

BAB II

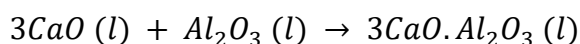
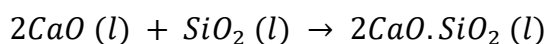
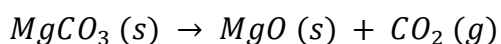
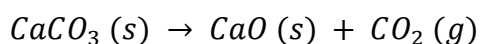
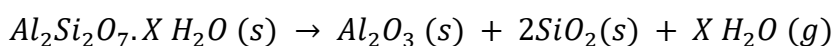
TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Semen

Semen adalah bahan perekat (adhesive) yang memiliki sifat kohesif, sehingga mampu menyatukan berbagai material menjadi struktur yang solid. Dalam penggunaannya, semen berfungsi sebagai material pengikat yang dicampur dengan agregat kasar (kerikil) dan agregat halus (pasir) untuk menghasilkan beton, mortar, maupun plester. Saat bereaksi dengan air melalui proses hidrasi, semen akan membentuk material keras yang kuat menahan tekanan, sehingga ideal digunakan dalam berbagai kebutuhan konstruksi. Pemanfaatannya sangat luas, mulai dari pembangunan gedung, jalan, jembatan, hingga pekerjaan finishing atau dekoratif. 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 C_3S
- Dicalcium silicate : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ atau C_2S
- Tricalcium aluminate : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ atau C_3A
- Tetraclcium Aluminoferrite

Reaksi yang terjadi pada proses pembuatan semen adalah:



II.2 Komposisi Semen

Menurut Taylor (1990), semen tersusun dari 4 senyawa utama, yaitu Kalsium oksida (CaO) 67%, Silika oksida (SiO_2) 22%, Feri oksida (Fe_2O_3) 3% dan Aluminium oksida (Al_2O_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 SO_3 , senyawa alkali, CaO free lime dan MgO .

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

1. Trikalsium silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ atau C_3S)

C_3S terbentuk pada suhu $1260 - 1450^\circ\text{C}$ dan mempunyai sifat:

- Mempercepat pengerasan semen.
- Mempengaruhi pengikatan kekuatan awal, terutama memberi kekuatan awal sebelum 28 hari.
- Menimbulkan panas hidrasi 120 kal/gram.
- Kandungan C_3S pada semen Portland antara 35-55%.

2. Dikalsium silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ atau C_2S)

C_2S terbentuk pada suhu $800-900^\circ\text{C}$ dan mempunyai sifat:

- Memberi kekuatan penyokong selama 1 hari.
- Panas yang dilepas selama proses hidrasi 62 kal/gram.
- Kandungan C_2S pada semen Portland antara 15-35%.

3. Trikalsium aluminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ atau C_3A)

C_3A terbentuk pada suhu $1095-1205^\circ\text{C}$ dan mempunyai sifat:

- Panas hidrasi 220 kal/gram.
- Memberikan pengaruh terhadap kecepatan pengerasan pada semen.
- Kandungan C_3A pada semen Portland antara 7-15%.

4. Tetrakalsium Aluminoferrit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 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:

- C_3S dan C_2S 75%: Memberikan pengaruh terhadap kekuatan tekan semen.
- 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 pada tahun 1983 adalah:

a. Magnesium oksida (MgO)

Salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan dalam proses produksi semen adalah kandungan MgO . Batas kadar MgO yang dianjurkan tidak lebih dari 2%. Jika kadarnya melebihi angka tersebut, semen berisiko mengalami perubahan bentuk setelah mengeras, yang ditandai dengan munculnya retakan atau lengkungan pada hasil akhirnya.

b. Sulfur trioksida (SO_3)

Gypsum merupakan penyumbang utama kandungan SO_3 dalam semen. Namun, penggunaannya harus dibatasi sesuai kadar SO_3 , karena kelebihan unsur ini dapat memicu ekspansi sulfat yang berakibat pada timbulnya retakan pada beton. Batas maksimum kandungan SO_3 dalam semen berkisar antara 1,6% hingga 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 Loss ditetapkan sebagai syarat untuk menghindari keberadaan mineral yang dapat terurai saat proses pemijaran. Nilai hilang pijar dipengaruhi oleh jumlah air kristal pada gypsum, yaitu sekitar 2,5–3%. Kehilangan ini pada semen umumnya terjadi akibat penguapan air kristal dari gypsum, serta pelepasan uap air dan CO₂ ke atmosfer.

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

Semen Portland adalah jenis semen hidrolis yang dihasilkan melalui proses penggilingan terak, yang sebagian besar tersusun atas silikat kalsium bersifat hidrolis, dengan penambahan bahan tertentu. Umumnya, bahan tambahan yang digunakan adalah gypsum. Berdasarkan persentase kandungan komponen di dalamnya, ASTM (American Society for Testing Materials) C 150 - 95 mengklasifikasikan semen Portland menjadi lima tipe, yaitu :

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

Semen hidrolis ini merupakan jenis semen yang paling banyak digunakan dalam berbagai proyek konstruksi umum karena sifatnya yang serbaguna. Penggunaannya meliputi pembangunan rumah tinggal, gedung bertingkat, hingga infrastruktur seperti landasan pacu. Karakteristik utamanya adalah mampu mengeras dengan baik saat bereaksi dengan air serta memberikan kekuatan tekan yang tinggi, sehingga cocok untuk kebutuhan konstruksi yang tidak memerlukan persyaratan teknis khusus. Selain itu, ketersediaannya yang luas dan harganya yang relatif ekonomis menjadikannya pilihan utama dalam industri konstruksi

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

Semen jenis ini dirancang khusus untuk konstruksi yang membutuhkan daya tahan tinggi terhadap serangan sulfat serta memiliki tingkat panas hidrasi sedang. Oleh karena itu, penggunaannya sangat cocok untuk pembangunan

di lingkungan yang agresif, seperti kawasan pesisir, tanah rawa, dermaga, saluran irigasi, hingga bendungan. Dengan sifatnya tersebut, semen ini mampu meminimalisasi risiko kerusakan akibat reaksi kimia dari ion sulfat serta mengurangi potensi retak akibat panas hidrasi berlebih selama proses pengerasan. Hal ini menjadikannya pilihan tepat untuk proyek-proyek konstruksi berukuran besar maupun yang berada di lingkungan dengan kondisi tanah dan air yang cukup ekstrem. bendungan.

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

Semen jenis ini dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan konstruksi yang menuntut kekuatan awal tinggi setelah proses pengecoran, sehingga memungkinkan pekerjaan diselesaikan lebih cepat. Biasanya digunakan pada proyek-proyek yang memerlukan percepatan waktu pengerjaan, seperti pembangunan jalan tol, gedung bertingkat, maupun bandar udara. Dengan sifatnya yang mampu mencapai kekuatan tekan signifikan dalam waktu singkat, semen ini sangat membantu mempercepat proses konstruksi tanpa mengurangi kualitas. Selain itu, penggunaannya juga dapat meminimalkan gangguan terhadap aktivitas di sekitar lokasi proyek, terutama pada pembangunan infrastruktur vital yang membutuhkan operasional segera.

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*

Jenis semen ini mampu menghasilkan beton dengan proses pengerasan yang relatif cepat serta memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan sulfat dan asam,

meskipun kurang tahan terhadap serangan alkali. Dibandingkan dengan Semen Portland Tipe III, semen ini menunjukkan kecepatan pengerasan awal yang lebih unggul. Dalam proses produksinya, bahan baku utama yang digunakan adalah batu kapur dan bauksit, yang kemudian diproses melalui tahapan pembakaran dan penggilingan hingga menghasilkan semen dengan karakteristik khusus tersebut. Karena sifatnya, semen ini sering dipilih untuk proyek konstruksi yang membutuhkan kekuatan awal tinggi dan daya tahan terhadap lingkungan yang bersifat asam atau mengandung sulfat, misalnya pada bangunan yang berada di wilayah pesisir atau area dengan kondisi tanah agresif.

c) Semen Portland Pozzolan (*Portland Pozzolan Cement*)

Semen Portland Pozzolan (PPC) merupakan material pengikat hidrolis yang diproduksi melalui proses penggilingan terak bersama gypsum dan bahan pozzolan. Jenis semen ini banyak dipilih karena memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap serangan sulfat serta menghasilkan panas hidrasi yang relatif rendah. PPC umumnya digunakan untuk konstruksi umum maupun proyek yang membutuhkan daya tahan lebih tinggi, seperti pembangunan jembatan, jalan raya, perumahan, dermaga, bendungan, beton massa, bangunan irigasi, hingga pondasi pelat penuh. Dengan sifat tersebut, PPC sangat sesuai digunakan pada struktur berskala besar yang memerlukan ketahanan terhadap lingkungan agresif sekaligus meminimalisir risiko retak akibat panas hidrasi yang berlebihan.

d) Semen Putih

Semen putih merupakan jenis semen yang diformulasikan khusus untuk keperluan dekoratif, bukan untuk fungsi struktural. Proses pembuatannya membutuhkan bahan baku serta tahapan produksi dengan standar tertentu. Salah satu syarat utamanya adalah kandungan oksida besi dan oksida mangan dalam bahan mentah harus sangat rendah, yakni di bawah 1%, agar menghasilkan warna putih yang khas. Karena tampilannya yang bersih dan estetik, semen putih banyak dimanfaatkan untuk pekerjaan arsitektural seperti finishing dinding, pembuatan ubin, ornamen, maupun elemen dekorasi lainnya yang menekankan nilai keindahan.

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.

f) Oil Well Cement

Oil Well Cement merupakan jenis semen Portland yang diformulasikan dengan tambahan bahan retarder khusus, seperti asam borat, kasein, lignin, gula, atau asam organik hidroksida. Penambahan retarder ini berfungsi untuk memperlambat laju pengerasan semen, sehingga campuran tetap plastis dan dapat dipompa hingga ke kedalaman sumur minyak maupun gas. Jenis semen ini sangat penting dalam industri perminyakan karena kondisi pengeboran umumnya melibatkan tekanan dan suhu tinggi. Dengan karakteristik tersebut, Oil Well Cement mampu menjaga kestabilan sumur, mencegah kebocoran fluida, serta meningkatkan keamanan dan efisiensi proses eksplorasi maupun produksi migas

g) Masonry Cement

Semen hidrolis, yang digunakan dalam pekerjaan menembok konstruksi, terdiri campuran semen Portland, semen hidrolis 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:

1. Proses Basah (*wet process*)

Proses produksi semen dengan metode proses basah dilakukan dengan menambahkan air pada bahan baku sehingga membentuk slurry. Slurry tersebut kemudian dikeringkan menggunakan rotary dryer sebelum dimasukkan ke dalam kiln dengan kadar air berkisar antara 25–40%.

Umumnya, digunakan long rotary kiln untuk menghasilkan terak pada metode ini. Menurut Deolalkar (2009), salah satu kelemahan utama proses basah adalah tingginya konsumsi bahan bakar akibat energi panas yang dibutuhkan lebih besar untuk menguapkan kandungan air. Beberapa kekurangan dan kelebihan dari proses basah antara lain:

a. 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

b. Kelebihan

- Komposisi umpan sangat homogen.
- Debu yang dihasilkan relatif sedikit.
- Kadar alkalis (Na_2O dan K_2O) 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 terlebih dahulu dipecah, kemudian pada tahap homogenisasi ditambahkan air dalam jumlah tertentu yang dicampur dengan luluhan tanah liat, sehingga dihasilkan bubur halus (slurry) dengan kadar air sekitar 15–25%. Sebelum masuk ke tanur, slurry ini terlebih dahulu disaring menggunakan filter press, menghasilkan filter cake yang berbentuk pellet. Pellet tersebut kemudian dimasukkan ke dalam tungku putar panjang (Long Rotary Kiln) untuk melalui proses kalsinasi. Pada tahap awal, perpindahan panas terjadi di bagian rantai (chain section), yang berfungsi mengeringkan dan memanaskan umpan sebelum memasuki zona pembakaran. Hasil dari proses kalsinasi ini adalah terbentuknya clinker

sebagai bahan utama semen. Proses semi basah ini membutuhkan konsumsi panas sekitar 1000–1200 kcal/kg clinker, yang relatif lebih tinggi dibandingkan proses kering, namun memiliki keunggulan dalam hal homogenisasi bahan baku sehingga mutu clinker yang dihasilkan lebih stabil.

a. 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 kontinu untuk menyaring umpan yang berupa slurry sebelum dimasukkan ke Kiln.

b. 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 semi kering dalam pembuatan semen merupakan bentuk transisi antara proses basah dan proses kering. Pada metode ini, bahan baku berupa tepung kering terlebih dahulu dimasukkan ke dalam granulator (pelletizer), kemudian disemprot dengan air hingga terbentuk butiran (granular) berukuran sekitar 10–15 mm dengan kadar air 10–12%. Menurut Deolalkar (2009), proses semi kering ini juga dikenal dengan sebutan grate process. Selanjutnya, kiln feed mengalami proses kalsinasi menggunakan tungku tegak (shaft kiln) atau long rotary kiln, hingga menghasilkan clinker sebagai produk akhir. Keunggulan metode ini adalah penggunaan energi yang lebih efisien dibanding proses basah, namun tetap lebih mudah dalam pengendalian operasi dibanding proses kering, sehingga menjadikannya alternatif yang cukup baik pada industri semen di beberapa wilayah. Kekurangan dan kelebihan dari proses semi kering ini adalah:

a. Kekurangan

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

a. Kekurangan

- Adanya air yang terkandung dalam material sangat mengganggu operasi karena material menempel pada alat.
- Impuritas Na_2O dan K_2O 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.

b. 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

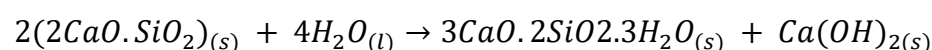
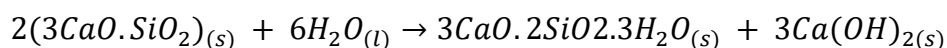
Sifat kimia semen disini meliputi pembahasan komposisi zat yang ada di dalam semen, reaksi-reaksi yang terjadi, dan perubahan yang terjadi saat penambahan air pada semen. Sifat kimia semen antara lain:

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.

a. Hidrasi Kalsium Silikat (C_3S dan C_2S)

Reaksi hidrasi C_3S dan C_2S dengan air akan membentuk Kalsium Hidroksida $Ca(OH)_2$ dan kalsium silikat hidrat ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$) dengan kebasahan yang tinggi. Kalsium Silikat Hidrat adalah kristal yang bentuknya berupa padatan yang sering disebut Tobermorite Gel, dengan adanya $Ca(OH)_2$, pasta semen mempunyai pH 13. Reaksi:

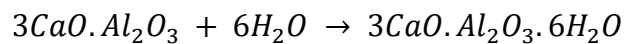


b. Hidrasi Trikalsium aluminat (C_3A)

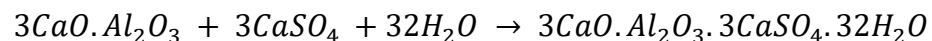
Reaksi hidrasi C_3A sangat cepat sehingga pasta semen cepat mengeras, yang disebut dengan false set. Pengerasan semen dapat dicegah dengan

menambahkan Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ke dalam clinker semen. Reaksi hidrasi C_3A membentuk kalsium aluminat hidrat yang kristalnya berbentuk kubus.

Hidrasi C_3A tanpa Gypsum:



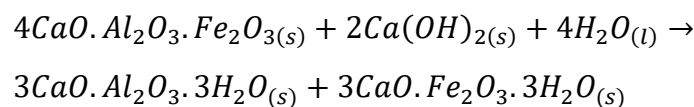
Hidrasi C_3A dengan Gypsum:



c. Hidrasi Tetrakalsium aluminoferrit (C_4AF)

Pada tahap awal C_4AF bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk kalsium aluminate hydrate dan kalsium ferrit hidrat yang kristalnya berbentuk jarum. Pada tahap berikutnya C_4AF bereaksi dengan Gypsum membentuk calcium sulfoaluminate 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 mengeroposkan semen yang sudah jadi.

2. Durability

Menurut Taylor (1990), durability atau keawetan semen adalah kemampuan semen untuk bertahan terhadap serangan senyawa kimia, terutama sulfat. Senyawa sulfat umumnya terdapat dalam air laut maupun air tanah, yang dapat merusak beton dengan menimbulkan ekspansi volume serta menyebabkan retak-retak. Komponen semen yang paling rentan terhadap serangan sulfat adalah C_3A , karena sangat reaktif dan dapat membentuk senyawa High Calcium Sulfoaluminate Hydrate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Oleh karena itu, semen yang digunakan untuk konstruksi pelabuhan memiliki karakteristik khusus, yakni harus mengandung kadar C_3A yang rendah agar lebih tahan terhadap lingkungan sulfat.rendah.

3. Free Lime (Kapur Bebas)

Menurut Deolalkar (2009), kadar kapur bebas (free lime) dalam klinker perlu dibatasi agar tidak melebihi 1,5%. Salah satu sifat kimia penting dari semen adalah kandungan free lime, yaitu CaO yang tidak bereaksi selama proses pembentukan terak. Dalam semen, batas maksimal free lime ditetapkan sekitar 1%. Jika kadarnya terlalu tinggi, beton yang dihasilkan akan memiliki kekuatan tekan rendah serta berpotensi membentuk gel yang mengembang ketika berada dalam kondisi basah, sehingga dapat menyebabkan munculnya retakan 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. Kristalkristal 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 (+ 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 ketika pasta semen mulai mengalami pengentalan (setting) hingga pengerasan (hardening) setelah beberapa jam. Senyawa C_3A bereaksi paling cepat dengan air membentuk CAH dalam bentuk gel yang bersifat kaku. Namun, CAH kemudian berinteraksi dengan gypsum membentuk ettringite yang menyelimuti permukaan CAH dan C_3A , sehingga memperlambat reaksi C_3A dan mencegah proses pengikatan terjadi terlalu cepat. Akan tetapi, lapisan ettringite tersebut dapat pecah akibat fenomena osmosis, yang membuat hidrasi C_3A kembali berlangsung. Reaksi ini segera diikuti oleh pembentukan ettringite baru, dan siklus tersebutlah yang menentukan waktu pengikatan semen. Semakin banyak ettringite yang terbentuk, semakin baik pula kontrol terhadap setting time, dan hal ini dicapai dengan adanya penambahan gypsum. Proses pengikatan pada pasta semen Portland sendiri utamanya disebabkan oleh struktur hasil hidrasi mineral klinker, khususnya C_3S dan C_3A , dengan reaksi C_3A yang berlangsung sangat cepat ketika bereaksi dengan air.

3. Kelenturan (Soundness)

Menurut Kohlhaas (1983), soundness pada semen adalah pemuaian yang ditimbulkan oleh keberadaan free lime atau magnesium. Pemuaian ini berhubungan dengan proses hidrasi, yaitu reaksi semen dengan air yang menyebabkan pasta semen mengeras. Untuk mencegah terjadinya pemuaian maupun penyusutan berlebihan yang bisa merusak struktur, diperlukan pengendalian tingkat kelenturan. Pada semen biasa (ordinary cement), terdapat batasan komposisi tertentu, yakni kandungan MgO maksimal 5%, SO_3 maksimal 3,5%, total alkali tidak lebih dari 0,6%, serta free lime (CaO bebas) dibatasi hingga maksimum 1%.

4. Kuat 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

C₂S memberikan pengaruh kekuatan tekan akhir pada semen. Sementara komponen C₃A dan C₄AF tidak begitu berpengaruh (Komponen C₃A berpengaruh pada kecepatan pengerasan semen dan C₄AF 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 :

- a. 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.
- b. Reaksi alkali selama penyimpanan dengan karbonat. Alkali karbonat bereaksi dengan Ca(OH)₂ kemudian mengendap dan menimbulkan kekakuan pada pasta.
- c. C₃S 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, SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃. Ada beberapa modulus yang digunakan, yaitu:

1. Hydraulic Modulus (HM)

Hydraulic Modulus (HM) merupakan rasio antara persentase kalsium oksida (CaO) dengan jumlah total oksida silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), dan besi (Fe₂O₃) dalam bahan baku semen. Nilai HM digunakan untuk menilai keseimbangan komposisi kimia dalam bahan baku semen, dengan rentang ideal berkisar antara 1,7 hingga 2,3. Rumusnya adalah:

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

Pengaruh Nilai Hydraulic Modulus :

a. Jika $HM < 1,7$

- Kuat tekan awal semen menjadi rendah.
- Hal ini disebabkan oleh kurangnya kadar CaO dibandingkan oksida lainnya, yang mengakibatkan ketidakseimbangan komposisi kimia.
- Semen dengan nilai HM rendah cenderung mudah retak dan memiliki kualitas yang kurang baik.

b. Jika $HM > 2,3$

- Kuat tekan awal menjadi tinggi, memberikan daya dukung jangka panjang yang baik.
- Namun, kadar CaO yang terlalu tinggi meningkatkan kebutuhan panas pembakaran dalam kiln, sehingga energi yang diperlukan lebih besar.
- Kelebihan CaO juga dapat meningkatkan risiko ketidakstabilan selama proses hidrasi.

2. Lime Saturation Factor (LSF)

Lime Saturation Factor (LSF) adalah rasio yang menunjukkan jumlah kalsium oksida (CaO) yang tersedia dalam bahan baku (raw mill) dibandingkan dengan jumlah CaO yang diperlukan untuk bereaksi dengan oksida-oksida lain, seperti SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃. Nilai LSF yang ideal untuk semen berada dalam rentang 89 hingga 98, dengan rumus:

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

Pengaruh Nilai Lime Saturation Factor

a. LSF Rendah (< 89)

- Kemudahan Pembakaran: Klinker menjadi lebih mudah terbakar karena kadar CaO yang lebih rendah.
- Kadar Free Lime: Kandungan kalsium oksida bebas (free lime) rendah, yang mengurangi risiko ekspansi pada beton.
- Panas Hidrasi: Panas hidrasi menjadi lebih rendah, cocok untuk struktur besar seperti bendungan.
- Fasa Cair Berlebihan: Fasa liquid yang terlalu banyak dapat menyebabkan pembentukan ring dan coating pada kiln, yang mengganggu proses produksi.

b. LSF Tinggi (>98)

- Kesulitan Pembakaran: Klinker menjadi sulit dibakar karena kelebihan CaO.
- Kadar Free Lime: Kandungan free lime menjadi tinggi, yang dapat memengaruhi stabilitas semen jika tidak terhidrasi sepenuhnya.
- Panas Hidrasi dan Burning Zone: Panas hidrasi dan suhu di zona pembakaran (burning zone) meningkat, yang dapat meningkatkan biaya energi.
- Penerapan: Kondisi ini dapat diterima jika bahan bakar yang digunakan, seperti batu bara, memiliki kandungan kalori tinggi untuk mendukung pembakaran.

3. Silica Ratio (SR)

Silica Ratio (SR) adalah rasio yang menggambarkan perbandingan antara oksida silika (SiO_2) dengan oksida alumina (Al_2O_3) dan besi (Fe_2O_3) dalam bahan baku semen. SR digunakan sebagai indikator kesulitan pembakaran bahan mentah di dalam kiln. Nilai SR yang ideal untuk semen berkisar antara 1,9 hingga 3,2. Rumusnya adalah:

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

Pengaruh Nilai Silica Rasio :

a. Jika $SR > 3,2$

- Kesulitan Pembakaran: Bahan baku menjadi lebih sulit terbakar karena kandungan SiO_2 yang terlalu tinggi membutuhkan lebih banyak panas untuk reaksi.
- Pemborosan Energi: Penggunaan bahan bakar meningkat, sehingga efisiensi energi menurun.
- Kualitas Semen: Kadar free lime (CaO bebas) menjadi lebih tinggi, yang dapat menyebabkan ekspansi semen berlebihan dan mengurangi stabilitas beton.

b. Jika $SR < 1,9$

- Kemudahan Pembakaran: Bahan baku mudah terbakar karena kebutuhan panas lebih kecil.
- Dampak Negatif: Terbentuknya ring coating di dalam kiln, yaitu deposit material yang menempel di dinding kiln. Hal ini dapat mengurangi efisiensi proses pembakaran dan menurunkan kapasitas produksi.

4. Alumina Ratio (AR)

Alumina Ratio (AR) adalah perbandingan antara kandungan oksida alumina (Al_2O_3) dengan oksida besi (Fe_2O_3) dalam bahan baku semen. Rasio ini penting untuk menentukan karakteristik klinker yang dihasilkan, khususnya terkait suhu pembakaran dan sifat semen. Nilai AR yang ideal biasanya berada dalam rentang 1,5 hingga 2,5, dengan rumus:

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

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

- Klinker 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.

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

- Klinker mudah dibakar.



-
- Kuat tekan awal semen rendah, panas hidrasi rendah.
 - Kadar C_4AF turun karena Al_2O_3 kurang.
 - Warna semen kurang gelap.