

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Spesifikasi Semen

Semen merupakan salah satu bahan perekat yang jika dicampur dengan air mampu mengikat bahan-bahan padat seperti pasir dan batu menjadi suatu kesatuan kompak. Sifat pengikatan semen ditentukan oleh susunan kimia yang dikandungnya. Adapun bahan utama yang dikandung semen adalah kapur (CaO), silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), ferro oksida (Fe₂O₃), magnesit (MgO), serta oksida lain dalam jumlah kecil.

(Lea, 2019)

II.1.1. Komposisi Semen

Menurut Philip (2019), semen Portland pada dasarnya terdiri dari empat komponen yang paling penting, yaitu:

1. *Tricalcium silicate* (C₃S)

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

2. *Dicalcium Silicate* (C₂S)

Merupakan komponen penentu kekuatan akhir semen. Penambahan air menyebabkan pasta mengeras dan menimbulkan sedikit panas yaitu 250 J/gram. Pasta yang mengeras, perkembangan kekuatannya stabil dan lambat pada beberapa minggu. Kandungan C₂S pada semen Portland bervariasi antara 15% - 35% dan rata-rata 25%.

3. *Tricalcium Aluminat* (C₃A)

Merupakan komponen yang sangat menentukan ketahanan semen terhadap senyawa-senyawa sulfat. Mineral C₃A adalah komponen semen yang paling reaktif terhadap senyawa sulfat yang ada dalam air dan membentuk *high calcium sulfoluminate hydrate* (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·31H₂O). Makin rendah

kadar C_3A dalam semen, makin besar ketahanan semen terhadap sulfat.

4. *Tetracalsium Aluminate Ferrit (C_4AF)*

Panas hidrasi yang ditimbulkan C_4AF rendah sekitar 420 joule/ gram C_4AF merupakan komponen yang menentukan warna semen. Warna abu-abu pada semen dipengaruhi oleh C_4AF . Kandungan C_4AF pada semen Portland bervariasi antara 5% - 10% dan rata-rata 8%.

II.1.2 Modulus Semen

Menurut Niethidha (2014) modulus semen adalah bilangan yang menunjukkan ratio kuantitatif dari senyawa-senyawa antara lain :

1. *Hidraulic Modulus (HM)*

Yaitu perbandingan dari persentase CaO dengan *total factor hydraulic* yang terdiri dari jumlah oksida silica, alumina dan besi. Harga *hidraulic modulus* semen berkisar antara 1,7 – 2,3. Jika $HM < 1,7$ menyebabkan :

- a. $HM < 1,7$ menyebabkan kuat tekan awal semen rendah, hal ini dapat menyebabkan kualitas semen yang dihasilkan kurang baik karena komposisi senyawa utama dalam bahan baku tidak sebanding yaitu prosentase CaO lebih kecil dibandingkan senyawa lain (SiO_2 , Al_2O_3 dan Fe_2O_3) sehingga semen mudah retak.
- b. $HM > 2,3$ menyebabkan kuat tekan awal semakin tinggi yang berarti semen tersebut mempunyai kekuatan penyokong dalam waktu lama, selain itu membutuhkan banyak panas dalam pembakaran di kiln karena prosentase CaO besar. Kelebihan CaO ini menyebabkan pembakaran umpan kiln membutuhkan waktu yang lama sehingga dibutuhkan panas yang banyak.

2. *Lime Saturation Faktor (LSF)*

LSF yaitu perbandingan persen CaO yang ada dalam *raw mill* dengan CaO yang dibutuhkan untuk mengikat oksida-oksida lain. Harga LSF biasanya 89 – 98, jika $LSF < 89$ menyebabkan terak mudah dibakar, kadar free lime rendah, liquid fase berlebihan cenderung membentuk ring dan coating ashing, potensial C_3S rendah, C_2S tinggi serta panas hidrasi semen rendah. Jika $LSF > 98$ menyebabkan terak sulit dibakar, kadar free lime tinggi, temperature

burning zone tinggi, potensial kadar C_3S tinggi, panas hidrasi tinggi, dipakai apabila menggunakan batubara dengan kadar tinggi.

3. *Silica Ratio* (SR)

Merupakan bilangan yang menyatakan perbandingan antara oksida silika dengan alumina dari besi yang dapat dijadikan indikator tingkat kesulitan pembakaran raw material. SR yang tinggi akan menurunkan liquid fase serta meningkatkan burnability dan temperature pembakaran. Harga SR biasanya sebesar 1,9 – 3,2. Jika $SR > 3,2$ menyebabkan material makin sulit dibakar, C_2S banyak terbentuk dan sedikit C_3S . Jika $SR < 1,9$ menyebabkan material mudah dibakar karena panas yang dibutuhkan kecil, temperature klinkerisasi rendah dan cenderung membentuk ring coating dalam kiln

4. *Alumina Ratio* (AR)

AR yaitu bilangan yang menyatakan perbandingan antara oksida alumina dengan oksida besi. Harga Alumina Ratio berkisar antara 1,5 – 2,5. Jika $AR > 2,5$ menyebabkan material sukar dibakar, menghasilkan semen dengan setting time yang pendek dan kekuatan tekan awal tinggi, kadar C_3A tinggi dan menurunkan kadar C_4AF dalam semen. Jika $AR < 1,5$ menyebabkan liquid fase berdensitas tinggi dengan viscous rendah, temperature klinkerisasi rendah, material sukar dibakar.

II.1.3 Sifat – Sifat Semen

Secara umum spesifikasi produk semen dibatasi oleh komposisi kimia dan sifat fisika:

A. Sifat Fisika Semen

Sifat fisik sangat mempengaruhi kualitas dan kemampuan semen. Sifat–sifat fisik tersebut antara lain :

a. Kehalusan

Tingkat kehalusan partikel diukur dengan menggunakan metode *wagner turbidimeter* (ASTM C 115), *Blaine air-permeability* (ASTM C 204) atau ayakan no. 325 (45 micron) - ASTM C 430. Sekitar 85-95% partikel semen berukuran di bawah 45 micron. Semen yang memiliki distribusi ukuran partikel yang lebih halus akan memberikan laju reaksi

yang lebih cepat, atau dengan kata lain akan mempercepat pencapaian kekuatan pasta semen yang diinginkan.

b. Penyusutan (*Shrinkage*)

Terbagi dalam tiga macam, yaitu *hidration shrinkage*, *drying shrinkage*, dan *carbonation shrinkage*. Penyebab keretakan yang terbesar pada beton adalah *drying shrinkage*, yang disebabkan oleh penguapan air yang terkandung dalam pasta semen selama berlangsungnya proses *setting* dan *hardening*. *Shrinkage* dipengaruhi oleh komposisi semen, jumlah air pencampur, *concentrate mix* dan *curing condition*. Batas penyusutan yang diizinkan yaitu sebesar $<0,025\%$ dari ukuran semulanya.

c. Pengikatan (*setting*) dan Pengerasan (*hardening*)

Proses pengikatan yaitu pasta semen yang pasta semen akan berubah menjadi lebih kental atau kaku (*stiff*), waktu ikatan semen akan lebih pendek apabila temperaturnya lebih dari 30°C . Pasta semen mulai menunjukkan kekuatan dan nilainya akan meningkat terus sejalan dengan bertambahnya umur.

d. Kekuatan Kompresi

Kekuatan kompresi semen sangat dipengaruhi oleh jenis komposisi semen dan kehalusan semen. Semakin halus ukuran partikel semen, maka kuat tekan yang dimilikinya akan semakin tinggi. Kekuatan kompresi dari semen portland yaitu 2,03 MPa pada metode water curing dan 2,03 MPa pada metode dry curing.

e. *Soundness*

Kemampuan pasta semen untuk mempertahankan volumenya setelah proses pengikatan. Berkurangnya *soundness* berarti timbulnya kecenderungan beton untuk berekspansi, ini disebabkan oleh tingginya kadar *free lime* ($>2\%$) dan *magnesia* ($>2\%$).

(Hidayat, 2019)

B. Sifat Kimia Semen

Menurut Lea (2019) bahwa sifat kimia semen di sini meliputi pembahasan komposisi zat yang ada di dalam semen, reaksi-reaksi yang terjadi

dan perubahan yang terjadi saat penambahan air pada semen. Hal ini perlu dilakukan karena komposisi dan sifat komponen tersebut sangat mempengaruhi sifat semen secara keseluruhan. Reaksi Kimia dan Perubahan yang Terjadi Setiap Kenaikan Temperatur

| | |
|----------------------|---|
| Pada 100°C | : Terjadi penguapan air bebas |
| Pada 100°C – 500°C | : Pelepasan air kristal (blinded water) |
| Pada 500°C | : Perubahan struktur mineral silika. $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$ |
| Pada 500°C – 900°C | : Terjadi kalsinasi atau peruraian dari $MgCO_3$ dan $CaCO_3$ $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$ |
| Pada 800°C | : Terjadi reaksi kalsinasi $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ Pembentukan CA: $C + A \rightarrow CA$ Pembentukan C_2S : $2C + S \rightarrow C_2S$ Pembentukan C_2F : $2C + F \rightarrow C_2F$ |
| Pada 800°C–900°C | : Awal pembentukan $C_{12}A_7$ $5C + 7CA \rightarrow C_{12}A_7$ |
| Pada 1090°C–1200°C | : C_3A terbentuk dan C_2S pada keadaan maksimal $9C + C_{12}A_7 \rightarrow 7C_3A$ C_4AF terbentuk $C + CA + C_2F \rightarrow C_4AF$ |
| Pada 1200°C | : Pembentukan fasa cair material menjadi kental dan homogen. |
| Pada 1200°C – 1450°C | : C_3S terbentuk dan C_2S berkurang $C + C_2S \rightarrow C_3S$ |
| Pada >1450°C | : Dekomposisi C_3S menjadi C_2S dan CaO berjalan lambat |

a. Hidrasi Semen

Semen yang dicampur dengan air akan menghasilkan reaksi dengan komponen yang ada dalam semen dengan air yang reaksinya disebut reaksi hidrasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi hidrasi adalah kehalusan semen, jumlah air, temperatur, dan komposisi kimia. Bila kadar gypsum dalam semen terlalu tinggi maka jumlah lapisan yang melindungi C₃A akan semakin banyak dan waktu pengerasan semakin lama. Kelebihan SO₃ menyebabkan ekspansi sulfat yang menimbulkan keretakan pada beton. Kandungan maksimum SO₃ dalam semen 1,6 – 3%.

b. *Durability*

Durability adalah ketahanan semen terhadap senyawa kimia, terutama terhadap senyawa sulfat. Senyawa sulfat biasanya terdapat di dalam air laut dan air tanah. Senyawa ini menyerang beton dan menyebabkan ekspansi volume dan keretakan pada beton. Mineral C₃A adalah komponen semen yang paling reaktif terhadap senyawa sulfat yang ada dalam air dan membentuk *High Calcium Sulfaluminate Hydrat* (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.3H₂O).

c. Kandungan Alkali dalam Semen

Kandungan alkali (Na₂O dan K₂O) 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 Na₂O) karena kandungan alkali yang besar dapat menimbulkan fenomena ekspansi alkali. Alkali bereaksi dengan agregat yang terdapat dalam campuran beton.

(Hidayat, 2019)

d. Panas Hidrasi

Panas ini merupakan panas yang ditimbulkan saat semen bereaksi dengan air. Besarnya panas hidrasi tergantung dari komposisi semen dan kehalusan dari semen serta temperatur proses. Reaksi kimia antara semen yang tidak terhidrasi dan air selama pengerasan dan pengerasan melepaskan panas yang menghasilkan kenaikan pada suhu beton baru. Pendinginan akhir dari

beton yang mulai megeras menghasilkan kontraksi termal dan retak, dan metode untuk memprediksi kenaikan suhu dengan alat kontrol diperlukan untuk membatasi permeabilitas dan meningkatkan daya tahan. Kenaikan suhu dapat dikaitkan dengan kandungan semen beton (per satuan volume beton baru) dan untuk faktor komposisi kimia lainnya dari beton dan semen. Alat yang digunakan untuk melakukan pengujian panas hidrasi adalah *Bomb Calometer*.

(Hidayat, 2019)

Tabel II.1 Panas Hidrasi yang Dihasilkan

| Komponen | Senyawa Hidrat yang Terbentuk | Panas Hidrasi (KjJKg) |
|---|---|-----------------------|
| C ₃ S (+H) | C-S-H + CH | 520 |
| B – C ₂ S (+H) | C-S-H + CH | 260 |
| C ₃ A (+CH+H) | C ₄ AH ₁₉ | 1160 |
| C ₃ A (+H) | C ₃ AH ₆ | 910 |
| C ₃ A (+CSH ₂ +H) | C ₄ ASH ₁₂ | 1140 |
| C ₃ A(+CSH ₂ +H) | C ₆ AS ₃ H ₃₂ | 1670 |
| C ₃ AF (+CH+H) | C ₃ (A ₂ F)H ₆ | 420 |

(Sumber: Lea, 2019)

e. Kelembaban Semen

Kelembaban semen akan berakibat menurunnya *specific gravity*, terjadi *false set*, terbentuknya gumpalan – gumpalan, menurunnya kualitas semen serta tekanan, bertambahnya *loss on ignition*, *setting time* dan *hardening*, oleh sebab itu semen harus dibawa ke tingkat kelembaban standar sebelum pengukuran (misalnya pengeringan pada kelembaban relatif 65%), strategi penyimpanan semen harus diperhatikan agar semen dapat menjadi awet dan mutu dari semen akan terjaga.

f. *Free Lime* (Kapur Bebas)

Free lime adalah kapur (CaO) yang tidak bereaksi selama pembentukan terak. Kadar CaO di dalam semen dibatasi max 1%. Kadar *free lime* yang tinggi membuat beton memiliki kuat tekan yang rendah (akibat ekspansi kapur bebas)

membentuk gel yang akan mengembang (*swelling*) dalam keadaan basah sehingga dapat menimbulkan keretakan pada beton.

g. *LOI (Lost On Ignition)*

LOI adalah hilangnya beberapa mineral akibat pemijaran, pada ASTM C618-15 memiliki LOI maksimum sebesar 12%. Senyawa yang hilang akibat pemijaran adalah air dan CaO. Kristal-kristal tersebut mudah terurai mengalami perubahan bentuk untuk jangka waktu yang panjang, sehingga dapat menimbulkan kerusakan beton setelah beberapa tahun. Oleh karena itu kadar LOI perlu diketahui agar penguraian mineral dalam jumlah yang besar dapat dicegah.

(Philip, 2019)

Tabel II.2 Batasan Senyawa yang Terkandung dalam Produk Semen Portland Pozzolan yang Sesuai dengan Standart Mutu

| Sifat | Komposisi | Standart Mutu Produksi | SNI |
|------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Kimia | MgO | < 2 persen | < 6 persen |
| | SO ₃ | 1,4 – 2,5 persen | < 3 persen |
| | LOI | < 5 persen | < 5 persen |
| | <i>Free Lime</i> | < 2 Persen | < 2 persen |
| Fisika | <i>Blaine</i> | ≥320 m ² /kg | >280 m ² /kg |
| | <i>Vicat Awal</i> | ≥100 menit | >45 menit |
| | <i>Vicat Akhir</i> | 360 menit | <375 menit |
| | Kuat Tekan | 3hari ≥140 kg/cm ² | 3hari ≥ 85 kg/cm ² |
| | | 7 hari ≥210 kg/cm ² | 7 hari ≥ 160 kg/cm ² |
| | | 28 hari ≥ 300 kg/cm ² | 28 hari ≥210 kg/cm ² |
| <i>Autoclave</i> | < 0,2 persen | < 0,8 persen | |
| <i>False Set</i> | >50 persen | >50 persen | |

(Sumber: Laboratorium Pengendalian Proses PT. Semen Indonesia, 2021)

II.1.4 Fungsi Semen

Fungsi utama semen adalah sebagai pengikat hidrolis, yang meningkatkan ikatan antara partikel yang terfragmentasi, sehingga dapat memungkinkan penggunaannya di berbagai bidang. Bahan yang dihasilkan akan memiliki sifat fisik dan mekanik yang berbeda dari bahan awal bahan. Perubahan sifat yang terjadi dikaitkan dengan reaksi hidrasi eksotermik yang dimulai pada pencampuran pengikat dengan air.

(Hidayat, 2019)

II.1.5 Macam – Macam Semen

Menurut Lea (2019), perbedaan macam semen tergantung pada komposisi unsur-unsur penyusunnya dan unsur tambahan lain yang ditamapkannya. Berbagai jenis semen, antara lain :

1. Semen Portland

Merupakan semen hidrolis yang diperoleh dengan menggiling terak yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis, bersama bahan tambahan biasanya digunakan gypsum. Menurut Tanubrata 2015 berdasarkan banyaknya presentase kadar masing-masing komponen ASTM (*American Society of Testing Material*) C 150 – 95 membagi lima macam type semen Portland yaitu:

Tabel II.3 Tipe Semen Portland

| Tipe | Nama | Fungsi |
|------|-----------------------------------|--|
| I | <i>Ordinary Portland Cement</i> | Digunakan untuk pembangunan umum tanpa syarat khusus |
| II | <i>Moderate Heat Cement</i> | Digunakan bila ada gangguan dari sulfat yang sedang dan panas hidrasi sedang |
| III | <i>High Early Strength Cement</i> | Digunakan untuk pembangunan yang penyelesaiannya cepat atau di batasi waktu |
| IV | <i>Low Heat Cement</i> | Digunakan dalam membangun bendungan pijakan besar, pelat rakit besar, alas turbin angin. |
| V | <i>Sulfat Resistance Cement</i> | Digunakan apabila pembangunan ada di sekitar tepian pantai atau bangunan tersebut memiliki gangguan sulfat yang tinggi |

2. Semen Putih

Campuran semen ini memiliki kadar Fe_2O_3 -nya rendah. Semen ini dibuat dari batu kapur dan tanah liat putih (kaolin), kadar Fe_2O_3 tidak boleh lebih dari 1,5%. Pengolahannya sama dengan pengolahan semen biasa, tapi tidak menggunakan alat-alat yang mengandung besi.

3. Semen Alumina Tinggi

Tebuat dari batu kapur dicampur dengan bauksit dengan kadar campuran 60-70% (batu kapur), dan 30-40% (bauksit). Campuran dibakar pada suhu $1600^{\circ}C$ dalam tungku listrik sampai cair, kemudian hasil baker tadi di tambahkan gips.

4. Semen Pozzoland

Semen ini merupakan hasil dari semen Portland di tambah dengan pozolan, yang mana pozolan yang di tambahkan bekrisar 10-30%. Nama lain dari semen ini Traz Portland Cement, semen ini sering dipakai di Negara Jerman. Tras yang di gunakan adalah Tras Andernach.

5. Oil Well cement

Berfungsi untuk menyemen pipa pengeboran minyak, melapisi bocoran air atau gas. Semen ini di pakai dalam bentuk bubur cair yang di pompakan dengan tekanan tinggi yang mencapai 1200 kg/cm^2 dengan suhu rata-rata lebih dari 170° dalam keadaan belum mengeras.

(Lea, 2019)

II.1.6 Uraian Proses

Semen merupakan campuran senyawa kimia berbentuk butiran yang tersusun dari batu kapur/batu gamping, alumina, pasir silika, gypsum, dan tanah liat. Proses pembuatan semen di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. menggunakan proses kering. Berdasarkan Diktat Teknologi Semen PT. Semen Indonesia (Persero), Tbk. Tahun 2020, secara umum proses pembuatan semen dengan proses kering dibagi atas empat bagian yaitu :

A. II.1.6.1 Penyediaan Bahan Baku

Langkah - langkah penyediaan bahan baku menurut Hadi (2021), antara lain:

a. Pembersihan (*Cleaning*)

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

b. Pengupasan (*Stripping*)

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

c. Pengeboran (*Drilling*)

Pembuatan lubang-lubang pada batuan kapur yang akan diberi bahan peledak. Jarak dan kedalaman lubang pengeboran disesuaikan dengan kondisi batuan dan lokasi. Umumnya kedalaman lubang 5 – 9 m, diameter lubang 3 inch dan jarak antar lubang 1,5 – 3 m. Peralatan yang digunakan untuk pengeboran yaitu alat bor (*Crawl Air Drill*) dan alat penggerak bor (*Compressor*).

d. Peledakan (*Blasting*)

Bertujuan untuk melepaskan batuan kapur yang diinginkan dari batuan

induknya. Setelah dilakukan pengeboran, lubang tersebut akan diisi dengan bahan peledak, hasilnya berupa batuan kapur dengan ketentuan maksimal 300mm, kemudian dikeruk dan diangkat dengan menggunakan shovel atau loader menuju hopper limestone menggunakan dump truck yang mempunyai kapasitas 20-30 ton setiap trucknya yang dilakukan 25-30 kali/ hari.

B. II.1.6.2 Proses Pembakaran dan Pendinginan

Unit pembakaran inilah merupakan bagian terpenting karena terjadi pembentukan komponen utama semen. Terdapat empat zona proses pembakaran diantaranya:

- a. *Calsinasi zone*, dimana material yang baru masuk kedalam kiln untuk dikalsinasi dengan suhu berkisar antara 1100-1200°C sehingga mengakibatkan perubahan bentuk pada material tersebut yang tadinya berupa serbuk-serbuk padat menjadi serbuk-serbuk yang mulai terlihat meleleh.
- b. *Transisi zone*, pada proses ini bahan material mendapatkan pemanasan yang lebih tinggi berkisar antara 1200-1300°C yang berakibat material hampir mendekati cair.
- c. *Burning zone*, dalam proses ini material benar-benar mendapatkan pemanasan secara penuh dari kiln hingga material tersebut mencair dengan suhu mencapai 1400–1600°C.
- d. *Cooling zone*, pada proses ini material yang telah masuk ke cooler mendapatkan pendinginan secara cepat atau proses pendinginan yang dikagetkan karena pada cooler ini panas pada material harus lebih dingin dibandingkan didalam kiln dimaksudkan supaya klinker tersebut tidak lengket pada great plat. Panas pada cooler mencapai 150- 200°C.

(Dude, 2000)

C. II.1.6.3 Proses Penggilingan

Penggilingan merupakan proses penghancuran produk ke dalam mesin penghancur khusus, dengan tujuan agar di hasilkan potongan-potongan dengan bentuk yang di inginkan. Proses penggilingan diberi tambahan gypsum dengan kadar 91% dengan perbandingan 96 : 4 berfungsi sebagai penghambat proses pengeringan pada semen. Semen akan mengalami pengecilan ukuran dari 100

mesh menjadi 325 mesh dan lolos ayakan 90%.

(Hadi, 2020)

D. II.1.6.4 Proses Pengemasan

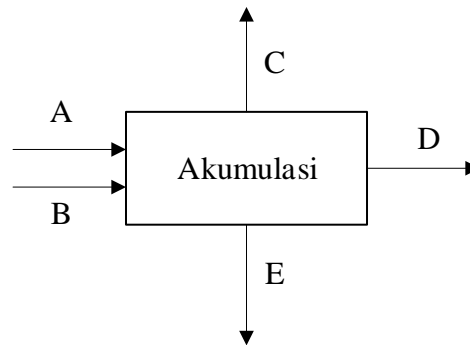
Hasil produk dari finish mill kemudian diangkut oleh air slide menuju *cement silo*. Semen dilewatkan *vibrating screen* untuk dipisahkan semen dari kotoran pengganggu seperti logam, kertas, plastik atau bahan lainnya yang terikut. Selanjutnya semen dimasukkan ke dalam *bin*. Semen yang sudah jadi selanjutnya melalui tahap pengantongan. Semen curah akan langsung dibawa ke *bin* dan selanjutnya dimasukkan dalam *truck* dengan kapasitas 18-40 ton untuk didistribusikan kepada konsumen. Sedangkan semen yang akan dikemas dalam kantong dibawa menuju bagian packer untuk dilakukan pengisian dan pengantongan semen. Terdapat 2 jenis ukuran kemasan, yaitu kemasan 40 dan 50 kg sesuai standar SNI. Kantong dengan kapasitas 50 kg semen untuk semua type 1 (OPC) yang merupakan produksi utama pabrik Tuban dan 40 kg semen untuk jenis PPC yang hanya digunakan sesuai pesanan.

(Hadi, 2021)

II.1.7 Neraca Massa dan Neraca Panas

Menurut Wuryanti, 2016 untuk menyelesaikan perhitungan-perhitungan dalam neraca massa dan energy diperlukan suatu basis atau patokan yaitu suatu pemilihan reference untuk mempermudah penyelesaiannya. Biasanya dinyatakan pada salah satu bahan masuk atau bahan yang keluar. Basis bias berupa periode waktu (jam, menit, atau detik) atau berupa massa suatu bahan misalnya pound, gram, kg mole dan lain-lain.

Neraca massa adalah suatu perhitungan yang tepat dari semua bahan-bahan yang masuk, tidak tergantung satu sama lain, dimana persamaan-persamaan tersebut yang terakumulasi dan yang keluar dalam waktu tertentu. Pernyataan tersebut sesuai dengan hukum kekekalan massa yakni: massa tak dapat dijinakkan atau dimusnahkan. Prinsip umum neraca massa adalah membuat sejumlah persamaan-persamaan yang saling jumlahnya sama dengan jumlah komposisi massa yang tidak diketahui. Persamaan neraca massa secara umum adalah:



(Sumber: Wuryanti, 2016)

Gambar II.1 Diagram Neraca Massa

Persamaan neraca massa:

Massa masuk = massa keluar + massa yang terakumulasi

$$M_A + M_B + M_C = M_D + M_E + M_{\text{akumulasi}}$$

Bila tidak ada massa yang terakumulasi, maka persamaan menjadi:

Massa masuk = massa yang keluar

$$M_A + M_B + M_C = M_D + M_E$$

Tahap-tahap menyelesaikan soal-soal neraca massa adalah sebagai berikut:

1. Pilih atau tentukan basis perhitungan
2. Gambarkan diagram proses
3. Jika tidak terjadi reaksi kimia, penyelesaian soal bukan didasarkan atas unsur yang ada tetapi atas dasar senyawa. Jika tidak melibatkan reaksi kimia, memakai satuan massa dan jika ada reaksi kimia memakai satuan mole. Jika terjadi reaksi kimia dihitung atas dasar unsur
4. Jumlah persamaan neraca massa yang dibuat adalah jumlah besaran yang tidak diketahui tidak boleh melebihi jumlah persamaan neraca massa independent

Neraca energy adalah persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara energy masuk dan energy keluar suatu system yang berdasarkan pada satuan waktu operasi. Konsep Makro:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energi Masuk} \\ \text{Ke Sistem} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energi yang} \\ \text{Timbul} \\ \text{dalam Sistem} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Akumulasi} \\ \text{Energi} \\ \text{dalam Sistem} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energi} \\ \text{Keluar} \\ \text{dari Sistem} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energi yang} \\ \text{Dipakai} \\ \text{dalam Sistem} \end{array} \right)$$

$$(E_1) + (Q) = (\Delta E) + (E_2) + (W)$$

II.2 Tugas Khusus : Perhitungan Neraca Massa dan Neraca Panas pada Sistem Kiln Seksi Operasi RKC 3 PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk Pabrik Tuban III

II.2.1 Latar Belakang

Proses akhir dalam pembuatan semen di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk adalah proses pembakaran akhir yang terjadi di system kiln. Proses ini melibatkan banyak energi atau panas yang digunakan. *Rotary kiln* merupakan alat yang menjadi jantung proses dalam pembuatan semen karena memproduksi terak (klinker) sebagai produk setengah jadi pada proses pembuatan semen. Kualitas produk yang baik dapat dilihat dari hasil klinker yang keluar, sehingga untuk menjadikan kualitas dari sebuah klinker maka harus mengontrol kondisi operasi yang optimum terutama parameter suhu. *Rotary kiln* merupakan peralatan yang menyerap jumlah energi listrik dan energi panas terbesar, sebagai contoh biaya bahan bakar untuk alat ini mencapai 30 – 40 % dari biaya produksi. Kenaikan dari biaya produksi dapat memicu kenaikan harga produk sehingga dapat menurunkan daya saing dipasaran. Efisiensi dari pembakaran di sistem kiln menjadi perhatian dalam penekanan biaya, karena termasuk unit dengan konsumsi energi yang tinggi. Suhu pembakaran pada rotary kiln menjadi tinggi karena terjadi perpindahan panas pada permukaan coating di dinding kiln yang tidak rata. Sebagai akibatnya dibutuhkan bahan bakar yang banyak. Jika efisiensi pada sistem kiln rendah, maka energi yang digunakan terbuang ke lingkungan semakin besar pula sehingga menyebabkan boros energi. Menyadari besar peranan system kiln dalam produksi semen, maka efisiensi pada sistem ini harus dijaga sebesar mungkin agar menghemat energi dan mencegah kenaikan biaya produksi. Tugas khusus dengan judul “Perhitungan Neraca Massa dan Neraca Panas pada Sistem Kiln Seksi Operasi RKC 3 PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk Pabrik Tuban III” perlu dilakukan untuk pengendalian operasi terhadap kinerja di sistem kiln agar tidak terjadi boros bahan bakar dan energi.

II.2.2 Penyelesaian

Langkah-langkah yang harus dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan efisiensi pada system Kiln adalah menghitung neraca massa dan neraca panas. Beberapa alat yang perlu dihitung yaitu:

1. *Suspension Preheater*
2. *Rotary Kiln*
3. *Klinker Cooler*

Terdapat tiga jenis data yang digunakan untuk menghitung neraca massa dan neraca panas yaitu data primer yang diperoleh dari Laboratorium Pengendalian Proses PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk Pabrik Tuban, data sekunder dari literatur-literatur atau studi pustaka serta data asumsi. Neraca massa dan panas merupakan suatu cabang ilmu yang mempelajari proses dalam industri yang merupakan perhitungan kuantitatif dari semua bahan dan energy/panas yang masuk, keluar, terakumulasi maupun yang terbuang dalam sistem. Perhitungan neraca juga digunakan untuk mencari variable proses yang belum diketahui berdasarkan data yang telah diketahui.. Data primer meliputi massa umpan masuk, komposisi massa, koefisien termal panas tiap komponen bahan, dan suhu bahan di unit RKC 3 pada Tuban 3 adalah sebagai berikut :

A. Data Primer

Data ini diperoleh dari Laboratorium Pengendalian Proses, dan Laboratorium Jaminan Mutu pada tanggal 15 Agustus 2021 pada pukul 08.00 WIB di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk Pabrik Tuban, yang meliputi :

2. Data Umpan Kiln

Data umpan kiln diperoleh dari data harian unit RKC 3.

Tabel II. 4 Data umpan Kiln

| Komposisi | Kapasitas (Kg) |
|---|-----------------------|
| Umpan kiln masuk Suspension Pre-Heater | 520840 |
| Kebutuhan batu bara di Suspension Pre- Heater | 30000 |
| Kebutuhan batu bara di kiln | 20000 |

3. Komposisi Batu Bara

Data komposisi batu bara diperoleh dari laboratorium batu bara yang dianalisa menggunakan metode pengujian XRF (X-Ray Fluorescence).

Tabel II. 5 Komposisi Batu Bara

| Komposisi | % Berat |
|------------------|----------------|
| C | 47.1200 |
| H ₂ | 3.4300 |
| N ₂ | 0.5500 |
| O ₂ | 19.8800 |
| S | 0.1900 |
| H ₂ O | 20.2900 |
| Ash | 8.5400 |
| Total | 100 |

4. Komposisi umpan masuk suspension preheater

Data komposisi umpan masuk diperoleh dari laoratorium bahan baku yang dianalisa menggunakan metode pengujian XRF (X-Ray Fluorescence).

Tabel II. 6 Komposisi Umpan Masuk Preheater

| Komposisi | % Massa |
|--------------------------------|----------------|
| SiO ₂ | 12,0200 |
| Al ₂ O ₃ | 3,6500 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,0300 |
| CaCO ₃ | 78,7500 |
| MgCO ₃ | 2,7090 |
| H ₂ O | 0,2600 |
| Impuritas | 0,5810 |

5. Efisiensi cyclone = 90%

6. Efisiensi pemisahan EP = 99,90%

7. Debu yang ditarik fan ke EP = 10%

8. Data di tiap alat :

1) Suspension Preheater

- a) Derajat calsinasi CaCO_3 dan MgCO_3 : 95,56 %
- b) NHV batu bara : 4.200 kcal/kg
- c) Debu keluar 10 % dari umpan kering

2) Kiln

- a) Derajat kesempurnaan reaksi pembakaran : 100 %
- b) Suhu gas hasil pembakaran dari kiln : 886 °C
- c) Suhu udara tersier : 921 °C
- d) Suhu batu bara : 54 °C
- e) Suhu produk keluar suspension preheater : 877 °C
- f) Suhu dust lost keluar suspension preheater : 394 °C
- g) Suhu gas hasil pembakaran di suspension pre heater : 37 °C
- h) Udara pembakaran excess 2 %
- i) Derajat kesempurnaan reaksi pembakaran 100 %
- j) Suhu H_2O dalam batu bara : 54 °C
- k) Suhu udara sekunder : 921 °C
- l) Suhu udara primer : 35 °C
- m) Suhu CO_2 hasil calsinasi : 882 °C
- n) Suhu gas hasil pembakaran kiln : 984 °C
- o) Suhu klinker panas keluar kiln : 1058 °C

3) *Clinker Cooler*

- a) Suhu udara pendingin masuk cooler : 33 °C
- b) Suhu udara sekunder keluar cooler : 921 °C
- c) Suhu udara tersier keluar cooler : 921 °C
- d) Suhu debu keluar cooler : 222 °C

- e) Suhu udara panas : 341 °C
- f) Suhu klinker dingin keluar cooler : 80 °C

B. Data Sekunder

Data ini diperoleh dari literatur-literatur atau studi pustaka, meliputi :

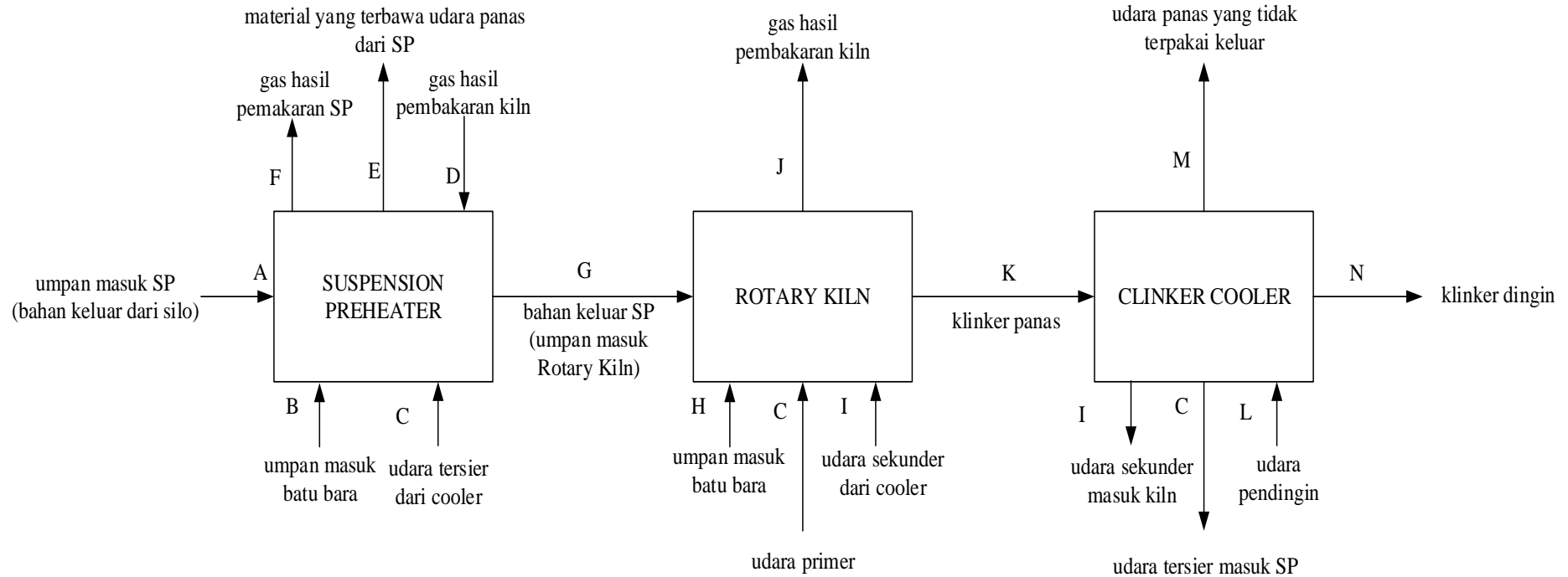
- a. Data panas jenis (specific heat) klinker ataupun udara
- b. Data massa jenis udara
- c. Data berat molekul beberapa komponen

C. Asumsi

- a. Udara sebagai gas ideal
- b. Pembakaran berlangsung secara sempurna
- c. Udara pembakaran 10 % excess
- d. Kebutuhan udara primer maks 10% udara yang dibutuhkan
- e. Basis perhitungan 1 jam

A. II.2.2.1 Perhitungan Neraca Massa pada Sistem Kiln Seksi Operasi RKC Tuban III

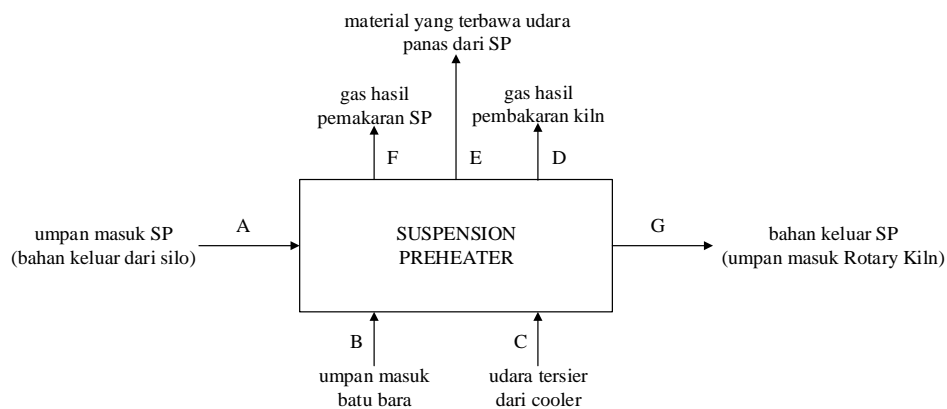
Diagram alir neraca massa pada system kiln dalam Seksi Operasi RKC Tuban III secara keseluruhan seperti dibawah ini:



Gambar II. 1 Diagram Alir Neraca Massa di Sistem Kiln

Unit kiln merupakan suatu unit dimana terjadi proses pembakaran *kiln feed* berupa campuran *limestone*, tanah liat, pasir silika dan pasir besi menjadi klinker. Unit kiln terdiri dari *suspension preheater*, *rotary kiln*, dan *clinker cooler*. Setelah mengalami proses pre homogenisasi, material dari raw mill akan menuju ke kiln feed bin untuk dilakukan pemanasan awal oleh alat yang dinamakan suspension pre-heater. Bahan baku dari blending silo dibawa dengan menggunakan air slide masuk ke dalam preheater. Terdapat dua jalur aliran preheater yang masing-masing terdiri dari empat tingkat siklon seri dan sebuah flash calciner. Gas panas yang dihasilkan untuk siklon dan calciner adalah dari kiln dan udara yang keluar dari cooler sebagai pemasok udara panas untuk siklon dan kalsiner. Setelah melalui preheater dan calciner, umpan masuk kedalam kiln untuk dilakukan proses pembakaran menjadi klinker panas. Bahan bakar yang digunakan untuk proses pembakaran adalah batu bara dan *Industrial Diesel Oil (IDO)*. Setelah proses pembentukan klinker dalam kiln selesai, klinker panas didinginkan menggunakan *clinker cooler* dengan bantuan udara pendingin.

I. Perhitungan Neraca Massa di Suspension Pre-Heater



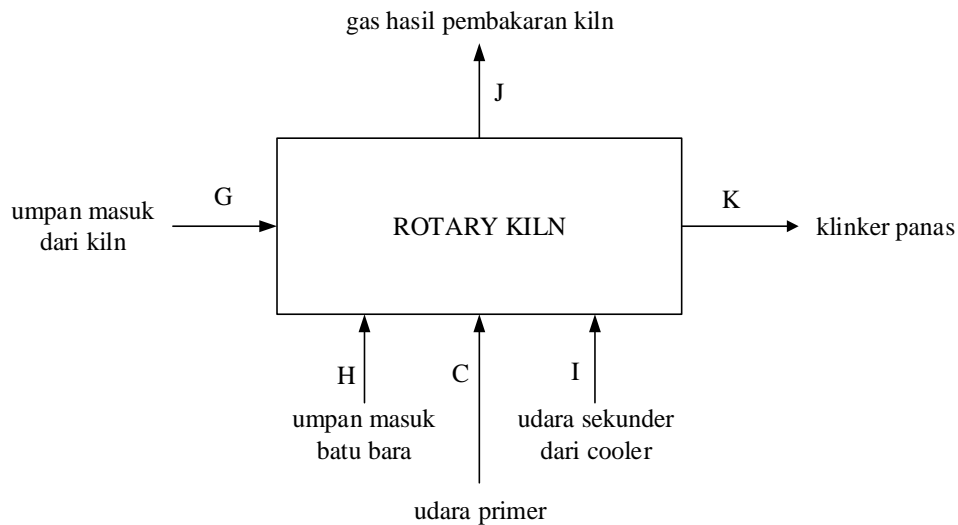
Gambar II. 2 Diagram Alir Neraca Massa Suspension Pre-heater

Campuran material (*raw mill*) masuk melalui bagian atas *Preheater*, sehingga akan terjadi kontak *counter current*. Gas tersebut akan bercampur dengan material dengan temperatur yang relatif dingin, sehingga akan terjadi transfer panas dari gas ke *raw mill*. Sebagian panas dari sistem tersebut akan terbuang bersama gas yang keluar dari *Suspension Preheater*. Perhitungan neraca massa *suspension preheater* sebagai berikut :

Tabel II. 7 Neraca Massa Suspension Pre-Heater

| Komponen | | Input (kg) | Output (kg) |
|--------------|---|--------------------|--------------------|
| A | umpan masuk Suspension Preheater | 520840,0000 | |
| B | umpan masuk batu bara | 30000,0000 | |
| C | udara tersier dari cooler | 196465,9948 | |
| D | gas hasil pembakaran kiln | 183991,4730 | |
| E | gas hasil pembakaran Suspension Preheater | | 567233,8912 |
| F | material yang terbawa udara panas dari Suspension Preheater | | 51949,5816 |
| G | produk keluar Suspension Preheater | | 312115,9922 |
| Total | | 931296,4650 | 931296,4650 |

II. Perhitungan Neraca Massa Rotary Kiln



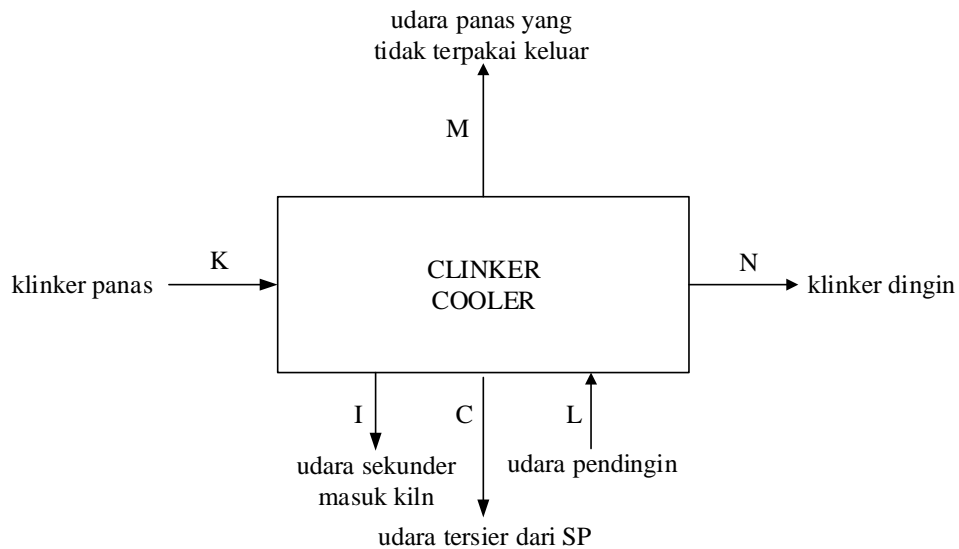
Gambar II. 3 Diagram Alir Neraca Massa Rotary Kiln

Rotary Kiln digunakan untuk membakar umpan kiln menjadi klinker. Sumber panas dalam *Rotary Kiln* dihasilkan dari pembakaran batubara. *Rotary Kiln* terdiri atas empat zona, yaitu zona kalsinasi, zona transisi, zona klinkerisasi (zona pembakaran), dan zona pendinginan. Pada zona kalsinasi terjadi kalsinasi lanjutan dari *Suspension Preheater*, sehingga semua CaCO_3 terurai menjadi CaO . Pada zona klinkerisasi, senyawa-senyawa penyusun semen terbentuk. Proses ini terjadi akibat reaksi antara oksida-oksida penyusun semen, yaitu CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 . Senyawa-senyawa tersebut bereaksi satu sama lain menghasilkan C_2S , C_3S , C_3A , dan C_4AF . Kemudian terbentuk fase cair aluminat dan ferit. Pada zona pendinginan, klinker mengalami penurunan temperatur dan terjadi kristalisasi fase cair. Perhitungan neraca massa di rotary kiln sebagai berikut :

Tabel II. 8 Neraca Massa Rotary Kiln

| Komponen | | Input (Kg) | Output (Kg) |
|--------------|---------------------------|--------------------|--------------------|
| G | Umpan Masuk Kiln | 312114,9922 | |
| H | Umpan Batu Bara | 20000,0000 | |
| C | Udara Primer | 15460,8111 | |
| I | Udara Sekunder | 139147,2997 | |
| J | Gas hasil pembakaran kiln | | 183991,4703 |
| K | Klinker panas | | 302731,6328 |
| Total | | 486723,1030 | 486723,1030 |

III. Perhitungan Neraca Massa *Clinker Cooler*



Gambar II. 4 Diagram Alir neraca Massa Clinker Cooler

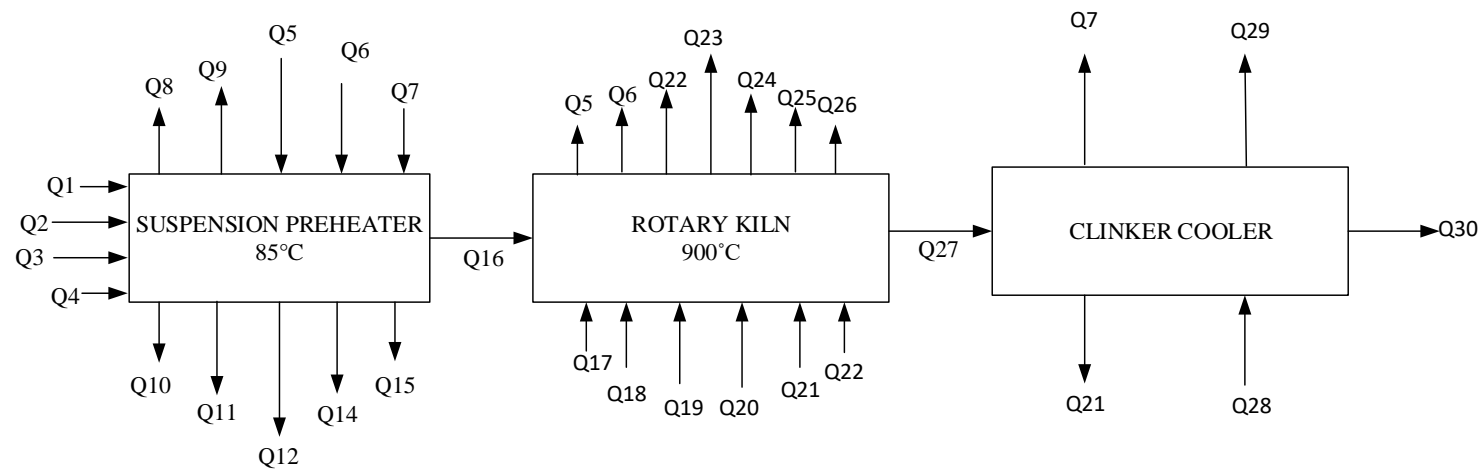
Klinker panas yang keluar dari rotary kiln akan masuk ke *clinker cooler* untuk didinginkan. Proses pendinginan ini menggunakan bantuan udara pendingin. Perhitungan neraca massa di *clinker cooler* sebagai berikut :

Tabel II. 9 Neraca Massa Klinker Cooler

| Komponen | | Input (kg) | Output (kg) |
|--------------|--|--------------------|--------------------|
| K | Umpan masuk cooler | 302731,6328 | |
| L | Udara luar | 647845,6941 | |
| I | Udara sekunder masuk kiln | | 139147.2997 |
| C | Udara tersier masuk Suspension Preheater | | 196464.9948 |
| M | Udara panas yang tidak terpakai keluar | | 312233.3996 |
| N | Klinker Dingin | | 302731.6328 |
| Total | | 950577.3269 | 950577.3269 |

B. II.2.2.2 Perhitungan Neraca Panas pada Sistem Kiln

Berikut diagram alir neraca panas pada system kiln secara keseluruhan:



Keterangan:

Q1 = panas yang dibawa umpan masuk SP

Q2 = panas batu bara masuk SP

Q3 = panas H₂O dalam umpan

Q4 = panas H₂O dalam batu bara

Q5 = panas dari Gas Hasil Pembakaran dari kiln

Q6 = panas dari CO₂ hasil kalsinasi di kiln

Q7 = panas yang dibawa udara tersier

Q8 = panas GHP di SP

Q9 = panas yang dibawa debu keluar SP

Q10= panas CO₂ hasil kalsinasi

Q11= panas dari reaksi disosiasi CaCO₃ dan MgCO₃

Q12= panas penguapan H₂O dalam umpan batu bara

Q14= panas yang dibawa N₂ dari batu bara

Q15= panas yang hilang

Q16= panas produk keluar SP

Q17= panas dari batu bara

Q18= panas sensible batu bara

Q19= panas H₂O dalam batu bar

Q20= panas yang dibawa udara primer

Q21= panas yang dibawa udara sekunder

Q22= panas dari reaksi disosiasi CaCO₃ dan MgCO₃

Q23= Panas yang dibawa H₂O menguap dalam batu bara

Q24= Panas O₂ sisa pembakaran di kiln

Q25= Panas yang dibawa N₂ dari batubara

Q26= Heat Loss

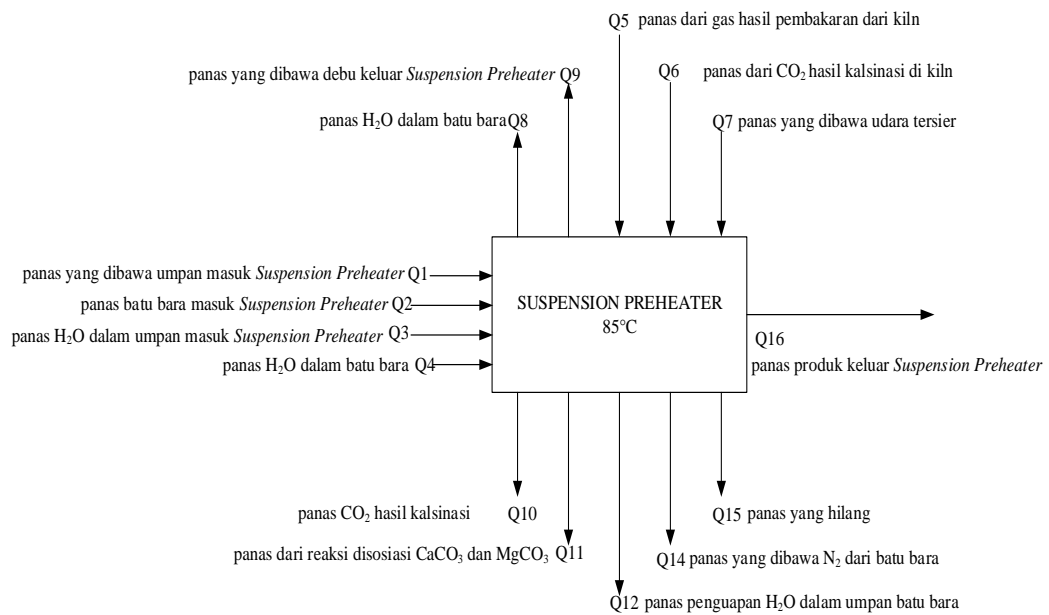
Q27= panas yang dibawa klinker panas

Q28= panas yang dibawa udara pendingin

Q29= heat loss

Q30= panas yang dibawa klinker dingin

I. *Suspension Preheater*



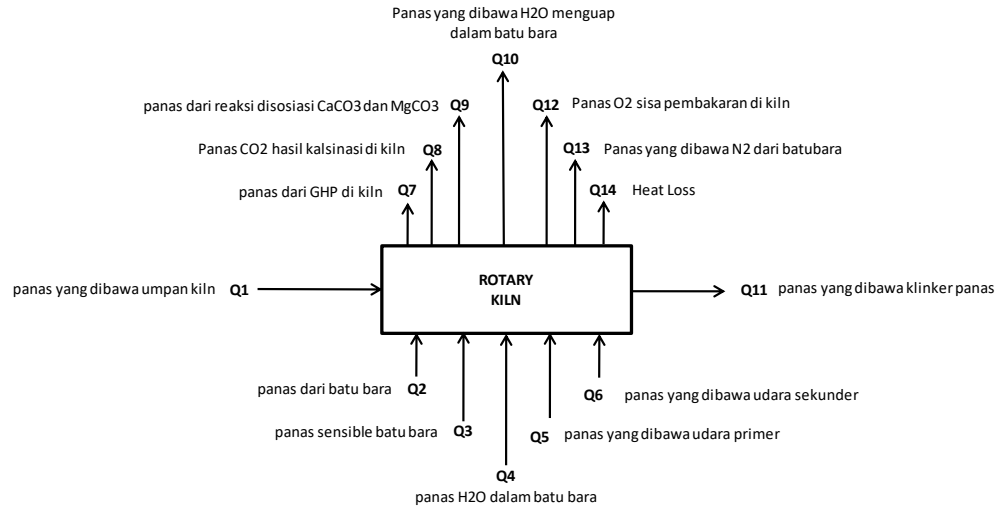
Gambar II. 5 Diagram Alir Neraca Panas *Suspension Preheater*

Umpan dari proses Raw Mill masuk ke *suspension preheater* untuk dilakukan proses kalsinasi dengan melakukan pemanasan yang berasal dari gas buang pada kiln dan *clinker cooler* yang dialirkan melalui pipa bertekanan. Perhitungan neraca panas di *suspension preheater* seagai berikut :

Tabel II. 10 Neraca Panas Suspension Preheater

| Keterangan | input (kcal) | output (kcal) |
|--|-----------------------|-----------------------|
| (Q ₁) panas yang dibawa umpan masuk Suspension Preheater | 6468832,800 | |
| (Q ₂) panas batu bara masuk Suspension Preheater | 120499500 | |
| (Q ₃) panas H ₂ O dalam umpan masuk Suspension Preheater | 17727,6227 | |
| (Q ₄) panas H ₂ O dalam batu bara | 66561,3450 | |
| (Q ₅) panas dari GHP dari kiln | 35375385,1717 | |
| (Q ₆) panas dari CO ₂ hasil kalsinasi di kiln | 2662758,1242 | |
| (Q ₇) panas yang dibawa udara tersier | 43221512,9876 | |
| (Q ₈) panas GHP di Suspension Preheater | | 16835422,0729 |
| (Q ₉) panas yang dibawa debu keluar Suspension Preheater | | 3500035,6853 |
| (Q ₁₀) panas CO ₂ hasil kalsinasi | | 13299113,5061 |
| (Q ₁₁) panas dari reaksi disosiasi CaCO ₃ dan MgCO ₃ | | 9797937,7650 |
| (Q ₁₂) panas penguapan H ₂ O dalam umpan batu bara | | 214566,7500 |
| (Q ₁₄) panas yang dibawa N ₂ dari batu bara | | 12681,9000 |
| (Q ₁₅) heat loss | | 101761349,4381 |
| (Q ₁₆) panas produk keluar Suspension Preheater | | 62891170,9339 |
| Total | 208312278,0513 | 208312278,0513 |

II. Rotary Kiln



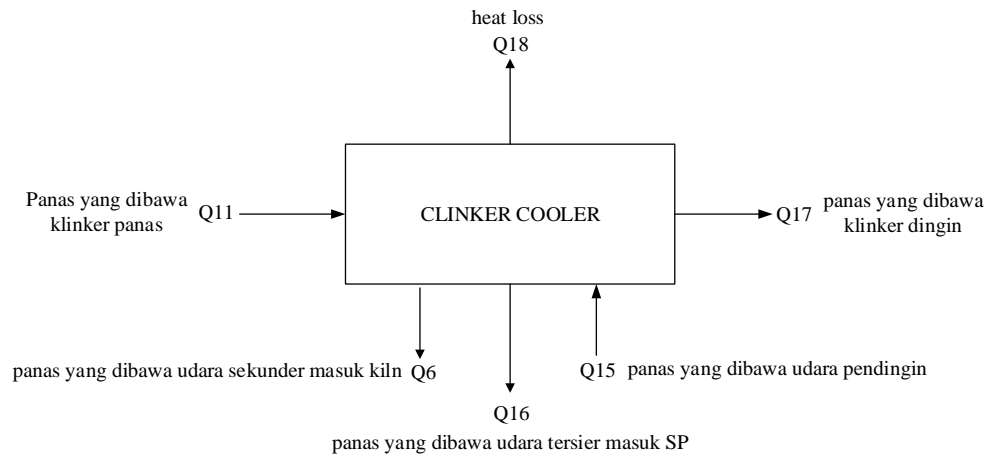
Gambar II. 6 Diagram Alir Neraca Panas Rotary Kiln

Umpan kiln dari preheater akan masuk ke rotary kiln. Karena pengaruh kemiringan dan gaya putar kiln, maka umpan kiln akan bergerak perlahan disepanjang kiln. Dari arah yang berlawanan gas panas hasil pembakaran batu bara dihembuskan oleh burner. Sehingga terjadi kontak panas dan perpindahan panas antara umpan kiln dengan gas panas. Pembakaran akan terus berlangsung sampai terbentuk klinker dan akan keluar menuju *Clinker cooler*. Perhitungan neraca panas rotary kiln sebagai berikut :

Tabel II. 17 Neraca Panas Rotary Kiln

| Keterangan | input (kcal) | output (kcal) |
|--|-----------------------|-----------------------|
| (Q ₁₆)Panas yang dibawa umpan masuk kiln | 66090349,6042 | |
| (Q ₁₇) Panas dari batu bara | 262800 | |
| (Q ₁₈) Panas sensible batu bara | 80070200 | |
| (Q ₁₉) panas H ₂ O dalam batu bara | 85826,7000 | |
| (Q ₂₀) panas yang dibawa udara primer | 18514,3213 | |
| (Q ₂₁) panas yang dibawa udara sekunder | 33405787,9789 | |
| (Q ₅) panas dari GHP kiln | | 35375385,1717 |
| (Q ₆) Panas CO ₂ hasil kalsinasi di kiln | | 2662758,1242 |
| (Q ₂₂) panas dari reaksi disosiasi CaCO ₃ dan MgCO ₃ | | 9797937,7650 |
| (Q ₂₃) Panas yang dibawa H ₂ O menguap dalam batu bara | | 2330306,5000 |
| (Q ₂₄) Panas O ₂ sisa pembakaran di kiln | | 1293333,2357 |
| (Q ₂₅) Panas yang dibawa N ₂ dari batubara | | 27723429,7005 |
| (Q ₁₃) Panas yang hilang (Heat Loss) | | 28530669,7961 |
| (Q ₁₄) Panas yang dibawa klinker panas | | 72219658,3112 |
| Total | 179933478,6044 | 179933478,6044 |

III. Klinker Cooler



Gambar II. 7 Diagram Alir Neraca Panas Klinker Cooler

Klinker panas yang keluar dari Rotary Kiln akan didinginkan di dalam *Clinker Cooler*. Pendinginan ini dilakukan secara tiba-tiba menggunakan udara pendingin. Selama proses pendinginan berlangsung, panas yang keluar akan digunakan untuk proses pemanasan di suspension preheater dan rotary kiln. Perhitungan neraca panas *clinker cooler* sebagai berikut :

Tabel II. 12 Neraca Panas Klinker Cooler

| Komponen | input (kcal) | output (kcal) |
|--|---------------|---------------|
| (Q ₂₇) Panas yang dibawa klinker panas | 72219658,3112 | |
| (Q ₂₈) Panas yang dibawa udara pendingin | 4312060,9400 | |
| (Q ₇) Panas yang dibawa udara tersier | | 37303790,8804 |
| (Q ₂₁) Panas yang dibawa udara sekunder | | 29761520,1994 |
| (Q ₂₉) Panas yang hilang (Heat Loss) | | 6286212,3692 |
| (Q ₃₀) Panas yang dibawa klinker dingin | | 3180195,8021 |
| Total | 76531719,2512 | 76531719,2512 |

Kesimpulan tugas khusus :

Setelah dilakukan perhitungan pada tugas khusus yaitu perhitungan neraca massa dan panas di system kiln Unit RKC 3 PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk.

Pabrik Tuban, didapatkan hasil input=output (balance) pada tiap alat di system kiln. Dari hasil perhitungan tersebut maka dapat disimpulkan bahwa pada tanggal 15 Agustus 2021 pukul 08.00 WIB tidak ada pemborosan bahan bakar dan energi serta tidak ada masalah kinerja di system kiln.