

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II.1 Semen

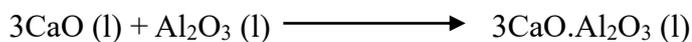
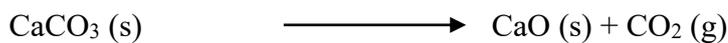
Pengertian umum semen adalah bahan yang mempunyai *adhesive* dan *cohesive*, digunakan sebagai bahan pengikat (*bonding material*) yang dipakai bersama-sama agregat (kasar dan halus). Semen dibagi atas dua kelompok:

- Semen Hidrolis adalah semen yang dapat mengeras dalam air, menghasilkan padatan yang stabil dalam air.
- Semen Non Hidrolis adalah semen yang tidak dapat mengeras dalam air atau tidak stabil dalam air.

Pembuatan semen yaitu dengan cara membakar campuran batu kapur, tanah liat, pasir silika, dan pasir besi dengan perbandingan tertentu. Hasil pembakaran ini disebut *clinker* atau terak yang mengandung senyawa utama semen yaitu:

- Tricalcium silicate* :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  atau  $\text{C}_3\text{S}$
- Dicalcium silicate* :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  atau  $\text{C}_2\text{S}$
- Tricalcium aluminate* :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  atau  $\text{C}_3\text{A}$
- Tetracalcium Aluminoferrite* :  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  atau  $\text{C}_4\text{AF}$

Reaksi yang terjadi pada proses pembuatan semen adalah:



#### II.2 Komposisi Semen

Menurut Taylor (1990), semen tersusun dari 4 senyawa utama, yaitu Kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ) 67%, Silika oksida ( $\text{SiO}_2$ ) 22%, Feri oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 3% dan Aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 5%. Kandungan dari keempat oksida utama tersebut kurang lebih 97% dari berat semen dan biasanya disebut "*Mayor Oxide*", sedangkan

sisanya 3% disebut “*Minor Oxide*” seperti senyawa  $\text{SO}_3$ , senyawa alkali,  $\text{CaO free lime}$  dan  $\text{MgO}$ .

Menurut Austin (1996) menjelaskan bahwa keempat oksida utama pada semen akan membentuk senyawa-senyawa yang terlihat pada Tabel 2.6

Tabel I.1 Susunan Senyawa-senyawa Semen Portland (Austin, 1966)

No.	Rumus Kimia	Symbol	Nama
1.	$\text{CaO.SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	Trikalsium silikat
2.	$2\text{CaO.SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Dikalsium silikat
3.	$\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	Trikalsium aluminat
4.	$\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	Tetrakalsium aluminoferrit

Keempat oksida mayor tersebut akan menghasilkan senyawa-senyawa penyusun semen yaitu:

**a. Trikalsium silikat ( $3\text{CaO.SiO}_2$  atau  $\text{C}_3\text{S}$ )**

$\text{C}_3\text{S}$  terbentuk pada suhu  $1260\text{-}1450^\circ\text{C}$  dan mempunyai sifat:

- Mempercepat pengerasan semen.
- Mempengerahui pengikatan kekuatan awal, terutama memberi kekuatan awal sebelum 28 hari.
- Menimbulkan panas hidrasi 120 kal/gram.
- Kandungan  $\text{C}_3\text{S}$  pada semen *Portland* antara 35-55%.

**b. Dikalsium silikat ( $2\text{CaO.SiO}_2$  atau  $\text{C}_2\text{S}$ )**

$\text{C}_2\text{S}$  terbentuk pada suhu  $800\text{-}900^\circ\text{C}$  dan mempunyai sifat:

- Memberi kekuatan penyokong selama 1 hari.
- Panas yang dilepas selama proses hidrasi 62 kal/gram.
- Kandungan  $\text{C}_2\text{S}$  pada semen *Portland* antara 15-35%.

**c. Trikalsium aluminat ( $3\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$  atau  $\text{C}_3\text{A}$ )**

$\text{C}_3\text{A}$  terbentuk pada suhu  $1095\text{-}1205^\circ\text{C}$  dan mempunyai sifat:

- Panas hidrasi 220 kal/gram.



- Memberikan pengaruh terhadap kecepatan pengerasan pada semen.
- Kandungan  $C_3A$  pada semen *Portland* antara 7-15%.

**d. Tetrakalsium Aluminoferrit ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$  atau  $C_4AF$ )**

- Kurang berpengaruh pada kekuatan semen.
- Panas hidrasi 70 kal/gram.
- Memberikan pengaruh pada warna semen.
- Kandungan  $C_4AF$  pada semen *Portland* antara 5-10%.

Keempat semen *Portland* mengandung komposisi:

1.  $C_3S$  dan  $C_2S$  75%: Memberikan pengaruh terhadap kekuatan tekan semen.
2.  $C_4AF$  dan  $C_3A$  25%:  $C_4AF$  memberikan sedikit pengaruh terhadap warna semen,

Sedangkan  $C_3A$  memberikan pengaruh terhadap kecepatan pengerasan semen.

Selain contoh oksida di atas, contoh oksida minor yang terdapat pada semen menurut Duda adalah:

**a. Magnesium oksida ( $MgO$ )**

Dalam pembuatan semen salah satu faktor yang harus diperhatikan adalah kandungan  $MgO$  nya. Kadar  $MgO$  yang disarankan maksimal 2%, apabila kadar  $MgO$  nya tinggi atau lebih dari 2% maka dapat menyebabkan terjadinya perubahan bentuk semen setelah terjadi pengerasan, yaitu timbulnya retak-retak atau lengkungan-lengkungan.

**b. Sulfur trioksida ( $SO_3$ )**

*Gypsum* memberikan kandungan  $SO_3$  terbesar dalam semen. Namun penggunaan *Gypsum* juga dibatasi berdasarkan kandungan  $SO_3$  nya, karena apabila terjadi kelebihan  $SO_3$  dalam semen maka akan menyebabkan ekspansi sulfat yang menimbulkan keretakan pada beton. Dimana kandungan maksimum  $SO_3$  dalam semen adalah 1,6-3%.

**c. Alkali ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ )**

Kandungan alkali maksimal 1%, tetapi disarankan 0,2-0,3%, semakin tinggi kandungan alkali akan berakibat naiknya *liquid contact* yang akan membentuk *coating*.



**d. *Free lime* (kapur bebas)**

*Free lime* adalah bagian dari kapur yang tidak bereaksi selama proses klinkerisasi dan tertinggal dalam semen dalam keadaan bebas. Hal ini terjadi karena:

- Ukuran partikel bahan baku tidak cukup halus
- Pembakaran *clinker* tidak sempurna
- Kandungan alkali dalam bahan baku terlalu tinggi
- Dekomposisi mineral *clinker* selama proses pendinginan

Semen berkualitas baik, kandungan *free lime* harus dibawah 2%, maka beton akan memiliki kekuatan yang tinggi dan menjadi kenyal.

**e. *Ignition Lost* (IL)**

*Ignition Lost* disyaratkan untuk mencegah adanya mineral-mineral yang dapat diuraikan pada pemijaran. Besarnya hilang pijar tergantung pada banyaknya air kristal *Gypsum* yang berkisar 2,5-3%. Hilang pijar pada semen terutama disebabkan oleh terjadinya penguapan air kristal yang berasal dari *Gypsum* dan penguapan uap air serta CO<sub>2</sub> yang terlepas ke udara.

### **II.3 Jenis-Jenis Semen**

Perbedaan macam semen tergantung pada komposisi unsur-unsur penyusunnya dan unsur tambahan lain yang ditambahkan. Berbagai jenis semen antara lain:

**A. Semen *Portland***

Merupakan semen hidrolis yang diperoleh dengan menggiling terak yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis, bersama bahan tambahan. Bahan tambahan yang biasanya digunakan adalah *Gypsum*. Berdasarkan banyaknya persentase kadar masing-masing komponen, ASTM (*American society of Testing Material*) C 150-95 membagi lima macam tipe semen *Portland* tersebut yaitu:



### 1. Semen *Portland* Jenis I (*Ordinary Portland Cement*)

Semen hidrolis yang digunakan secara luas untuk konstruksi umum, seperti konstruksi bangunan yang tidak memiliki persyaratan khusus, antara lain bangunan rumah, gedung bertingkat, landasan pacu.

### 2. Semen *Portland* Jenis II (*Moderate sulfate resistance*)

Semen jenis ini digunakan untuk bangunan yang memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi yang sedang, seperti bangunan pinggir laut, tanah rawa, dermaga, saluran irigasi, bendungan.

### 3. Semen *Portland* Jenis III (*High Early Strength*)

Semen jenis ini merupakan semen yang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan bangunan yang memerlukan tekan awal yang tinggi setelah proses pengecoran dilakukan dan memerlukan penyelesaian secepat mungkin, seperti pembuatan jalan raya bebas hambatan (jalan tol), bangunan tingkat tinggi dan bandar udara.

### 4. Semen *Portland* Jenis IV (*Low Heat of Hydration*)

Jenis semen ini adalah semen yang panas hidrasinya rendah, pengerasan dan pengembangannya lambat. Semen jenis ini digunakan untuk pembangunan beton yang berdimensi besar.

### 5. Semen *Portland* Jenis V (*Sulfate Resistant Cement*)

Semen jenis ini dipakai untuk konstruksi bangunan-bangunan pada tanah/air yang mengandung sulfat tinggi dan sangat cocok untuk instalasi pengolahan limbah pabrik, konstruksi dalam air, jembatan, terowongan, pelabuhan dan pembangkit nuklir.

## B. High Alumina Cement

Semen ini dapat menghasilkan beton dengan kecepatan pengerasan yang cepat dan tahan terhadap serangan sulfat dan asam, tetapi tidak tahan terhadap serangan alkali. Semen ini mempunyai kecepatan pengerasan awal yang lebih baik daripada Semen *Portland* Tipe III. Bahan baku pembuatan semen ini adalah batu kapur dan bauksit.



### C. Semen Portland Pozzolan (Portland Pozzolan Cement)

Semen *Portland pozzolan* adalah bahan pengikat hidrolis yang dibuat dengan menggiling terak, *Gypsum*, dan bahan *pozzolan*. Semen PPC digunakan untuk bangunan umum dan bangunan yang memerlukan ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang, seperti: jembatan, jalan raya, perumahan, dermaga, beton massa, bendungan, bangunan irigasi, dan pondasi pelat penuh.

### D. Semen Putih

Semen putih dibuat untuk tujuan dekoratif, bukan untuk tujuan konstruktif. Pembuatan semen ini membutuhkan persyaratan bahan baku dan proses pembuatan yang khusus, seperti misalnya bahan mentahnya mengandung oksida besi dan oksida mangan yang sangat rendah (dibawah 1 %).

### E. Semen Anti Bakteri

Semen anti bakteri adalah campuran yang homogen antara semen *Portland* dengan “*antibacterial agent*” seperti *germicide*. Bahan tersebut ditambahkan pada semen *Portland* untuk “*Self Disinfectant*” beton terhadap serangan bakteri dan jamur yang tumbuh. Sifat kimia dan fisiknya hampir sama dengan semen *Portland* tipe I. Penggunaan semen anti bakteri antara lain:

- Kamar mandi
- Kolam-kolam
- Lantai industri makanan
- Keramik
- Bangunan dimana terdapat jamur patogen dan bakteri

### F. Oil Well Cement

*Oil Well Cement* adalah semen *Portland* semen yang dicampur dengan bahan retarder khusus seperti asam borat, casein, lignin, gula atau *organic hidroxid acid*. Fungsi dari retarder disini adalah untuk mengurangi kecepatan pengerasan semen, sehingga adukan dapat dipompakan ke dalam sumur minyak atau gas.

### G. Masonry Cement



Semen hidrolis, yang digunakan dalam pekerjaan menembok konstruksi, terdiri campuran semen *Portland*, semen hidrolik dengan bahan bersifat menambah keplastisan (seperti batu kapur, kapur yang terhidrasi atau kapur hidrolis) bersamaan bahan lain untuk meningkatkan sifat waktu pengikatan (*setting time*), kemampuan kerja (*workability*), daya simpan air (*water retention*), dan ketahanan (*Durability*).

## II.4 Proses Pembuatan Semen

Menurut Duda (1983) ditinjau dari kadar air umpan maka teknologi pembuatan semen dibagi menjadi 4 proses, yaitu:

- a. Proses Basah (*wet process*).
- b. Proses Semi Basah (semi *wet process*).
- c. Proses Semi Kering (semi *dry process*).
- d. Proses Kering (*dry process*).

### 1. Proses Basah (*wet process*)

Proses pengolahan semen dengan menggunakan proses basah adalah proses pengolahan yang bahan bakunya ditambah dengan air (*slurry*). *Slurry* kemudian dikeringkan dengan *Rotary dryer* inilah yang menjadi umpan *Kiln* dengan kadar air sekitar 25 – 40%. Pada umumnya digunakan “*Long Rotary Kiln*” untuk menghasilkan terak.

Menurut Deolalkar (2009) salah satu kekurangan proses ini adalah kebutuhan bahan bakar yang digunakan relatif banyak. Beberapa kekurangan dan kelebihan dari proses basah antara lain:

1. Kekurangan
  - Sangat korosif di pipa-pipa, di *grinding* media dan rantai *Kiln*.
  - *Kiln* yang digunakan lebih panjang dibandingkan dengan proses kering.
  - Banyak memerlukan air proses.
  - Kapasitas produksi lebih sedikit dibandingkan dengan proses lain apabila menggunakan peralatan dengan ukuran yang sama maka akan didapatkan hasil yang relatif lebih sedikit
  - Biaya produksi lebih mahal



## 2. Kelebihan

- Komposisi umpan sangat homogen.
- Debu yang dihasilkan relatif sedikit.
- Kadar alkalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{K}_2\text{O}$ ) tidak menimbulkan gangguan penyempitan dalam saluran *Preheater* atau pipa
- Efisiensi penggilingan lebih tinggi dan tidak memerlukan satu unit *homogenizer*.

## 2. Proses Semi Basah (*semi wet process*)

Menurut Deolalkar (2009), pada proses semi basah, bahan baku 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*). Perpindahan panas awal terjadi pada rantai (*chain section*), sehingga terbentuk *clinker* sebagai hasil proses kalsinasi. Konsumsi panas pada proses ini sekitar 1000 – 1200 Kcal/Kg *clinker*.

### 1. Kekurangan

- *Kiln* yang digunakan masih lebih panjang daripada *Kiln* yang digunakan pada proses kering.
- Energi yang dibutuhkan 1000-1200 kcal/kg terak.
- Membutuhkan *filter* yang berupa *filter* putar kontinyu untuk menyaring umpan yang berupa *slurry* sebelum dimasukkan ke *Kiln*.

### 2. Kelebihan

- Umpan mempunyai komposisi yang lebih homogen dibandingkan dengan proses kering
- Debu yang dihasilkan sedikit.
- Biaya yang digunakan lebih sedikit dibandingkan *wet process*.

## 3. Proses Semi Kering (*semi dry process*)

Proses ini merupakan transisi dari proses basah dan proses kering dalam pembuatan semen. Umpan tanur pada proses ini berupa tepung baku kering, lalu



dengan alat granulator (*pelletizer*) umpan disemprot dengan air untuk dibentuk menjadi granular dengan kadar air 10 – 12% dan ukurannya 10 – 15 mm.

Menurut Deolalkar (2009), Proses semi kering dikenal sebagai *grate process*. *Kiln feed* dikalsinasi dengan menggunakan tungku tegak (*shaft kiln*) atau *Long Rotary Kiln*, sehingga terbentuk *clinker* sebagai hasil akhir proses kalsinasi. Kekurangan dan kelebihan dari proses semi kering ini adalah:

1. Kekurangan
  - Menghasilkan debu
  - Campuran tepung baku kurang homogen karena pada saat penggilingan bahan dalam keadaan kering.
2. Kekurangan
  - *Kiln* yang digunakan lebih pendek daripada *Kiln* yang digunakan pada proses basah.
  - Bahan bakar yang digunakan lebih sedikit dibandingkan pada proses basah

#### 4. Proses Kering (*dry process*)

Menurut Deolalkar (2009), 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 maksimal 1%, selanjutnya tepung baku yang telah homogen ini diumpankan 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* disamping itu fungsi dari *Suspension Preheater* juga berfungsi sebagai tempat terjadinya kalsinasi awal sehingga *Kiln* tidak terlalu panjang. Material yang telah keluar dari *Suspension Preheater* siap menjadi umpan *Kiln* dan diproses untuk menghasilkan terak. Terak tersebut kemudian didinginkan secara mendadak agar terbentuk kristal yang bentuknya tidak beraturan (*amorf*) agar mudah digiling. Penggilingan dilakukan di dalam *Finish mill* dan dicampur dengan *Gypsum* dan material lainnya seperti *trass*.

1. Kekurangan



- Adanya air yang terkandung dalam material sangat mengganggu operasi karena material menempel pada alat.
  - Impuritas  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{K}_2\text{O}$  menyebabkan penyempitan pada saluran *preheater*.
  - Banyak diperlukan alat penangkap debu karena debu yang dihasilkan juga banyak.
  - Campuran material kurang homogen karena bahan yang digunakan dicampur dalam keadaan kering.
2. Kelebihan
- *Rotary Kiln* yang digunakan relatif pendek.
  - Kapasitas produksi besar dan biaya operasi rendah.
  - *Heat consumption* rendah yaitu sekitar 800–1000 kcal untuk setiap kilogram terak sehingga bahan bakar yang digunakan lebih sedikit.

## II.5 Sifat-Sifat Semen

### II.5.1 Sifat Kimia Semen

Sifat kimia semen disini meliputi pembahasan komposisi zat yang ada di dalam semen, reaksi-reaksi yang terjadi, dan perubahan yang terjadi saat penambahan air pada semen. Sifat kimia semen antara lain:

#### 1. Hidrasi Semen

Menurut Taylor (1990), ketika semen dicampur dengan air maka proses kimia akan berlangsung yang disebut proses hidrasi. Bahan kimia dalam semen bereaksi dengan air dan membentuk menjadi senyawa baru pengikat hidrasi.

- Hidrasi Kalsium Silikat ( $\text{C}_3\text{S}$  dan  $\text{C}_2\text{S}$ )

Reaksi hidrasi  $\text{C}_3\text{S}$  dan  $\text{C}_2\text{S}$  dengan air akan membentuk Kalsium Hidroksida  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dan kalsium silikat hidrat ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) dengan kebasaaan yang tinggi. Kalsium Silikat Hidrat adalah kristal yang bentuknya berupa padatan yang sering disebut Tobermorite Gel, dengan adanya  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pasta semen mempunyai pH 13.

Reaksi:





- Hidrasi Trikalsium aluminat ( $\text{C}_3\text{A}$ )

Reaksi hidrasi  $\text{C}_3\text{A}$  sangat cepat sehingga pasta semen cepat mengeras, yang disebut dengan *false set*. Pengerasan semen dapat dicegah dengan menambahkan *Gypsum* ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ke dalam *clinker* semen. Reaksi hidrasi  $\text{C}_3\text{A}$  membentuk kalsium aluminat hidrat yang kristalnya berbentuk kubus.

Hidrasi  $\text{C}_3\text{A}$  tanpa *Gypsum*:



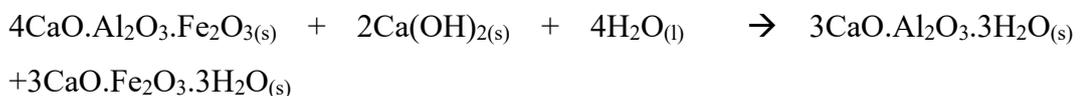
Hidrasi  $\text{C}_3\text{A}$  dengan *Gypsum*:



- Hidrasi *Tetrakalsium aluminoferrit* ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

Pada tahap awal  $\text{C}_4\text{AF}$  bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk *kalsium aluminat hydrate* dan *kalsium ferrit hidrat* yang kristalnya berbentuk jarum. Pada tahap berikutnya  $\text{C}_4\text{AF}$  bereaksi dengan *Gypsum* membentuk *calcium sulfoaluminat ferrite hidrat*.

Reaksi:



Kecepatan hidrasi akan menentukan waktu pengikatan awal dan pengerasan semen. Kecepatan awal harus cukup lambat agar adonan semen dapat dituang, atau sebaliknya sesuai kebutuhan. Hidrasi semen juga dapat mengakibatkan semen tersebut kurang baik mutunya, yaitu adanya senyawa kalsium bebas yang tidak terjadi proses kalsinasi sehingga dapat mengerosikan semen yang sudah jadi.

## 2. *Durability*

Menurut Taylor (1990), *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. Kandungan  $\text{C}_3\text{A}$  merupakan komponen semen yang paling reaktif terhadap senyawa sulfat yang ada dalam air dan membentuk *High Calcium Sulfoaluminate Hydrate* ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ).



Semen untuk pelabuhan mempunyai karakteristik khusus yaitu harus mempunyai kadar  $C_3A$  yang rendah.

### 3. *Free lime* (Kapur bebas)

Menurut Deolalkar (2009) Kapur bebas dalam *clinker* juga harus dibatasi kurang dari 1,5%. Sifat kimia semen yang lain adalah kandungan *free lime* yang dimilikinya. *Free lime* adalah kapur ( $CaO$ ) yang tidak ikut bereaksi selama pembentukan terak. Kadar  $CaO$  (*free lime*) di dalam semen dibatasi maksimal 1%. Kadar *free lime* yang tinggi membuat beton memiliki kuat tekan yang rendah dan membentuk gel yang akan mengembang (*swelling*) dalam keadaan basah sehingga dapat menimbulkan keretakan pada beton.

### 4. *LOI* (*Lost on Ignition*)

Menurut Duda (1985), *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. Kadar *LOI* perlu diketahui agar penguraian mineral dalam jumlah yang besar dapat dicegah.

### 5. 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 ( $\pm 10\%$  dalam waktu 28 hari).

Tetapi kandungan alkali dalam semen dibatasi  $< 0,6\%$  (dalam bentuk  $Na_2O$ ) karena kandungan alkali yang besar dapat menimbulkan fenomena ekspansi alkali. Alkali mudah bereaksi dengan agregat-agregat tertentu yang terdapat dalam campuran beton seperti tanah liat dan silika.

## II.5.2 Sifat Fisika Semen

### 1. Kehalusan (*Fineness*)

Menurut Kohlhaas (1983) *Fineness* semen disebut juga kehalusan semen yang dinyatakan dalam  $cm^2/gr$  atau  $m^2/kg$  dan tergantung pada derajat *grinding*.



Kehalusan sangat berpengaruh terhadap kecepatan hidrasi semen, semakin tinggi kehalusan maka kecepatan hidrasi semen juga akan semakin meningkat.

## 2. Waktu Pengikatan (*Setting time*)

Menurut Kohlhaas (1983), *Setting time* ditentukan bila pasta semen telah mengalami *setting* (yang telah mengental) dan *hardening* (yang telah mengeras) selama beberapa jam.  $C_3A$  akan bereaksi paling cepat menghasilkan CAH berbentuk gel dan bersifat kaku, tetapi CAH akan bereaksi dengan *Gypsum* membentuk *ettringite* yang akan membungkus permukaan CAH dan  $C_3A$  sehingga reaksi  $C_3A$  akan dihalangi dan proses *setting* akan dicegah. Namun demikian lapisan *ettringite* tersebut karena adanya fenomena osmosis akan pecah dan reaksi hidrasi  $C_3A$  akan terjadi lagi, tetapi segera pula akan terbentuk *ettringite* yang baru kembali. Proses ini akan menghasilkan *setting time*. Semakin banyak *ettringite* yang terbentuk *setting time* dan ini diperoleh dengan adanya *Gypsum*. *Setting* pasta semen *Portland* disebabkan oleh pembentukan struktur yang dihasilkan oleh hidrasi mineral *clinker* terutama  $C_3S$  dan  $C_3A$  kecepatan reaksi  $C_3A$  sangat cepat dengan air.

## 3. Kelenturan (*Soundness*)

Menurut Kohlhaas (1983) *Soundness* adalah pemuaihan semen yang disebabkan oleh *free lime* atau magnesium. Proses hidrasi terjadi apabila semen bereaksi terhadap air yang mengakibatkan pengerasan pasta semen. Kelenturan digunakan untuk mengontrol agar tidak terjadi pemuaihan atau penyusutan yang merusak konstruksi. Untuk Ordinary semen, kandungan dibatasi masing-masing: MgO maksimum 5%,  $SO_3$  maksimum 3,5%, total alkali maksimum 0,6% dan *free lime* (CaO bebas) maksimum 1 %.

## 4. Kekuatan Tekan

Menurut Kohlhaas (1983), kekuatan tekan atau kekuatan kompresi adalah sifat kemampuan semen menahan suatu beban tekan. Kekuatan tekan semen sangat dipengaruhi oleh komponen kimia semen yaitu  $C_3S$  dan  $C_2S$ . Komponen  $C_3S$  memberikan kekuatan tekan awal pada semen sedangkan  $C_2S$  memberikan



pengaruh kekuatan tekan akhir pada semen. Sementara komponen  $C_3A$  dan  $C_4AF$  tidak begitu berpengaruh (Komponen  $C_3A$  berpengaruh pada kecepatan pengerasan semen dan  $C_4AF$  berpengaruh pada warna semen).

### 5. *False set*

Menurut Duda (1985) *false set* adalah kekakuan yang cepat (*Abnormal Premature Setting*) terjadi beberapa menit setelah penambahan air. Standar mutu dari *false set*  $> 58\%$ , jika kurang dari standar mutu tersebut maka semen akan cepat kaku bila ditambahkan air. Penyebab terjadinya *false set* adalah sebagai berikut:

- Dehidrasi *Gypsum*, terjadi apabila *Gypsum* ditambahkan ke dalam *clinker* yang terlalu panas, *Gypsum* akan berubah menjadi *Gypsum* semi hidrat atau anhidrat yang apabila dicampur dan diaduk dengan air, terbentuk *Gypsum* kembali dan adukan menjadi kaku.
- Reaksi alkali selama penyimpanan dengan karbonat. Alkali karbonat bereaksi dengan  $Ca(OH)_2$  kemudian mengendap dan menimbulkan kekakuan pada pasta.
- $C_3S$  bereaksi dengan udara pada kelembaban yang tinggi dan pada penambahan air terjadi reaksi yang sangat cepat sehingga menimbulkan *false set*.

### 6. 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*.

## II.6 Modulus Semen

Modulus semen adalah bilangan yang menunjukkan *ratio* kuantitatif dari senyawa-senyawa utama  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , dan  $Fe_2O_3$ . Ada beberapa modulus yang digunakan, yaitu:

- *Hydraulic Modulus* (HM)
- *Lime Saturation Factor* (LSF)

- *Silica Ratio* (SR)
- *Alumina Ratio* (AR)

### 1. *Hydraulic Modulus* (HM)

*Hydraulic Modulus* adalah perbandingan dari persentase CaO dengan total faktor *hydraulic* (jumlah oksida silika, alumina, dan besi). Harga *Hydraulic Modulus* semen berkisar antara 1,7-2,3 dan dirumuskan sebagai berikut:

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Jika  $HM < 7$  maka dapat membuat kuat tekan awal semen menjadi rendah. Kuat tekan awal semen yang rendah ini akan menjadikan kualitas semen kurang baik. Hal ini disebabkan ketidakseimbangan komposisi senyawa utama dalam bahan baku yaitu persentase CaO yang lebih kecil dibandingkan senyawa lainnya ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , dan  $Fe_2O_3$ ) sehingga semen mudah retak.

Jika  $HM > 2,3$  maka akan membuat semen memiliki kuat tekan awal tinggi (mempunyai kekuatan penyokong dalam waktu lama). Namun kuat tekan awal yang terlalu tinggi akan membuat panas pembakaran pada *Kiln* lebih besar. Hal ini karena jumlah CaO yang terlalu banyak (Arsa, 1995).

### 2. *Silica Ratio* (SR)

*Silica Ratio* adalah bilangan yang menyatakan perbandingan antara oksida silika dengan alumina dan besi *Silica Ratio* (SR) adalah indikator tingkat kesulitan pembakaran *raw material*. Nilai SR dalam semen yaitu 1,9-3,2. Nilai SR dapat dirumuskan:

$$SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Jika nilai SR tinggi ( $>3,2$ ) maka *raw material* akan sulit untuk dibakar sehingga akan terjadi pemborosan bahan bakar. Selain itu, semen yang dihasilkan akan mempunyai ekspansi tinggi karena kadar *free lime* yang tinggi (Arsa, 1995).

Jika nilai SR rendah ( $<1,9$ ) maka *raw material* akan mudah dibakar karena panas yang dibutuhkan relatif kecil. Namun ketika pembakaran akan cenderung



membentuk *ring coating* dalam *Kiln* yang dapat mengurangi hasil produksi semen (Arsa, 1995).

### 3. Alumina Ratio (AR)

AR merupakan perbandingan antara  $Al_2O_3$  dengan  $Fe_2O_3$ . Nilai AR biasanya 1,5 - 2,5. Nilai AR dapat dirumuskan:

$$AR = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

*Alumina ratio* yang tinggi ( $> 2,5$ ) menyebabkan:

- *Clinker* sulit dibakar, sehingga membutuhkan suhu yang lebih tinggi.
- Kuat tekan awal tinggi.
- Kadar  $C_3A$  dan  $C_4AF$  naik.
- Menghasilkan semen dengan *setting time* yang pendek.

*Alumina ratio* yang rendah ( $< 1,5$ ) menyebabkan:

- *Clinker* mudah dibakar.
- Kuat tekan awal semen rendah, panas hidrasi rendah.
- Kadar  $C_4AF$  turun karena  $Al_2O_3$  kurang.
- Warna semen kurang gelap.

### 4. Lime Saturation Factor (LSF)

*Lime Saturation Factor* (LSF) adalah perbandingan persen CaO yang ada dalam *Raw mill* dengan CaO yang dibutuhkan untuk mengikat oksida-oksida lain. Nilai LSF semen yaitu antara 89-98. Secara umum, LSF dapat dirumuskan:

$$LSF = \frac{100 CaO}{2,8 SiO_2 + 1,18 Al_2O_3 + 0,65 Fe_2O_3}$$

Jika  $LSF < 89$ , akan menyebabkan terak mudah dibakar, kadar *free lime* rendah, dan panas hidrasi yang rendah. Hal ini akan memberikan fasa *liquid* yang berlebihan sehingga cenderung membentuk *ring* dan *coating ashing*.

Jika  $LSF > 98$ , akan menyebabkan terak sulit dibakar, kadar *free lime* tinggi, dan panas hidrasi dan burning zona tinggi. Kondisi ini diperbolehkan dalam pembuatan semen ketika batu bara yang digunakan untuk pembakaran memiliki kadar tinggi (Arsa, 1995)