

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sejarah Singkat Semen

Kata “semen” berasal dari bahasa Latin yaitu *Caementum* yang artinya perekat. Semen sudah dikenal sejak jaman dahulu kala oleh bangsa Mesir, kuno dibuat dari kalsinasi atau pembakaran batu kapur dan dipergunakan untuk membangun piramida dan bangunan besar lainnya.

Sedangkan bangsa Romawi dan Yunani kuno menggunakan slag vulkanik yang berasal dari gunung berapi *Visivius* disekitar daerah *Vonselly*. Slag vulkanik ini dicampur dengan kapur gamping (*Quicklime*) serta *gypsum* dan dipergunakan sebagai semen. Mereka menamakannya sebagai *Pozzoluana/PozzolanCement*.

Perkembangan proses pembuatan semen *Portland* dengan menggunakan *kiln* berawal mula dari penggunaan *lime* dan material bersilika dalam pembuatan mortar. Penggunaan mortar (campuran pasir dengan *gypsum* yang dibakar) pertama kali dilakukan oleh bangsa Mesir. Bangsa Yunani juga menggunakan *lime* pada periode awal peradaban, dan kemudian bangsa Romawi mencontoh metode tersebut dan menyempurnakan cara pembuatan mortar yang menggunakan *slaked lime* dan pasir.

Kemudian beberapa inovasi dalam pembuatan mortar dilakukan, termasuk penggunaan material *pozzolan* sebagai bahan additif. Nama *pozzolan* sendiri berasal dari kata *pozzolana* yang berasal dari nama sebuah tempat di Italia, Pozzaoli. Tahun 1796, semen hidrolik diperoleh dengan cara mengkalsinasi *nodul-nodul* batu kapur berlempung dan dinamai secara keliru menjadi semen Romawi. Awalnya semen hidrolik ini memiliki waktu pengerasan yang cepat. Akan tetapi, penelitian yang dilakukan oleh L.J. Vicat pada *hydraulic lime* yang dibuat dari kalsinasi campuran batu kapur dan tanah liat pada tanur basah membawa perubahan yang signifikan pada perkembangan pembuatan semen. Terjadi beberapa kali pengembangan oleh beberapa orang, kemudian pada akhirnya pada 21 Oktober 1824, Joseph Aspdin mematenkan semen *Portland*.

Aspdin menyebut semen penemuannya sebagai semen *Portland* karena mortar yang dihasilkan dari semen tersebut dianggap memiliki kualitas yang serupa dengan batu *Portland* berkualitas tinggi. Batu *Portland* adalah batu untuk bahan bangunan yang paling terkenal dan banyak digunakan di Inggris pada masa itu. Semen *Portland* yang ditemukan Joseph Aspdin dihasilkan melalui proses “pembakaran ganda”, di mana batu kapur dibakar sendiri terlebih dahulu, kemudian dicampur dengan tanah liat, kemudian dibakar lagi. Proses “pembakaran ganda” ini dikembangkan karena pada zaman tersebut teknologi penggilingan belum terlalu dikembangkan, sehingga “pembakaran ganda” ini lebih ekonomis untuk menghancurkan batu kapur.

## 2.2 Macam-macam Semen

Berbagai macam semen *Portland* dibuat secara khusus untuk memenuhi persyaratan kualitas fisik dan kimiawi untuk tujuan yang spesifik. *The American Society for Testing and Materials (ASTM) Designation C 150* menjabarkan terdapat delapan tipe semen *Portland* sebagai berikut:

### a. Tipe I

Semen *Portland* tipe I adalah semen *Portland* yang bisa digunakan untuk penggunaan-penggunaan umum yang tidak memerlukan sifat atau perlakuan khusus. Tipe ini lazim digunakan apabila beton yang akan dibuat tidak akan terpapar sulfat secara berlebihan atau mengalami kenaikan temperatur akibat hidrasi. Penggunaannya antara lain untuk trotoar, jalan setapak, bangunan beton sederhana, jembatan, konstruksi jalur rel kereta, tangki, *reservoir*, pipa pembuangan, dan pipa air.

### b. Tipe II

Semen *Portland* tipe II digunakan apabila dibutuhkan pencegahan terhadap paparan sulfat, misalnya pada struktur sistem pipa *drainase* dengan konsentrasi sulfat yang cukup tinggi pada air tanah. Dengan panas hidrasi yang sedang, semen tipe II ini dapat digunakan juga untuk pembangunan dermaga besar, tembok penahan, dan cocok untuk konstruksi beton yang dibangun di udara hangat, karena selama penggunaan kenaikan temperatur akan berkurang.

c. Tipe III

Semen *Portland* tipe III merupakan tipe semen *Portland* yang dapat memberikan kekuatan tinggi pada periode awal, kira-kira dalam waktu seminggu atau kurang. Tipe ini biasanya digunakan untuk bangunan-bangunan sementara yang hanya digunakan sesaat. Meskipun semen tipe I juga dapat memberikan kekuatan dini yang tinggi, tapi semen tipe III, yang sering disebut *high early strength Portland cement*, dapat memberi hasil yang lebih memuaskan dan lebih ekonomis.

d. Tipe IA, IIA, IIIA

Perbedaan tipe A dengan tipe biasa adalah penambahan sejumlah kecil material pengikat udara ke dalam clinker untuk menghasilkan gelembung-gelembung udara yang terdistribusi merata dan terpisah sempurna. Semen tipe-tipe ini memberikan tambahan ketahanan terhadap kondisi membeku dan mencair yang periodik.

e. Tipe IV

Semen *Portland* tipe IV adalah semen dengan panas hidrasi yang rendah dan digunakan apabila laju dan jumlah pembentukan panas harus diminimalisasi. Laju pengerasannya lebih lambat daripada semen tipe I. Semen tipe IV diperuntukkan dalam pembangunan struktur beton masif, misalnya bendungan besar.

f. Tipe V

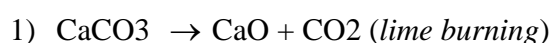
Semen *Portland* tipe V adalah semen tahan sulfat yang digunakan hanya pada konstruksi beton yang terpapar sulfat dalam kadar tinggi, terutama bila konstruksi didirikan pada lahan yang memiliki kandungan sulfat tinggi pada tanah ataupun air tanah. Semen tipe ini biasanya memiliki kandungan C3A yang sedikit, biasanya 5% atau lebih kecil.

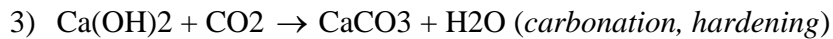
### 2.3 Bahan Baku Semen

a. *Limestone*

*Lime* atau kapur adalah material pembangun klasik yang telah dikenal selama berabad-abad. Tidak sulit untuk membayangkan bagaimana *lime* mortar ditemukan:

suatu acara perkemahan dengan api unggun diadakan di atas batuan kapur. Tiba-tiba hujan turun memadamkan api dan meresap kedalam batuan serta melarutkan sebagiannya membentuk pasta berwarna putih. Beberapa hari atau minggu kemudian ditempat yang sama, pasta tersebut ditemukan mengeras dan membentuk kembali karakter batuan aslinya. Cerita mengenai pembentukan *lime* mortar ini dapat diceritakan melalui cerita ini atau cerita lain yang serupa, beribu tahun sebelum proses yang terjadi dapat diekspresikan sebagai reaksi kimia:





Kapur tersebar luas di alam dalam bentuk kalsium karbonat. Kalsium karbonat yang terdekomposisi secara geologis memenuhi kualifikasi untuk produksi semen *Portland*. Kelas yang paling murni dari *limestone* adalah *calcite* dan *aragonite*. *Calcite* memiliki struktur kristal heksagonal dan *aragonite* berstruktur rombik. *Specific gravity* dari *calcite* adalah 2,7 sedangkan *aragonite* adalah 2,95. Butiran makroskopis varietas *calcite* adalah marmer. Tidaklah menguntungkan menggunakan marmer sebagai bahan baku semen.

Bentuk yang paling umum dari kalsium karbonat yang mirip dengan marmer, adalah *limestone* dan *chalk*. *Limestone* adalah material yang terutama terdiri dari butiran struktur kristalin. Tingkat kekerasan *limestone* bergantung pada umur geologisnya, biasanya semakin tua umurnya, semakin keras sifat dari *limestone*. *Limestone* biasanya mengandung campuran *clay* atau besi yang mempengaruhi warnanya. Hanya varietas *limestone* murni yang memiliki warna putih.

*Limestone* dengan tambahan campuran silika, *clay*, dan oksida besi disebut *marl*. *Marl* adalah bentuk transisi dari komposisi *limestone* dan *clay*. Persebaran *marl* yang luas membuat bahan ini digunakan sebagai bahan baku produksi semen. Secara geologis, *marl* adalah batuan sedimen yang terbentuk dari sedimentasi kalsium karbonat dan substansi *clay* secara singkat. Kekerasan *marl* di bawah *limestone*, semakin tinggi kandungan *clay* semakin rendah kekerasannya. Kadang *marl*

mengandung konstituen bituminus. Warna dari *marl* bergantung pada substansi *clay* dan bervariasi antara kuning hingga abu-abu hitam. *Marl* adalah *rawmaterial* yang sangat baik untuk manufaktur semen, karena *marl* mengandung *lime* dan *clay* dalam kondisi sudah homogen. *Calcareous marl* secara komposisi kimia sama dengan campuran kasar semen *Portland* digunakan untuk manufaktur yang disebut semen alami.

b. *Clay*

*Rawmaterial* penting lain dalam manufaktur semen adalah *clay*. *Clay* terbentuk dari dekomposisi alkali dan alkali tanah mengandung aluminium silika dan produk kimia konversinya, terutama *feldspar* dan *mica*. Bentuk paling murni dari *clay* adalah kaolinit yang terdiri dari alumina silika dan air dengan rumus kimia  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Kaolinit adalah konstituen utama kaolin, terdiri dari produk batu yang terdekomposisi dalam kondisi geologis. Jika, sebagai hasil perubahan geologis lebih lanjut, produk ini terpindahkan dari tempat asli terbentuknya (*primary deposit*) dan terdeposit oleh sungai atau banjir, akan terbentuk *clay*.

*Clay* termasuk material yang sulit untuk didefinisikan secara akurat karena bergantung pada sejarah pembentukannya dan dapat mengandung banyak sekali pengotor, terutama kuarsa dan oksida besi, begitu juga sedikit produk dekomposisi dari bahan organik. Komposisi kimia *clay* dapat bervariasi dari komposisi *clay* murni. *Clay* dapat mengandung jumlah bahan tambahan yang signifikan seperti hidroksida besi, sulfida besi, pasir, kalsium karbonat, dan lain-lain. Hidroksida besi

adalah pemberi warna utama dalam *clay*, selain itu bahan organik dapat juga memberi warna *clay* yang berbeda. Warna *clay* murni tanpa pengotor adalah putih. Tabel berikut ini menunjukkan komposisi kimia *clay* yang digunakan dalam manufaktur semen *Portland*: Tabel 2.1 Komposisi Kimia Clay

Komponen	Clay 1	Clay 2	Clay 3	Clay 4
LOI	7,19	8,67	10,40	6,40
SiO <sub>2</sub>	67,29	62,56	52,30	60,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,97	15,77	24,70	18,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,28	4,47	6,10	8,20
CaO	7,27	4,80	4,40	0,80
MgO	1,97	1,38	0,10	0,20
SO <sub>3</sub>	0,32	-	1,10	3,80
K <sub>2</sub> O	1,20	2,35	0,80	2,50
Na <sub>2</sub> O	1,51			
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

c. Silika

Silika ditemukan banyak dalam batuan alam. Bentuk dari silika sering dijumpai dalam bentuk yang memiliki kemurnian lebih atau kurang adalah kuarsa, pasir kuarsa, batu pasir, dan lain-lain. Silika dalam bentuk ini sangatlah stabil. Bentuk ini sama sekali tidak larut dalam air dan tahan terhadap asam, kecuali asam *hidrofluoro*. Saat dipanaskan, silika mengalami perubahan struktur kristalinnya. Sebuah proses, yang dalam beberapa kasus, disertai oleh perubahan volume yang signifikan walaupun komposisinya tetap.



Jika dipanaskan hingga 1900°C silika meleleh membentuk material bersifat gelas dikenal dengan gelas silika. Volume dari silika gelas tetap sangat stabil saat dibandingkan dengan perubahan temperatur. Sebuah gelas silika yang dipanaskan hingga berwarna merah, dapat direndam ke dalam air dingin secara tiba-tiba tanpa bahaya disintegrasi. Hal ini disebabkan karena ekspansi silika selama pemanasan dan kontraksi selama pendinginan sangatlah kecil.

Walaupun silika memiliki sifat yang stabil dalam bentuk kuarsa, saat dipanaskan hingga temperatur tinggi akan bersifat reaktif secara kimia. Sebagai contoh, alkali kuat, seperti potasium atau natrium hidroksida, bereaksi dengan kuarsa pada temperatur tinggi membentuk produk yang larut dalam air. Proses ini dimanfaatkan untuk pembuatan gelas atau wadah minuman.

Sebagai larutan air yang mengandung silika, gelas dapat dijadikan contoh proses yang terjadi antara oksida kalsium dan silika, yaitu suatu dasar penting dalam proses pengerasan hidrolis (*hydraulic hardening*). Karena oksida kalsium dan silika tergolong sebagai substrat yang memiliki kelarutan rendah dalam air, endapan harus terbentuk dalam mencampur dua larutan yang mengandung kapur dan silika. Dalam banyak reaksi pengendapan yang terjadi pada larutan dengan konsentrasi tinggi, endapan terbentuk lebih lambat atau lebih cepat dan mengendap pada bagian bawah reaktor. Hal ini tidak terjadi pada kalsium silika, saat kedua larutan dicampur terbentuk suatu *material solid*, walaupun lebih tepat disebut sebagai gel.

d. Alumina

Secara kimia alumina adalah oksida aluminium murni ( $Al_2O_3$ ). Material yang banyak mengandung bahan ini adalah *clay*. Alumina merupakan bahan yang menarik bagi sifat kimia semen karena, seperti silika, bahan ini bereaksi dengan *lime* dan air membentuk produk gel. Walaupun *clay* mengandung banyak alumina, *clay* biasa tidak cocok untuk manufaktur alumina murni. Untuk tujuan ini biasanya digunakan bauksit, yang secara esensial mengandung alumina hidrat. Bauksit murni adalah *raw material* yang umum digunakan untuk manufaktur alumina, *corundum*, dan *material refractory*.

e. Oksida besi

Oksida besi, konstituen paling penting dari mayoritas bijih besi, sering dijumpai dalam bentuk murninya, yaitu karat. Bahan ini juga dikandung dengan jumlah yang lebih sedikit atau lebih banyak dalam banyak mineral, terutama *clay*. Jadi, karena banyak ditemukan dalam *raw material*, kehadiran bahan tidak dapat dihindari dalam semen hidrolis. Semen putih tidak mengandung oksida besi dan harganya relatif tinggi.

*Raw material* yang bebas oksida besi untuk manufaktur semen lebih sulit ditemukan. Selain sulit untuk menemukan *raw material* yang cocok, manufaktur dari semen bebas besi memiliki beberapa kesulitan. Besi bertindak sebagai *fluxing agent* dalam proses pembakaran *clinker*, bahan ini memfasilitasi pembentukan bahan kimia yang membentuk basis manufaktur semen pada temperatur yang lebih rendah.

## 2.4 Deskripsi Proses

Di dalam proses pembuatan semen *Portland*, terdapat dua hal yang menjadi perhatian utama, yaitu pembentukan komponen C3S (trikalsium silikat,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) yang cukup dan berimbang, serta menghindari banyaknya jumlah *free lime* pada *clinker* yang terbentuk. Hal ini membutuhkan pengaturan kandungan kapur yang ketat. Pada proses pembuatan semen *Portland* di industri, kandungan kalsium karbonat di campuran bahan baku diatur dengan tingkat keakuratan  $\pm 0,1\%$ , mengingat pentingnya pengaturan kandungan kapur/*lime* di dalam campuran. *Free lime* bisa juga terbentuk dari pembakaran campuran yang tidak memenuhi batas kualitas kehalusan yang cukup meskipun campuran bahan baku telah dibuat dengan komposisi kimia yang sesuai.

Untuk itu, diperlukan proses pembakaran yang bertemperatur tinggi supaya kapur dapat bercampur sempurna. Proses pembuatan semen *Portland* di PT Holcim Indonesia, Tbk. Pabrik Cilacap menggunakan komposisi bahan baku sebagai berikut:

- a. 75-80% batu kapur (dengan kadar  $\text{CaCO}_3$ : 88-92%)
- b. 16-20% tanah liat (dengan kadar  $\text{SiO}_2$ : 55-65% dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 17-23%)
- c. 3-4% pasir silika (dengan kadar  $\text{SiO}_2$ : 90-94%)
- d. 1% pasir besi (dengan kadar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 65-75%)
- e. 2% gipsum

Selain komposisi di atas, biasanya di dalam proses pembuatan semen di PT. Holcim Indonesia, Tbk. Pabrik Cilacap juga ditambahkan aditif lain, semisal batu kapur

(*limestone*) dan *fly ash*. Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sendiri ditambahkan sebagai *retarder*, yaitu zat pengatur proses peregangan dan pengerasan semen

Secara garis besar tahapan proses pembuatan semen adalah sebagai berikut:

a. Penambangan dan penyediaan bahan baku

Bahan baku yang digunakan oleh PT. Holcim Indonesia, Tbk. Pabrik Cilacap adalah batu kapur (*limestone*), lempung atau tanah liat (*clay*), pasir silika (*silica sand*), pasir besi (*iron ore*), *gypsum*, dan aditif berupa *pozzolan* atau *dolomite*.

1) Batu Kapur (*Limestone*)

Batu kapur merupakan komponen utama dalam pembuatan semen karena komposisinya merupakan yang paling dominan ( $\pm 75\%$ ). Komposisi utama batu kapur adalah  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{MgCO}_3$ . Batu kapur yang digunakan diperoleh dari tambang batu kapur di daerah Sodong, Pulau Nusakambangan. Proses pengambilan batu kapur tersebut ditangani oleh departemen tambang (*mining department*) dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

a) Clearing (Pembersihan)

Pada proses ini pepohonan yang menutupi daerah yang hendak digali dibersihkan. Hal ini dilakukan karena kondisi tambang sebelumnya merupakan hutan belantara. Proses pembersihan ini menggunakan peralatan berat seperti *bulldozer*.

b) Stripping (Pengupasan)

Proses pengubasan adalah proses penghilangan *overbouden* (lapisan tanah bagian atas). Pada proses ini biasanya digunakan *bulldozer* dan *shovel*. Tujuan dari proses ini adalah agar batu kapur tidak tercampur dengan lapisan tanah yang dapat menurunkan kadar  $\text{CaCO}_3$  dalam batu kapur.

c) Drilling (Pengeboran)

Pengeboran yang dimaksud dalam proses ini adalah proses pembuatan lubang untuk memasukkan bahan peledak. Kedalaman lubang yang dibor adalah 3-6 meter dengan diameter  $\pm 50$  mm. Sudut dari lubang yang dibor adalah  $70^\circ$ , hal ini bertujuan untuk memperoleh efisiensi ledakan yang baik. Pengeboran dilakukan dengan alat bernama *Crawler Drill* yang digerakan dengan udara bertekanan dari kompresor.

d) Blasting (Peledakan)

Proses peledakan dilakukan pada lubang yang telah dibuat sebelumnya. Proses ini bertujuan untuk memisahkan batu kapur dari lapisan tanah dan juga memperkecil ukurannya.

e) Loading dan Hauling (Pemuatan dan Pengangkutan)

Proses pemuatan batuan kapur ke atas *Dump Truck* dengan kapasitas  $15 \text{ m}^3$  dengan menggunakan *Crawler Loader*. Setelah itu batuan kapur diangkut dari lokasi penambangan menuju unit pemecahan.

f) Crushing (Penghancuran)

Proses *crushing* adalah proses pemecahan batuan kapur menjadi ukuran yang lebih kecil. Tujuan dari proses ini adalah untuk mempermudah pengangkutan dan juga mempersiapkan material untuk proses selanjutnya.

2) Tanah Liat (*Clay*)

Tanah liat merupakan komponen utama selain batu kapur. Komponen ini memiliki komposisi  $\pm 17\%$  dalam proses pembentukan semen. Tanah liat memiliki kandungan komposisi utama  $\text{Si}_2\text{O}_3$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Tanah liat yang digunakan oleh PT. Holcim Indonesia, Tbk. Pabrik Cilacap diperoleh dengan penambangan pada tambang seluas 250 Ha yang terletak di Desa Tritih Wetan, Jeruk Legi. Proses penambangan yang dilakukan lebih sederhana dibandingkan proses penambangan batu kapur. Hal ini disebabkan karena kondisi area penambangan yang berupa padang ilalang.

3) Pasir Silika (*Silica Sand*) dan Pasir Besi (*Iron Ore*)

Bahan baku lain untuk proses pembuatan semen adalah pasir besi dan pasir silika. Kandungan utama pasir besi adalah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sedangkan kandungan utama pasir silika adalah  $\text{SiO}_2$ . Pasir besi dan pasir silika yang digunakan oleh PT. Holcim Indonesia, Tbk. Pabrik Cilacap diperoleh dengan membeli dari *supplier* berdasarkan kontrak. Pasir besi dan pasir silika dari *supplier* diangkut ke lokasi pabrik menggunakan *dump truck*, kemudian dimasukkan ke dalam *hopper* (X22-HP1), setelah itu diumpankan ke *belt conveyor* (X22-BC1).

Selanjutnya pasir besi dan pasir silika ditimbang oleh *belt scale* (X32-BW1) yang terdapat pada *belt conveyor* (X32-BC1) lalu diangkut oleh *belt conveyor* (X32-BC4) yang dilengkapi dengan *tripper* (X32-TR1) yang berfungsi menumpukkan material dengan system *longitudinal preblending*. Pasir silika yang dipasok oleh *supplier* berkisar  $\pm 200$  ton/hari dan pasir besi  $\pm 30$  ton/hari.

b. Pengeringan dan penggilingan bahan baku

Bahan baku berupa batu kapur, tanah liat, pasir silika, dan pasir besi, dengan komposisi masing-masing 76%, 18%, 5%, dan 1%, merupakan bahan baku pembuatan *clinker* (terak). Seluruh bahan baku yang digunakan oleh PT. Holcim Indonesia, Tbk. Pabrik Cilacap disimpan pada *stock pile* yang kapasitasnya disesuaikan dengan jenis bahan baku yang disimpan.

Pada proses produksi, seluruh bahan baku tersebut diambil menggunakan *reclaimer* kemudian diangkut menggunakan *belt conveyor* (BC). *Reclaimer* yang digunakan berbeda-beda untuk tiap jenis bahan baku karena perbedaan sifat dan kebutuhan produksi. Dari *stock pile* masing-masing bahan baku diangkut menggunakan BC ke *bin* penampung masing-masing. Setelah itu, masing-masing bahan baku ditimbang menggunakan *weight feeder* (WF) untuk memenuhi komposisi yang diinginkan. Setelah itu seluruh bahan baku dibawa ke *raw mill* untuk digiling. Jenis *raw mill* yang digunakan oleh PT. Holcim Indonesia, Tbk. Pabrik Cilacap adalah *vertical roller mill* (VRM) buatan *Fuller-Loesche*. Dalam *raw mill* ini terjadi proses penghancuran dan pencampuran awal bahan baku. Bahan baku masuk ke

dalam *raw mill* melalui *roller feeder* untuk menjaga agar tidak ada udara luar yang masuk ke dalam *raw mill*.

Selain penggilingan, dalam *raw mill* juga terjadi proses pengeringan menggunakan gas panas yang temperaturnya mencapai 300°C. Gas panas ini diperoleh dari panas sisa hasil pembakaran di *kiln* dan *preheater*. Pada proses *start-up* pabrik, gas panas untuk mengeringkan diperoleh dari pembakaran bahan bakar minyak. Bahan baku dari *roller feeder* jatuh pada bagian tengah meja *raw mill*, kemudian akibat perputaran meja, bahan baku menerima gaya sentrifugal sehingga tersebar di atas meja. Saat bahan baku tersebar, *roller* dari *raw mill* menggiling bahan baku sehingga tercampur dan mengalami pengecilan ukuran. Bahan baku yang cukup halus kemudian terbawa ke bagian atas *raw mill* karena disedot oleh *fan* yang memiliki sistem *draft* negatif.

Pada bagian atas *raw mill* terdapat separator yang akan memisahkan bahan baku yang benar-benar halus sehingga diperoleh tepung baku (*raw meal*) untuk umpan proses selanjutnya. Bahan baku yang masih kasar akan terlempar dari meja akibat gaya sentrifugal. Bahan baku yang masih kasar ini kemudian dibawa kembali ke *roller feeder* dengan menggunakan BC dan *bucket elevator* (BE) untuk diumpankan kembali ke dalam *raw mill*.

Tepung baku (*raw meal*) hasil penggilingan di *raw mill* masuk ke dalam siklon untuk dipisahkan antara gas dan tepung. Tepung baku hasil pemisahan siklon dibawa



ke *homogenizing silo* (sering disebut juga *blendingsilo*) menggunakan BE dan *air slide* (AS). Gas panas yang masih mengandung debu dari tepung baku ini kemudian dibawa ke *electrostatic precipitator* (EP) untuk mengurangi kadar debunya, setelah itu gas dibuang melalui *stack* (cerobong).

c. Proses *Clinkerization*

1) Homogenisasi

*Raw meal* yang akan dikeluarkan dari dalam *blending silo* akan didistribusi secara merata melalui *bottom silo* yang memiliki 42 segmen *blower* dengan 7 buah kerucut pengeluaran material. Prinsip homogenisasi material ini berdasarkan atas perbedaan lapisan material yang bercampur pada waktu material tersebut dikeluarkan dari *silo*. *Raw meal* yang keluar dari *blending silo* kemudian diangkut oleh *air slide* ke dalam *kiln feed bin*, lalu dibawa oleh *bucket elevator* menuju ke *preheater* untuk dilakukan proses selanjutnya.

2) Pemanasan awal (*Preheating*)

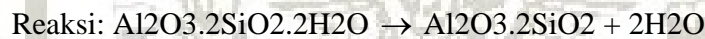
Proses pemanasan awal *kiln feed* terjadi di dalam *suspension preheater*, yang merupakan bagian dari *kiln* yang berfungsi mengeringkan dan memanaskan *kiln feed* sebelum masuk ke dalam *rotary kiln*. *Suspension preheater* yang digunakan terdiri dari dua *string*, yaitu SLC (*separate line calciner*) dan ILC (*in line calciner*), yang masing-masing terdiri dari empat tingkat dan dilengkapi oleh *calciner*. *Kiln feed* yang masuk ke dalam *preheater* memiliki suhu berkisar antara 80 – 100°C. Aliran *kiln feed* dari bagian atas samping *cyclone* ini berlawanan arah dengan aliran udara panas yang

dialirkan dari bagian bawah *cyclone*. Di dalam *cyclone*, *kiln feed* mengalami gerakan spiral yang disebabkan oleh gaya sentrifugal, gaya gravitasi, dan gaya angkat udara panas. Setelah melalui keempat *stage* dari *preheater*, *kiln feed* akan keluar melalui *down ducting* dan diumpukan ke dalam *kiln*. Di dalam *suspension preheater*, reaksi-reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:

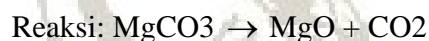
- a) Reaksi penguapan H<sub>2</sub>O yang terkandung di dalam *kiln feed* pada suhu berkisar antara 100-110 °C.



- b) Reaksi penguapan H<sub>2</sub>O yang terikat di dalam kristal tanah liat, suhu reaksi berkisar antara 450-800 °C.

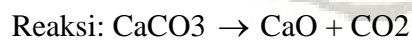


- c) Reaksi kalsinasi MgCO<sub>3</sub> yang terkandung di dalam batu kapur menjadi MgO dan CO<sub>2</sub>. suhu reaksi berkisar antara 710-730 °C.



- d) Reaksi kalsinasi CaCO<sub>3</sub> dari batu kapur untuk menghasilkan CaO dan CO<sub>2</sub>.

Reaksi inilah yang menjadi sasaran utama dari pemasangan sistem pemanasan awal. Suhu reaksi berkisar antara 750 – 900°C.



- d. Pembakaran di Rotari Kiln

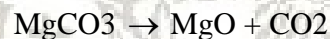
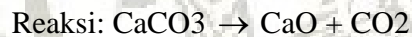
Tanur atau *kiln* yang digunakan adalah tipe *rotary kiln*, yang berfungsi untuk membakar *kiln feed* keluaran *preheater* menjadi semen setengah jadi, atau yang

sering disebut *clinker*. Pada *rotary kiln*, terdapat empat pembagian zona sebagai berikut:

- 1) Zona kalsinasi, dengan suhu berkisar antara 800 – 1200°C
- 2) Zona transisi, dengan suhu berkisar antara 1200 – 1400°C
- 3) Zona pembakaran, dengan suhu berkisar antara 1400 – 1520°C
- 4) Zona pendinginan, dengan suhu menurun dari 1520°C hingga 1290 °C

Reaksi-reaksi yang terjadi pada *kiln feed* sampai menjadi *clinker* di dalam *rotary kiln* adalah:

- a) Reaksi kalsinasi  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{MgCO}_3$  lanjutan → pada suhu berkisar antara 800 – 850°C



- b) Reaksi pembentukan senyawa  $\text{C}_2\text{S}$  (dikalsium silikat) → pada suhu berkisar antara 800–1200°C



- c) Reaksi pembentukan senyawa  $\text{C}_3\text{A}$  (trikalsium aluminat) → pada suhu berkisar antara 1000 – 1200°C



- d) Reaksi pembentukan senyawa  $\text{C}_4\text{AF}$  (tetrakalsium alumina ferit) → pada suhu berkisar antara 1000 – 1200°C



e) Reaksi pembentukan senyawa C3S (trikalsium silikat) → pada suhu berkisar antara 1200 – 1450°C



Proses pembakaran pada *rotary kiln* dilakukan pada temperatur yang tinggi, oleh karena itu dinding *shell* bagian dalam *rotary kiln* dibuat dari pelat baja yang dilapisi oleh batu tahan api. Lapisan batu tahan api ini berfungsi untuk mengurangi beban pada dinding *rotary kiln* dan untuk memperkecil hilang panas akibat radiasi di sekitar *rotary kiln*. Jenis batu tahan api yang digunakan adalah *special light weight brick* (untuk zona kalsinasi, zona transisi, dan zona pembakaran) dan *magnesia-spinel high alumina* (untuk zona pendinginan).

Sumber panas untuk pembakaran di dalam *rotary kiln* dihasilkan dari pembakaran batu bara di dalam *burner*. Batu bara dihancurkan terlebih dahulu di dalam *coal mill* dan dikeringkan dengan memanfaatkan gas panas dari *suspension preheater*. Batu bara yang telah halus (*fine coal*) ditampung di dalam *coal bin*, kemudian dialirkan ke *rotary kiln* melalui *burner*. Pembakaran dengan batu bara ini tidak dapat dilakukan apabila *rotary kiln* masih dalam tahap *start-up*. Bila *rotary kiln* masih dalam tahap *start-up*, dilakukan pembakaran awal terlebih dahulu dengan IDO (*industrial diesel oil*) pada alat *hot gas generator*, untuk menstabilkan suhu sampai kira-kira 1000°C. Setelah suhu stabil, barulah bahan bakar perlahan-lahan diganti dengan *fine coal*.

PT Holcim Indonesia, Tbk. Pabrik Cilacap juga mengembangkan bahan bakar alternatif untuk mengurangi pemakaian batu bara. Bahan bakar alternatif yang digunakan adalah sekam padi, yang dialirkan langsung ke *preheater* untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar.

e. Pendinginan Klinker

Produk pembakaran dari *rotary kiln* yang berupa lelehan kemudian didinginkan secara mendadak, proses ini disebut *quenching*. *Quenching* dilakukan untuk menghasilkan *clinker* yang bersifat *amorf*, yang cukup rapuh dan tidak terlalu keras sehingga dapat dengan mudah digiling pada penggilingan akhir. Proses *quenching* ini sudah dimulai di daerah *outlet* dari *kiln*, dan kemudian *clinker* didinginkan lebih lanjut di dalam *grate cooler*. Pendinginan ini menurunkan suhu *clinker* dari kira-kira 1290°C menjadi kira-kira 150°C, dengan memanfaatkan udara pendingin dari 14 *cooling fan*. *Grate cooler* yang digunakan terdiri dari 102 *row*, yang masing-masingnya terdiri dari 16 *grate*. Ke-empatbelas *cooling fan* menghembuskan udara pendingin dari bawah *grate plate* menembus tumpukan material *clinker*.

Sebagian udara tersebut kembali ke *kiln* sebagai udara sekunder dan sisanya dihisap keluar sebagai udara tersier, gas buang ke *EP cooler* dan *mid air* (udara panas) ke *raw mill*. *Clinker* yang kasar akan tertinggal dalam *grate cooler* dan terdorong maju menuju *outlet* dari *cooler* oleh gerakan geser maju-mundur dari *grate*, dorongan *feed* yang masuk, serta hembusan udara yang kuat dari *fan*. Di bagian *outlet cooler*, terdapat *clinker breaker* untuk memecah *clinker* yang keluar. Kemudian

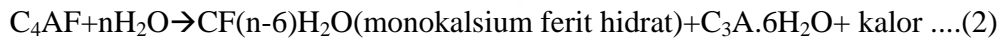
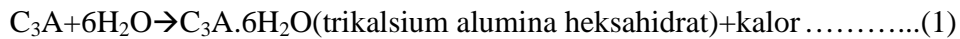
*clinker* dibawa oleh *drag chain conveyor* menuju *deep drawn pan conveyor*. *Clinker* yang halus (berupa debu yang terbawa udara) akan dibawa menuju *electronic precipitator*. Debu *clinker* yang terkumpul diangkut menuju *deep prawn pan conveyor*.

*Clinker* kemudian diangkut menuju *clinker storage silo*. Pengeluaran *clinker* dari *clinker storage silo* ini diatur oleh 10 *discharge gate*, kemudian *clinker* yang keluar dari *gate-gate* ini dibawa ke *clinker bin* dan ditimbang oleh *weight feeder*. Setelah itu, barulah *clinker* diangkut oleh *bucket elevator* menuju *vertical raw mill*, sebagai proses *pregrinding* sebelum penggilingan akhir di *ball mill*.

## **2.5 Komponen Utama dan Reaksi Semen Portland**

Di dalam semen *Portland*, terdapat empat komponen utama yang mempengaruhi kekuatan dan kualitas semen yang dihasilkan. Komponen tersebut adalah dikalsium silikat ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , penulisannya disingkat menjadi C2S), trikalsium silikat ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , C3S), trikalsium alumina ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , C3A), dan tetrakalsium alumino ferit ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ , C4AF).

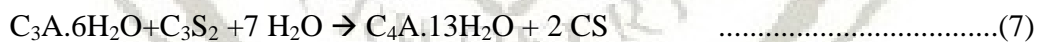
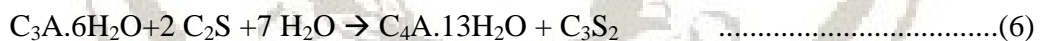
Keempat komponen tersebut akan bereaksi dengan air saat semen dicampur dengan air dalam pembuatan beton atau campuran untuk konstruksi bangunan. Reaksi-reaksi yang terjadi pada semen *Portland* dibagi menjadi dua, yaitu reaksi peregang dan reaksi pengerasan. Reaksi-reaksi peregang yang terjadi pada semen *Portland* adalah sebagai berikut:



Reaksi (1) dan (2) terjadi beberapa saat setelah semen baru saja dicampur dengan air, sedangkan reaksi (3) terjadi setelah beberapa jam semen bercampur dengan air. Setelah reaksi peregangan selesai, kemudian terjadi reaksi pengerasan semen *Portland* sebagai berikut:



Reaksi (5) membutuhkan waktu kira-kira 1 tahun untuk mencapai kesempurnaan reaksi. Di sisi lain, reaksi (4) berjalan cukup cepat dan jika tersedia  $Ca(OH)_2$  yang cukup, baik dari hasil reaksi (3) maupun dari hidrasi  $CaO$  bebas di dalam *clinker*, maka akan terjadi reaksi:



Hidrasi  $C_3S_2$  dan  $CS$  menghasilkan material yang kurang konsisten sehingga tidak akan mewujudkan kekuatan semen yang diinginkan. Semen akan cepat mengeras tetapi kekuatan akhirnya tidak cukup baik. Untuk itu, ditambahkan gipsum ( $CaSO_4.2H_2O$ ) yang berfungsi sebagai *retarder*, dengan cara mencegah reaksi (6) dan (7) melalui reaksi:



Tabel 2.2 Nilai-nilai Kalor Reaksi Peregangan dan Pengerasan pada Semen *Portland*.

Reaksi	Nama	$-\Delta H, kJ / kg$
(1)	Hidrasi $C_3A$	870
(2)	Hidrasi $C_4AF$	420
(3) + (5)	Hidrasi $C_3S$	500
(4)		-470
(5)	Hidrasi $C_2S$	260
(8)		-590
$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$	Hidrasi kapur	1170

## 2.6 Sifat-sifat Semen

Sifat-sifat semen merupakan penentu dari kualitas semen. Setiap tipe semen yang berbeda memiliki parameter sifat yang berbeda pula. Sifat-sifat semen dibagi menjadi sifat fisika dan sifat kimia, sebagai berikut:

### a. Sifat Fisika Semen

#### 1) Hidrasi semen

Jika semen dicampur dengan air maka mineral yang ada pada semen akan bereaksi dengan air, reaksi ini disebut reaksi hidrasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi hidrasi antara lain kadar air, kehalusan semen, temperatur, dan bahan aditif semen.



2) Settling dan hardening

Hasil dari reaksi hidrasi adalah lapisan kristal halus dan koloidal hidrat pada permukaan partikel semen. Pada keadaan awal lapisan ini bersifat plastis dan selanjutnya akan berbentuk kristal yang lebih sempurna sehingga tidak plastis lagi. Setelah plastisitas dari semen berakhir, proses selanjutnya adalah pengerasan, sehingga kekuatan akan meningkat cepat.

3) Panas hidrasi

Panas hidrasi adalah panas yang terbentuk dari reaksi hidrasi yang besarnya bergantung pada komposisi semen, tipe semen, kehalusan semen, dan jumlah air yang ditambahkan.

4) Penyusutan

Ada 3 penyusutan yang terjadi pada semen dalam campuran semen dengan air yaitu:

- a) *Drying shrinkage*
- b) *Hydration shrinkage*
- c) *Carbonation shrinkage*

b. Sifat Kimia Semen

1) Hilang pijar (*lost on ignition, LOI*)

Nilai LOI pada semen *Portland* mencerminkan persentase hilang massa dari sebuah sampel semen setelah dipanaskan hingga suhu 100°C. Hilang massa ini disebabkan hilangnya kandungan air dan CO<sub>2</sub> yang terdapat pada sampel semen.

Semen bisa memiliki kandungan air (*moisture*) dalam jumlah tertentu disebabkan oleh:

- a) Proses pendinginan sekejap (*quenching*) pada *clinker* panas. Air yang digunakan untuk mendinginkan sebagian besar segera teruapkan kembali, tapi sisanya cukup untuk membentuk hidrasi pada lapisan permukaan *clinker*.
- b) Penyerapan uap air dari udara selama penyimpanan/*storage* karena semen *Portland* bersifat higroskopis
- c) *Gypsum* yang ditambahkan sebagai aditif mengandung 18% air dalam kristalnya. Sedangkan, CO<sub>2</sub> terdapat pada semen karena terjadi absorpsi CO<sub>2</sub> dari udara bebas oleh sebagian kecil *clinker* yang terhidrasi. Nilai LOI untuk semen *Portland* komersial harus lebih kecil dari 5%, jika lebih besar dari nilai ini maka laju pengerasan semen akan terpengaruh.

2) Residu yang tidak larut (*insoluble residue, IR*)

Nilai IR ini menyatakan fraksi semen *Portland* yang tidak dapat larut dalam HCl. Hampir semua komponen tanah liat atau yang mengandung silika tidak larut dalam HCl, tapi setelah proses pembakaran menjadi *clinker*, semua mineral menjadi larut dalam HCl. Berarti nilai IR menyatakan jumlah material pengotor selain mineral-mineral campuran bahan baku yang tidak disengaja masuk ke dalam produk.

3) Magnesium Oksida (*magnesia, MgO*)

Batu kapur dengan kandungan *magnesia* yang terlalu tinggi, dikenal sebagai batu kapur dolomitik, tidak cocok dijadikan sebagai bahan baku pembuatan semen

*Portland*. Hal ini disebabkan karena magnesia tidak bercampur dengan “asam” oksida yang terdapat di dalam semen, dan akan tetap sebagai magnesia bebas (*free magnesia*) di produk akhir. Selain itu, tingginya kandungan magnesia di dalam semen juga bisa merugikan karena memiliki resiko ekspansi volume yang baru terjadi dalam waktu yang lama, setelah beberapa tahun, sehingga tidak bisa diidentifikasi melalui tes-tes jangka pendek. Kandungan MgO maksimal dalam semen Portland adalah 5%.

#### 4) Kehalusan semen

Kehalusan semen (*fineness*) merupakan salah satu unsur penting yang menentukan kekuatan akhir semen. Tingkat kehalusan semen mempengaruhi *setting time*, kuat tekan, dan ekspansi volume dari semen tersebut. Semakin tinggi kehalusan semen, maka *setting time* akan berkurang, kuat tekan setelah tujuh hari akan bertambah, dan ekspansi volume semen yang terjadi juga bertambah sedikit. Kehalusan semen dinyatakan dengan satuan *Blaine*, yaitu jumlah luas permukaan partikel semen dari setiap satuan massa sampel semen yang diuji, satuannya adalah cm<sup>2</sup>/gram.

#### 5) Setting time

*Setting time* atau waktu pengikatan semen merupakan salah satu sifat kimia semen yang mendapat perhatian khusus. *Initial setting time* atau waktu pengikatan awal dari semen setelah dicampur dengan air tidak boleh terlalu cepat, umumnya berkisar antara 30-45 menit. *Final setting time* atau waktu pengikatan sempurna dari semen tidak boleh terlalu lama, maksimal 150 menit.

## 6) Durabilitas

Durabilitas atau ketahanan kimiawi adalah ketahanan semen terhadap komponen sulfat dan reaksi agregat basa yang mampu mengurangi kekuatan semen. Dua komponen utama semen *Portland* yang tidak tahan sulfat adalah C3A dan C4AF.

### 2.7 *Dolomite*

Batuan *dolomite* pertama kali ditemukan oleh mineralogis Perancis bernama Deodat de Dolomieu pada tahun 1791 di daerah Southern Alps di tempat batuan ini ditemukan. Kini pegunungan tersebut disebut *dolomite*. Pada saat Dolomieu menjelaskan bahwa batuan *dolomite* adalah seperti batu gamping, tetapi mempunyai sifat yang tidak sama dengan batu gamping, pada saat ditetaskan larutan asam batuan *dolomite* tidak membuih. Mineral yang tidak beraksi tersebut dinamakan *dolomite*. Kadang-kadang *dolomite* disebut dengan dolostone.

Jadi dari pengertiannya dapat terlihat jelas perbedaan antara *dolomite* dan *limestone*. Kandungan utama *limestone* adalah kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) sedangkan *dolomite* tersusun atas senyawa  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Jadi kandungan magnesium dalam *dolomite* lebih besar daripada *limestone*. Pada awalnya batuan *dolomite* terbentuk dari proses *leaching* atau peresapan unsur magnesium dari air laut ke dalam batu gamping. Proses berubahnya mineral menjadi *dolomite* disebut dolomitisasi. Dan ada juga *dolomite* yang di endapkan dengan sendirinya sebagai evaporit. Dan secara jenis batuan *dolomite* merupakan batuan sedimen.

Berikut adalah table perbandingan komposisi kimia *limestone* dan *dolomite* :

Tabel 2.3 Perbandingan Komposisi Kimia *Limestone* dan *Dolomite*

Parameter Uji	Unit	<i>Limestone</i>	<i>Dolomite</i>
SiO <sub>2</sub>	%	1.27	0.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.82	0.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.40	0.36
CaO	%	52.29	41.03
MgO	%	0.74	9.88
K <sub>2</sub> O	%	0.02	0.02
Na <sub>2</sub> O	%	0.01	0.01
LOI	%	39.9	43.2
IR	%	3.00	3.05
<i>Clay cont.</i>	%	1.20	0.30

Dan dalam hal kegunaannya *dolomite* digunakan untuk bahan refraktori, pupuk, pengisi cat, bahan imbuh (*flux*) dalam industri peleburan serta pemurnian. Ketersediaan *dolomite* di Indonesia cukup melimpah dan daerah yang memiliki deposit *dolomite* yaitu Tamiang Hulu (Aceh), Socah (Madura), serta daerah-daerah di Jawa Timur.