi saat penambahan air pada semen. Hal ini perlu dilakukan karena komposisi dan sifat komponen tersebut sangat mempengaruhi sifat semen secara keseluruhan.

#### 1) Reaksi kimia dan perubahan yang terjadi setiap kenaikan temperatur.

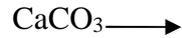
Pada 100 °C : Terjadi penguapan air bebas

Pada 100°C – 500°C : Pelepasan air kristal (blinded water)

Pada 500 °C : Perubahan struktur mineral silika.



Pada 500°C – 900°C : Terjadi kalsinasi atau peruraian dari  $\text{MgCO}_3$  dan

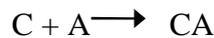


Pada 800 °C : Terjadi reaksi kalsinasi  
 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$   
 $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO}$

+  $\text{CO}_2$



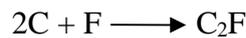
Pembentukan CA



Pembentukan  $\text{C}_2\text{S}$



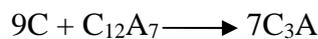
Pembentukan  $\text{C}_2\text{F}$



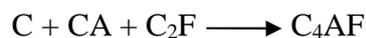
Pada 800°C – 900°C : Awal pembentukan  $\text{C}_{12}\text{A}_7$



Pada 1090°C – 1200°C :  $\text{C}_3\text{A}$  terbentuk dan  $\text{C}_2\text{S}$  pada keadaan maksimal



$\text{C}_4\text{AF}$  terbentuk



Pada 1200°C : Pembentukan fasa cair material menjadikental dan homogen.

Pada 1200°C – 1450°C :  $\text{C}_3\text{S}$  terbentuk dan  $\text{C}_2\text{S}$  berkurang



Pada >1450°C : Dekomposisi  $\text{C}_3\text{S}$  menjadi  $\text{C}_2\text{S}$  dan CaO berjalan Lambat

Kandungan  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  dan  $\text{C}_4\text{AF}$  dalam semen dapat diperkirakan lewat perhitungan rumus Boque yaitu:

$$\text{C}_3\text{S} = 4,071 \text{ CaO} - 7,6\text{SiO}_2 - 6,718 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,43 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{C}_2\text{S} = 8,062 \text{ SiO}_2 + 5,068 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,078 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 3,071 \text{ CaO}$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,692 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3,043 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$



## 2) Hidrasi semen

Jika semen dicampur dengan air maka akan terjadi reaksi dengan komponen-komponen yang ada dalam semen dengan air yang reaksinya disebut reaksi hidrasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi hidrasi adalah kehalusan semen, jumlah air, temperatur dan komposisi kimia. Hasil dari reaksi-reaksi ini adalah senyawa hidrat.

Di dalam semen, gypsum berfungsi untuk memperlambat setting. Gypsum terutama bereaksi dengan  $C_3A$  membentuk ettringite yang akan melapisi  $C_3A$  dan menahan reaksi  $C_3A$ , lapisan ini akan pecah dan akan digantikan dengan lapisan yang baru sampai seluruh gypsum habis bereaksi. Bila kadar gypsum dalam semen terlalu tinggi maka jumlah lapisan yang melindungi  $C_3A$  akan semakin banyak dan waktu pengerasan semakin lama.

Walau gypsum dapat memperlambat pengerasan semen namun kandungan gypsum dibatasi (berdasarkan jumlah  $SO_3$ ). Karena bila kelebihan  $SO_3$  di dalam semen akan menyebabkan ekspansi sulfat yang menimbulkan keretakan pada beton. Kandungan maksimum  $SO_3$  dalam semen 1,6 – 3%.

## 3) Durability

Durability adalah ketahanan semen terhadap senyawa-senyawa kimia, terutama terhadap senyawa sulfat. Senyawa sulfat biasanya terdapat di dalam air laut dan air tanah. Senyawa ini menyerang beton dan menyebabkan ekspansi volume dan keretakan pada beton.

Mineral  $C_3A$  adalah komponen semen yang paling reaktif terhadap senyawa sulfat yang ada dalam air dan membentuk *High Calcium Sulfaluminate Hydrat* ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ ). Oleh karena itu semen untuk pelabuhan harus mempunyai kadar  $C_3A$  yang rendah.

## 4) Kandungan alkali dalam semen

Kandungan alkali ( $Na_2O$  dan  $K_2O$ ) dalam semen cukup menguntungkan yaitu mengatur pelepasan alkali pada proses hidrasi dan dalam bentuk senyawa alkali sulfat dapat meningkatkan kekuatan awal semen (10% dalam waktu 28 hari) Tetapi kandungan alkali dalam semen dibatasi <



0,6 % (dalam bentuk  $\text{Na}_2\text{O}$ ) karena kandungan alkali yang besar dapat menimbulkan fenomena ekspansi alkali. Alkali bereaksi dengan agregat yang terdapat dalam campuran beton.

5) Panas Hidrasi

Panas hidrasi adalah panas yang ditimbulkan saat semen bereaksi dengan air. Besarnya panas hidrasi tergantung dari komposisi semen dan kehalusan dari semen serta temperatur proses. Alat pengujinya adalah Bomb kalorimeter.

Tabel II. 1. Panas Hidrasi yang Dihasilkan

Komponen	Senyawa Hidrat yang Terbentuk	Panas Hidrasi (kj/kg)
$\text{C}_3\text{S} (+\text{H})$	$\text{C-S-H} + \text{CH}$	520
$\text{B} - \text{C}_2\text{S} (+\text{H})$	$\text{C-S-H} + \text{CH}$	260
$\text{C}_3\text{A} (+\text{CH}+\text{H})$	$\text{C}_4\text{AH}_19$	1160
$\text{C}_3\text{A} (+\text{H})$	$\text{C}_3\text{AH}_6$	910
$\text{C}_3\text{A} (+\text{CSH}_2+\text{H})$	$\text{C}_4\text{ASH}_{12}$	1140
$\text{C}_3\text{A} (+\text{CSH}_2+\text{H})$	$\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$	1670
$\text{C}_3\text{AF} (+\text{CH}+\text{H})$	$\text{C}_3(\text{A}_2\text{F})\text{H}_6$	420

Sumber : Lea's Chemistry of Cement and Concrete, edisi ke -4 Arnold,1998

6) Kelembaban Semen

Kelembaban semen akan berakibat :

1. Menurunkan *specific gravity*
2. Terjadi *false set*
3. Terbentuknya gumpalan – gumpalan
4. Menurunnya kualitas semen
5. Bertambahnya *loss on ignition*



6. Bertambahnya *setting time* dan *hardening*

7. Penurunan tekanan

Oleh sebab itu, strategi penyimpanan semen harus diperhatikan agar semen dapat menjadi awet dan mutu dari semen akan terjaga.

7) *Free lime* (Kapur bebas)

Sifat kimia lain semen adalah kandungan *free lime* yang dimilikinya. *Free lime* adalah kapur (CaO) yang tidak bereaksi selama pembentukan terak. Kadar CaO di dalam semen dibatasi max 1 %. Kadar *free lime* yang tinggi membuat beton memiliki kuat tekan yang rendah (akibat ekspansi kapur bebas) membentuk gel yang akan mengembang (*swelling*) dalam keadaan basah sehingga dapat menimbulkan keretakan pada beton.

8) LOI (Lost On Ignition)

LOI adalah hilangnya beberapa mineral akibat pemijaran. Senyawa yang hilang akibat pemijaran adalah air dan CaO. Kristal-kristal tersebut mudah terurai mengalami perubahan bentuk untuk jangka waktu yang panjang, sehingga dapat menimbulkan kerusakan beton setelah beberapa tahun. Oleh karena itu kadar LOI perlu diketahui agar penguraian mineral dalam jumlah yang besar dapat dicegah.

## II.2.2. Bahan Baku Semen

- **Bahan Baku**

a. *Batu Kapur* (CaCO<sub>3</sub>/ Calcium Carbonat)

Dalam keadaan murni, batu kapur berupa bahan CaCO<sub>3</sub> yang mengandung calsite dan aragonite. Batu kapur tersusun atas kristal halus dan kasar yang kekerasannya dipengaruhi oleh umur geologinya. Semakin tua umur batu kapur biasanya semakin keras. Batu kapur pada umumnya tercampur MgCO<sub>3</sub> dan MgSO<sub>4</sub>. Batu kapur yang baik dalam penggunaan pembuatan semen memiliki kadar air ± 5% dan penggunaan batu kapur dalam pembuatan semen itu sendiri sebanyak ± 81%.



Tabel II. 2. Spesifikasi Batu Kapur Secara Umum

Parameter	High Grade	Medium Grade	Low Grade
Kenampakan	Putih	Lebih Kusam	Kusam
CaCO <sub>3</sub>	97 - 99%	88 - 90%	85 - 87%
MgCO <sub>3</sub>	Maksimal 2%	Maksimal 2%	Maksimal 2%
SiO <sub>2</sub>	0,08 - 2%	0,08 - 2%	0,08 - 2%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01 - 0,4%	0,01 - 0,4%	0,01 - 0,4%
P Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09 - 1%	0,09 - 1%	0,09 - 1%
TH 2O, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	Sisa	Sisa	Sisa

Semen Indonesia (Persero), Tbk. menggunakan batu kapur dengan kualitas *High Grade Limestone* dan *Medium Grade Limestone*.

Tabel II. 3. Komposisi Batu Kapur pada Pembuatan Semen Portland

CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Alkali (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Cl (%)	H <sub>2</sub> O (%)
40 - 55	1 - 15	1 - 6	0,2 - 5	0,2 - 4	0,2 - 4	1 - 3	0,2 - 1	7 - 10

Menurut Puja Hadi Purnomo, 1994, sifat fisika batu kapur sebagai berikut:

- Fase : Padat
- Warna : Putih
- Kadar air : 7 - 10 % H<sub>2</sub>O
- Bulk density* : 1,3 ton/m<sup>3</sup>
- Spesific gravity* : 2,49
- Titik Leleh : 825 °C
- Kandungan CaO : 47 - 56%
- Kuat tekan : 31,6 N/mm<sup>2</sup>
- Silika *ratio* : 2,6
- Alumina *ratio* : 2,57

Menurut R.H. Perry, 1984, salah satu sifat kimia batu kapur yaitu dapat mengalami kalsinasi.

Reaksi :



$$T = 600-800^\circ\text{C}$$

b. Tanah Liat ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ )

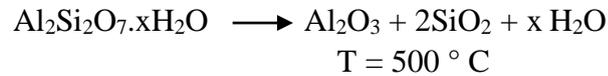
Semua jenis tanah liat adalah hasil pelapukan kimia yang disebabkan adanya pengaruh air dan gas  $\text{CO}_2$ , batuan andesit, granit, dan sebagainya. Batuan-batuan ini menjadi bagian yang halus dan tidak larut dalam air tetapi mengendap berlapis-lapis. Senyawa kimia yang membentuk tanah liat antara lain alkali silikat dan beberapa jenis mika. Pada dasarnya warna dari tanah liat adalah putih, tetapi dengan adanya senyawa-senyawa kimia lain seperti  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{S}_3$ , dan  $\text{CaCO}_3$  menjadi berwarna abu-abu sampai kuning. Tanah liat yang baik untuk digunakan memiliki kadar air  $\pm 20\%$ , kadar  $\text{SiO}_2$  tidak terlalu tinggi  $\pm 46\%$ , dan penggunaan tanah liat dalam pembuatan semen itu sendiri sebesar  $\pm 9\%$ .

sifat fisika tanah liat sebagai berikut :

- a. Fase : Padat
- b. Warna : Coklat kekuningan
- c. Kadar air : 18 - 25%  $\text{H}_2\text{O}$
- d. *Bulk density* : 1,7 ton/ $\text{m}^3$
- e. Titik Leleh : 1999 - 2032 $^\circ\text{C}$
- f. *Spesific gravity* : 2,36 gr/ $\text{cm}^3$
- g. Silika ratio : 2,9
- h. Alumina ratio : 2,7

Menurut R.H. Perry, 1984, salah satu sifat kimia tanah liat yaitu dapat mengalami pelepasan air hidrat bila dipanaskan pada suhu 500 $^\circ\text{C}$ . Sifat dari

tanah liat jika dipanaskan atau dibakar akan berkurang sifat keliatannya dan menjadi keras bila ditambah air. Reaksinya :



Tabel II. 4. Komposisi Tanah Liat pada Pembuatan Semen Portland

<b>CaO</b> (%)	<b>SiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>MgO</b> (%)	<b>Alkali</b> (%)	<b>SO<sub>3</sub></b> (%)	<b>H<sub>2</sub>O</b> (%)
1– 10	40 – 70	15– 30	3 – 10	1 - 5	1– 4	< 2	1– 25

- Bahan Koreksi
  - a. Pasir Silika (*SiO<sub>2</sub>*)

Pada umumnya pasir silika terdapat bersama oksida logam lainnya, semakin murni kadar  $\text{SiO}_2$  semakin putih warna pasir silikanya, semakin berkurang kadar  $\text{SiO}_2$ , semakin berwarna merah atau coklat, disamping itu semakin mudah menggumpal karena kadar airnya yang tinggi. Pasir silika yang baik untuk pembuatan semen adalah dengan kadar  $\text{SiO}_2 \pm 90\%$ , dan penggunaan pasir silika dalam pembuatan semen itu sendiri sebesar  $\pm 9\%$ .

Tabel II. 5. Komposisi Pasir Silika Pada Pembuatan Semen Portland

<b>CaO</b> (%)	<b>SiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>MgO</b> (%)	<b>Alkali</b> (%)	<b>LOI</b> (%)
1 – 3	85 - 95	2 – 5	1 – 3	1 - 3	1 - 2	2 – 5

Sifat fisika pasir silika sebagai berikut:

- a. Fase :padat
- b. Warna :Coklat Kemerahan
- c. Kadar air :6%  $\text{H}_2\text{O}$
- d. Bulk Density :1,45  $\text{ton/m}^3$
- e. *Spesific gravity* : 2,37  $\text{gr/cm}^3$
- f. *Silika ratio* : 5,29
- g. *Alumina ratio* : 2,37

Menurut R.H. Perry, 1984, salah satu sifat kimia pasir silika yaitudapat bereaksi dengan CaO membentuk garam kalsium silikat.

Reaksi :



Pasir silika banyak terdapat didaerah pantai. Derajat kemurnian pasir silika dapat mencapai 95 - 99,8 % SiO<sub>2</sub>. Warna pasir silika dipengaruhi oleh adanya kotoran seperti oksida logam dan bahan organik.

b. Cooper Slag

*Copper slag* ini sebagai pengganti pasir besi. Pasir besi (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) berfungsi sebagai penghantar panas dalam proses pembuatan terak semen. Penggunaan pasir besi dalam pembuatan semen itu sendiri sebesar ± 1%. *Copper slag* digunakan karena mempunyai kandungan besi yang tinggi, sehingga menyebabkan material ini mempunyai densitas lebih tinggi dibandingkan pasir alam. Material ini mempunyai sifat fisik yang sangat keras dan porositas optimum.

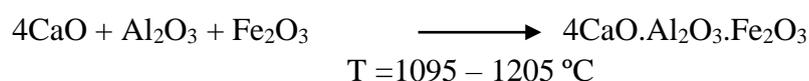
Tabel II. 6.Komposisi Cooper Slag Pada Pembuatan Semen Portland

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	LOI (%)
5 – 10	2 – 5	85 - 95	0 - 5

Sifat fisiknya, antara lain :

- a. Fase : Padat
- b. Warna : Hitam
- c. *Bulk density* : 1,8 ton/m<sup>3</sup>

Menurut R.H. Perry, 1984, salah satu sifat kimia *copper slag* yaitudapat bereaksi dengan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan CaO membentuk *calcium alumina ferrit*. Reaksi :





- Bahan Pembantu
  - a. Gypsum ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )

*Gypsum* adalah bahan sedimen  $CaSO_4$  yang mengandung 2 molekul hidrat yang berfungsi sebagai penghambat proses pengeringan pada semen. *Gypsum* dapat diambil dari alam ataupun secara sintetis. *Gypsum* terdapat di danau atau gunung, warna kristalnya adalah putih. Penambahan *gypsum* dengan kadar 91% dilakukan pada penggilingan akhir dengan perbandingan 96:4.

sifat fisika *gypsum* sebagai berikut:

- a. Fase : Padat
- b. Warna : Putih
- c. Kadar air : 10%  $H_2O$
- d. *Bulk density* : 1,7 ton/ $m^3$
- e. Ukuran material : 0 - 30 mm

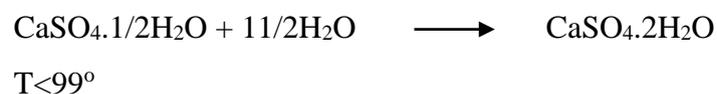
sifat kimia *gypsum* yaitu dapat mengalami pelepasan air hidrat bila dipanaskan sedikit.

Reaksi :



Jika pemanasan dilakukan pada suhu yang lebih tinggi, *gypsum* akan kehilangan semua airnya dan menjadi kalsium sulfat anhidrat. *Gypsum* juga dapat mengalami hidrasi dengan air menjadi hidrat kristal padat.

Reaksi :





b. Trass ( $2CaO.SiO_2$ )

Trass adalah bahan hasil letusan gunung berapi yang berbutir halus dan banyak mengandung oksida silika amorf ( $SiO_2$ ) yang telah mengalami pelapukan hingga derajat tertentu. *Trass* digunakan sebagai bahancampuran semen PPC sebagai *pozzolan activity*. Penambahan *trass* bertujuan agar kadar frelime dapat direduksi sehingga kualitas semen menjadi lebih baik dan memberikan kuat tekan awal yang kurang tetapi kuat tekan akhir yang stabil. Penambahan *trass* dilakukan di dalam finish mill dengan gypsum dan terak. Sifat Fisika :

- a. Fasa : Padat
- b. Warna : Putih keabu-abuan
- c. Bentuk : Butiran
- d. Ukuran Material : 0 – 30 mm
- e. Specific Gravity : 2,68 gr/cm<sup>3</sup>

Sifat Kimia :

Trass dimana kandungan utamanya silika aktif  $SiO_2$  maka pada saat ditambahkan air akan bereaksi dengan  $CaOH_2$  membentuk CSH dimana senyawa ini memberikan kontribusi terhadap kuat tekan.  $CaOH_2$  ini didapat dari reaksi  $CaO$  free dalam terak dengan  $H_2O$ .

Reaksi :



c. Batu Kapur dan Dolomit

Digunakan untuk menambah kuat tekan. Batu kapur dan dolomit merupakan bahan pencampur pada pembuatan semen OPC maupun PPC yang didapatkan dari tambang Semen Indonesia.



d. Fly Ash

Digunakan sebagai filler. Fly Ash merupakan bahan pencampur pada pembuatan semen PPC yang didapatkan dari PLTU Paiton, Jepara, dan Tuban.

e. Dust

Digunakan sebagai filler. Dust merupakan bahan pencampur pada pembuatan semen OPC yang didapatkan dari Semen Indonesia (Raw Mill).

f. GBFS (Granular Blast Furnace Slag)

Digunakan untuk substitusi terak atau clinker. GBFS merupakan bahan pencampur pada pembuatan semen OPC yang didapatkan dari Krakatau.

### II.2.3.Fungsi Semen

Fungsi semen adalah mengikat butir-butir agregat hingga membentuk suatu massa padat dan mengisi rongga-rongga udara di antara butir - butir agregat. Walaupun komposisi semen dalam beton hanya sekitar 10%, namun karena fungsinya sebagai bahan pengikat maka peranan semen menjadi penting. Semen yang digunakan untuk pekerjaan beton harus disesuaikan dengan rencana kekuatan dan spesifikasi teknik yang diberikan.

### II.2.4.Macam – Macam Semen

Perbedaan macam semen tergantung pada komposisi unsur-unsur penyusunnya dan unsur tambahan lain yang ditamapkannya.

Berbagai jenis semen, antara lain :

1. *Semen Portland*

Merupakan semen hidrolis yang diperoleh dengan menggiling terak yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis, bersama bahan tambahan biasanya digunakan gypsum.

Berdasarkan banyaknya presentase kadar masing-masing komponen ASTM (*American Society of Testing Material*) C 150 – 95 membagi lima macam type semen portland. Kelima tipe semen portland tersebut yaitu :

2. *Ordinary Portland Cement* (Semen Tipe 1)



Menurut G.T. Austin (1985), yaitu semen Portland yang umum digunakan untuk bangunan biasa. Semen ini ada beberapa jenis pula, misalnya semen putih yang kandungan feri oksidanya lebih kecil, semen sumur minyak, semen cepat keras, dan beberapa jenis lain untuk penggunaan khusus.

3. *Moderate Heat Cement* (Semen Tipe 2)

Menurut G.T. Austin (1985), semen ini digunakan dalam situasi yang memerlukan kalor hidrasi yang tidak terlalu tinggi atau untuk bangunan beton biasa yang dapat terkena aksi sulfat. Kalor yang dilepas saat semen ini mengeras tidak boleh lebih dari 295 joule/gram sesudah 7 hari dan 335 joule/gram sesudah 28 hari.

4. *High Early Strength Cement* (Semen Tipe 3)

Menurut G.T. Austin (1985), yaitu semen dengan kekuatan awal tinggi yang terbentuk dari bahan baku yang mengandung perbandingan gamping-silika lebih tinggi dari yang digunakan untuk semen type I, dan penggilingannya pun lebih halus dari type I. Semen ini mengandung trikalsium silikat lebih banyak dari semen portland biasa. Hal ini disamping kehalusannya menyebabkan semen ini lebih cepat mengeras dan lebih cepat mengeluarkan kalor.

5. *Low Heat Cement* (Semen Tipe 4)

Menurut G.T. Austin (1985), yaitu semen portland kalor-rendah, persen kandungan C<sub>3</sub>S dan C<sub>3</sub>A lebih rendah. Akibatnya persen tetra kalsium aluminoforit (C<sub>4</sub>AF) lebih tinggi karena adanya Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang ditambahkan untuk mengurangi C<sub>3</sub>A. Kalor yang dilepas pun tidak boleh lebih dari 250 dan 295 joule/gram masing-masing sesudah 7 dan 28 hari, dan kalor hidrasinya adalah 15 - 35 % dari kalor hidrasi semen biasa/HES.

6. *Sulfat Resistance Cement* (Semen Tipe 5)

Menurut G.T. Austin (1985), semen portland tahan sulfat adalah semen yang karena komposisinya atau cara pengolahannya, lebih tahan terhadap sulfat daripada keempat jenis lainnya. Semen type V ini digunakan bila penerapannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat. Semen ini mengandung C<sub>3</sub>A lebih rendah dari ketiga semen lain.



Akibatnya kandungan C4AF-nya lebih tinggi.

#### 7. *Semen Putih*

Menurut I Ketut Arsha Putra (1995), semen putih dibuat untuk tujuan dekoratif bukan untuk tujuan konstruktif, misalnya untuk bangunan arsitektur. Pembuatan semen ini membutuhkan persyaratan bahan baku dan proses pembuatan yang khusus, misalnya bahan mentah mengandung oksida besi dan oksida mangan yang sangat rendah yaitu dibawah 1%.

#### 8. *Semen Alumina Tinggi*

Menurut E. Jasjfi (1985), semen ini pada dasarnya adalah Semen Kalsium Aluminat yang dibuat dengan melebur campuran batu kapur dan bauksit. Bauksit ini biasanya mengandung oksida besi, silika dan magnesium. Semen ini mengeras sangat cepat dan banyak digunakan pada daerah pelabuhan, namun semen ini tidak tahan terhadap sulfat.

#### 9. *Semen Anti Bakteri*

Menurut G.T. Austin (1985), semen ini adalah campuran yang homogen antara semen portland dengan anti bacteriac agent seperti germicide. Bahan tersebut ditambahkan untuk self desinfectant beton terhadap serangan bakteri dan jamur yang tumbuh. Biasa digunakan pada pembuatan kolam, kamar mandi. Semen ini mempunyai sifat hampir sama dengan semen portland type I.

#### 10. *Semen Pozzoland*

Menurut G.T. Austin (1985), semen ini diperoleh dengan menggiling terak. Semen portland dengan trass sebagai bahan pozzolannya. Jenis semen ini diproduksi untuk pengecoran beton massa, irigasi, bangunan di tepi laut dan tanah rawa yang memerlukan katahanan sulfat dan panas hidrasi rendah.

#### 11. *Water Proofed Cement*

Menurut G.T. Austin (1985), semen ini adalah campuran yang homogen antara Semen Porland dengan Water Proofing agent dalam jumlah kecil seperti kalsium, aluminium atau logam stearat lainnya. Semen ini dipakai untuk kontruksi beton yang berfungsi sebagai penahan tekanan hidrolis, misalnya



tangki penyimpan cairan kimia.

## 12. *Oil Well cement*

Menurut G.T. Austin (1985), semen ini adalah *Semen Portland* yang dicampur dengan bahan retarder seperti *asam borat, casein, lignin, gula atau organic hidroxid acid*. Fungsi retarder untuk mengurangi kecepatan pengerasan semen, sehingga adukan dapat dipompakan dalam sumur minyak atau gas. Umumnya semen ini digunakan pada *primary cementing*.

### II.2.5. Komposisi Semen

#### 1. *Tricalcium silicate (C3S)*

C3S terbentuk pada suhu di atas 1200°C, kristalnya berbentuk *monoclinic* dan disebut *alite*.

C3S mempunyai sifat :

- a. Mempercepat pengerasan semen.
- b. Mempengaruhi pengikatan kekuatan awal dan kekuatan akhir yang tinggi.
- c. Memberikan kekuatan penyokong untuk waktu yang lama, terutama memberikan kekuatan awal sebelum 28 hari.
- d. Reaksi hidrasi C3S



C3S apabila ditambahkan air akan menjadi kaku dan dalam beberapa jam saja pasta akan mengeras dan menimbulkan panas hidrasi 500 joule/gram. Kandungan C3S pada semen Portland bervariasi antara 35%-55% tergantung jenis semen Portlandnya.

#### a. *Dicalcium silicate (C2S)*

C2S terbentuk pada suhu 800°C dan kristalnya disebut *betite*.

Bentuk yang umum dijumpai dalam semen portland adalah -C2S.



C2S mempunyai sifat:

- a. Proses hidrasinya berlangsung lambat.
- b. Menambah kekuatan setelah 28 hari.
- c. Reaksi hidrasinya adalah :



Pada penambahan air segera terjadi reaksi, menyebabkan pasta mengeras dan menimbulkan sedikit panas yaitu 250 J/gram. Pasta yang mengeras, perkembangan kekuatannya stabil dan lambat pada beberapa minggu, kemudian mencapai kekuatan tekan akhir hampir sama dengan C3S. Kandungan C2S pada semen Portland bervariasi antara 15% - 35% dan rata-rata 25%.

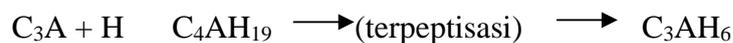
### 3. *Tricalcium aluminat*

C<sub>3</sub>A terbentuk pada suhu 1090°C – 1200°C dan bentuk kristalnya adalah cubic. Jika C<sub>3</sub>A mengandung ion asing seperti Na<sup>+</sup>, kristalnya berbentuk *orthorombic* atau *monoclinic*. C<sub>3</sub>A mempunyai sifat memberikan kekuatan penyokong pada beton dalam periode 1-3 hari pertama.

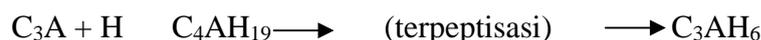
Reaksi hidrasi tergantung pada keberadaan gypsum di dalam semen.

#### A. Hidrasi C<sub>3</sub>A tanpa adanya gypsum di dalam semen

- a. Jika tidak terdapat Ca(OH)<sub>2</sub>



- b. Jika terdapat Ca(OH)<sub>2</sub>



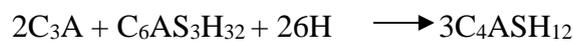
Pada saat awal pencampuran C<sub>3</sub>A dengan air kinetika hidrasinya berlangsung lambat karena terbentuknya *hexagonal hydrate* (C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> dan C<sub>4</sub>AH<sub>19</sub>) di permukaan C<sub>3</sub>A yang berfungsi sebagai lapisan pelindung. Ketika terjadi konversi senyawa menjadi C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> lapisan tersebut menjadi rusak dan proses hidrasi menjadi sangat cepat.



B. Hidrasi C<sub>3</sub>A jika terdapat gypsum



Reaksi hidrasi awal berlangsung sangat cepat dan dilanjutkan reaksi dengan laju hidrasi semakin lambat. Oleh karena itu, untuk semen dengan kadar C<sub>3</sub>A rendah justru akan mempercepat setting. Apabila terdapat ketidaksetimbangan antar reaktifitas C<sub>3</sub>A dengan laju pelarutan gypsum maka akan terbentuk sejumlah kecil senyawa C<sub>4</sub>ASH<sub>12</sub> atau C<sub>4</sub>AH<sub>19</sub>. Apabila seluruh gypsum telah bereaksi, *enttringite* akan bereaksi dengan C<sub>3</sub>A sisa.



Mineral C<sub>3</sub>A adalah komponen semen yang paling reaktif terhadap senyawa sulfat yang ada dalam air dan membentuk High Calcium Sulfaluminate Hydrat (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3CaSO<sub>4</sub>.31H<sub>2</sub>). Oleh karena itu semen untuk pelabuhan harus mempunyai kadar C<sub>3</sub>A yang rendah. Dengan air bereaksi menimbulkan panas hidrasi yang tinggi yaitu 850 J/gram. Kandungan C<sub>3</sub>A pada semen Portland bervariasi antara 7% - 15%.

- *Tetracalcium aluminate ferrit (C<sub>4</sub>AF)*

C<sub>4</sub>AF terbentuk pada suhu 900°C mempunyai sifat :

- Kurang berpengaruh terhadap kekuatan semen
- Cepat bereaksi dengan air dan cepat pula mengeras
- Memberikan warna pada semen
- Reaksi hidrasi C<sub>4</sub>AF hampir serupa dengan hidrasi C<sub>3</sub>A yaitu tergantung pada atau tidaknya gypsum dalam campuran semen.

A. Hidrasi C<sub>4</sub>AF tanpa adanya gypsum di dalam semen



(Jika dalam campuran terdapat CaO, reaksi yang terjadi hanya reaksi 2)

B. Hidrasi C<sub>4</sub>AF jika terdapat gypsum



Dengan air bereaksi dengan cepat dan pasta terbentuk dalam beberapa menit, menimbulkan panas hidrasi 420 j/gram. Warna abu-abu pada semen



dipengaruhi oleh  $C_4AF$ . Kandungan  $C_4AF$  pada semen Portland bervariasi antara 5% - 10% dan rata-rata 8%.