

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang semakin pesat di era globalisasi membuat kebutuhan akan penggunaan material logam semakin meningkat itu sebabnya industri pengecoran logam berupaya meningkatkan produksi sehingga kebutuhan pasar terpenuhi. Dalam upaya meningkatkan produksi, industri pengecoran logam dibutuhkan teknologi yang mampu mendukung untuk menghasilkan produksi yang lebih besar. Komponen penting dalam proses peleburan logam salah satunya yaitu tungku untuk meleburkan bahan baku, kondisi pengoperasian di dalam tungku akan berlangsung pada temperatur yang sangat tinggi oleh sebab itu dibutuhkan bahan isolator sebagai pelapis dari material tungku. Bahan isolasi yang bertahan pada temperatur tinggi guna melapisi tungku sering disebut dengan bata tahan api atau material refraktori. Sehingga permintaan terhadap refraktori mengalami kenaikan dan sulit untuk mendapatkannya. Refraktori tidak hanya digunakan pada tungku industri pengecoran logam akan tetapi digunakan pada industri-industri lainnya untuk melapisi komponen yang beroperasi pada temperatur yang relatif tinggi.

Refraktori yang digunakan untuk *lining* tungku induksi pengecoran logam berfungsi sebagai pelapis agar material tungku tidak rusak dan ikut meleleh pada kondisi operasi. Peranan refraktori dalam industri pengecoran logam sangatlah vital selain penggunaan dalam jumlah yang besar, refraktori mempunyai umur yang terbatas akibat pemakaian pada temperatur tinggi yang berlangsung terus menerus. Akibatnya pada beberapa industri pengecoran dan industri lainnya memerlukan biaya yang besar untuk melakukan perawatan yang intensif. Berdasarkan komposisi kimianya penyusunnya, material refraktori dapat dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu refraktori asam seperti silika (SiO_2), refraktori basa seperti magnesia (MgO), refraktori netral seperti alumina (Al_2O_3) dan refraktori khusus seperti karbon, silikon karbida, zircon dan lainnya. Masing-masing jenis refraktori mempunyai keunggulan yang biasa diaplikasikan dalam industri pengecoran logam.

Hal utama yang perlu sangat diperhatikan disamping prinsip pemanasan dan pencairan pada penggunaan tanur induksi adalah lapisan bahan tahan panas (*lining*) yang berfungsi sebagai isolasi. Kualitas *lining* ini sangat berperan terhadap fungsi, keselamatan kerja, metalurgi peleburan dan efisiensi [3]. Peranan *lining* pada suatu tungku induksi peleburan baja dan besi cor akan memberikan hasil peleburan yang baik dan beroperasinya tungku dipengaruhi oleh *lining* refraktori tersebut. Apabila suatu tungku mengalami masalah dengan *lining* maka otomatis tungku tersebut tidak dapat dioperasikan sehingga berakibat tidak berjalannya operasi pada suatu industri pengecoran logam.

Disamping peranan *lining* yang sangat vital pada beroperasinya peleburan logam, sebuah *lining* tungku induksi mengalami beban-beban yang harus diatasi dan hal ini tidak mudah untuk dikontrol, sehingga diperlukan pengontrolan secara terus menerus. Beban-beban yang harus diatasi oleh *lining* adalah:

- Temperatur tinggi selama proses peleburan.
- Perubahan temperatur dari tinggi ke rendah yang sangat cepat (temperatur *shock*) dan berulang-ulang khususnya ketika bahan baku dimuatkan.
- Tahan terhadap beban pada kondisi perbaikan.
- Gaya-gaya mekanik yang dihasilkan oleh tekanan cairan, benturan bahan baku (*scrap*) dan gesekan baik ketika bahan masih beku ataupun telah mencair.
- Efek-efek metalurgi dari reaksi-reaksi yang berlangsung antara *lining* dengan bahan dan terak cair, unsur-unsur asing serta merusak yang berasal dari bahan baku (Zn, Pb) yang pada temperatur peleburan besi berada dalam keadaan sangat cair sehingga mampu menyusup diantara celah-celah *lining*.

Kebanyakan industri pengecoran logam di Indonesia masih menggunakan material refraktori akan tetapi sedikit sekali yang mengerti tentang komposisi kimia, sifat dan karakteristik dari material refraktori, oleh karena itu kegagalan material refraktori ketika digunakan dalam suatu proses sering ditemukan pada industri pengecoran logam dan dapat berarti suatu bencana bagi industri tersebut sehingga pemborosan biaya tidak dapat dihindari. Suatu *lining* akan mengalami suatu degradasi yang dipengaruhi oleh faktor termal, reaksi kimia, fisik dan mekanik. Oleh karena itu diperlukan suatu karakterisasi *lining* refraktori untuk mengklasifikasikan sifat-sifatnya.

Penelitian ini memiliki tujuan yang akan dilakukan merupakan pembahasan tentang sifat refraktorines dari refraktori yang digunakan untuk *lining* tungku induksi besi cor yaitu refraktori jenis silika. Pengujian-pengujian yang akan dilakukan antara lain Pengujian *Pyrometric Cone Equivalent* (PCE) merupakan metode standar untuk mengevaluasi dimana refraktori mampu menahan sifatnya ditemperatur tinggi dalam situasi tanpa tekanan. *Pyrometric Cone Equivalen* (PCE) tersebut tidak digunakan sebagai indikasi sebuah titik lebur atau pelelehan karena pengujian ini bukan sebuah pengukuran tapi sebuah perbandingan dari perlakuan termal terhadap sampel refraktori yaitu refraktori silika dari stadarnya (*standart cone*). Tujuan yang ingin dicapai yaitu menambah informasi kepada pengguna refraktori pada industri pengolahan logam dan lainnya. Dengan semakin banyaknya penggunaan logam maka kebutuhan refraktori pun akan semakin meningkat, hal ini perlu diimbangi dengan pengetahuan mengenai sifat refraktorines refraktori silika dengan harapan mengurangi kegagalan dalam kondisi operasi serta mengefisiensikan biaya perawatan terhadap tungku peleburannya.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah :

1. Mengetahui sifat temperature pelunakan material refraktori berbahan silika (SiO_2) dengan menguji titik pelunakan specimen uji segel *cone*.

1.3. Pembatasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang terdapat pada penelitian Tugas Sarjana ini adalah:

1. Bahan baku yang digunakan yaitu silika murni (99,2%) yang digunakan pada *lining* tungku induksi pengecoran besi cor
2. Pengujian yang dilakukan adalah menguji sifat pelunakan dengan menguji *Pyrometric Cone Equivalent*
3. Tidak membahas ikatan kimia dan konduktivitas panas dari material refraktori silika.

1.4. Metode Penelitian

Adapun langkah-langkah yang penulis lakukan dalam penelitian tugas sarjana ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Pustaka

Studi pustaka dilakukan untuk mempelajari sifat-sifat dan jenis-jenis refraktori yang diperoleh dari beberapa literatur, baik buku-buku yang berhubungan dengan refraktori, jurnal-jurnal yang diperoleh dari internet, serta laporan Tugas Akhir yang berkaitan dengan tugas sarjana ini.

2. Observasi Lapangan

Dalam hal ini penulis melakukan kunjungan ke Pabrik Pengecoran Logam yang berada di Ceper, Klaten. Observasi dilakukan untuk mengetahui proses peleburan logam menggunakan tungku induksi, material refraktori yang digunakan serta permasalahan yang dialami refraktori selama operasi sehingga informasi tersebut akan berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini.

3. Bimbingan

Melakukan bimbingan dengan dosen pembimbing secara berkala untuk mendiskusikan dan mendapatkan pengetahuan tambahan serta masukan-masukan dalam penyusunan laporan dan Tugas Sarjana tersebut.

4. Pembuatan Spesimen

Pada tahapan ini kegiatan yang dilakukan antara lain :

- a. Persiapan bahan dan alat.
- b. Proses pembentukan spesimen dengan cetakan kerucut.
- c. Proses penyusunan spesimen segitiga
- d. Proses pemanasan dengan *furnace*.
- e. Proses pendinginan

5. Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan meliputi beberapa pengujian berdasarkan tujuan yang diharapkan, diantaranya

- a. Pengujian refraktorines: *Pyrometric Cone Equivalent*.

Pengujian laboratorium ini dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro, dan Balai Besar Keramik (BBK) Bandung.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan Tugas Sarjana yang digunakan adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang hal yang mendasari tugas sarjana ini meliputi tujuan penelitian, batasan penelitian, metodologi yang akan dilakukan dalam melakukan penelitian dan sistematika penulisan laporan Tugas Sarjana.

BAB II DASAR TEORI

Bersisi tentang teori-teori yang mendasari penulisan laporan Tugas Sarjana diantaranya pengenalan tungku induksi, definisi refraktori, jenis-jenis refraktori, sifat-sifat refraktori, refraktori silika (SiO_2), faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan refraktori, fungsi dan kegunaan refraktori dalam industri peleburan logam, sifat-sifat refraktori, faktor penyebab kerusakan pada refraktori dan penjelasan pengujian yang dilakukan.

BAB III METODELOGI PENELITIAN

Berisi mengenai bahan yang digunakan serta metode yang digunakan untuk pembuatan spesimen uji. Menguji *Pyrometric Cone Equivalent* (PCE) untuk mengetahui sifat refraktorines.

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang analisa hasil pengujian sifat refraktorines refraktori yang digunakan untuk *lining* tungku induksi peleburan besi cor.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pengujian yang dilakukan serta pembahasan.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Proses Peleburan Besi

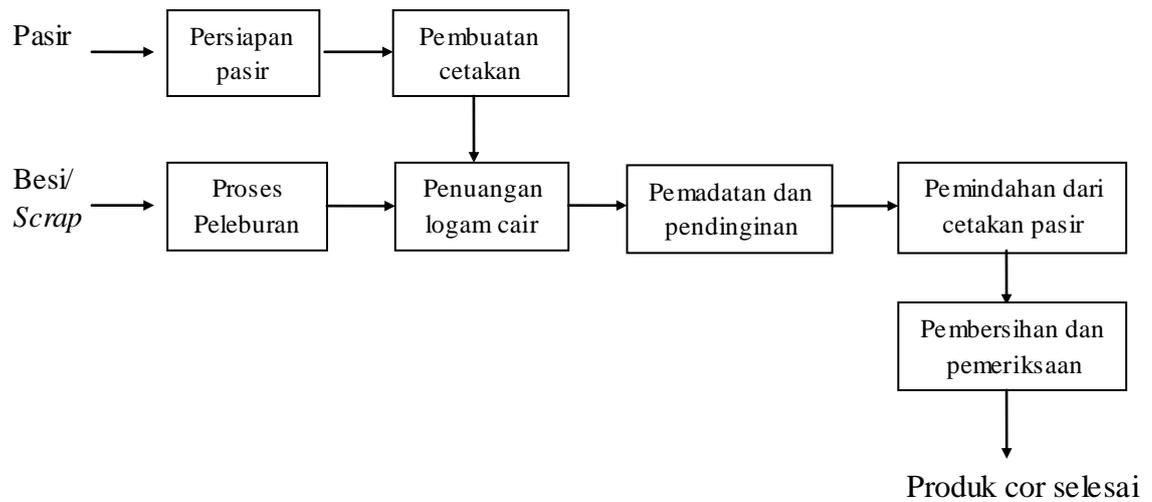
Tahapan awal dalam proses pengecoran besi cor yaitu melakukan proses peleburan bahan baku seperti besi bekas, rongsok, dan besi *scrap* di dalam tungku peleburan pada temperatur yang relatif tinggi. Pada proses peleburan besi cor tungku bekerja pada temperatur ± 1300 °C, dimana pada temperatur tinggi tersebut material bahan baku akan mencair dalam waktu 2 jam.

Sejarah proses pengecoran logam diperkirakan terjadi tahun 4000 SM, sedangkan tahun yang tepat belum diketahui. Di dalam tungku yang dipanaskan akan terbentuk logam cair yang kemudian akan dituangkan ke dalam cetakan atau di cor menjadi bentuk yang sesuai dengan keperluan seperti peralatan rumah tangga, komponen otomotif dan sebagainya. Besi dan baja merupakan logam yang paling banyak digunakan manusia untuk berbagai keperluan.



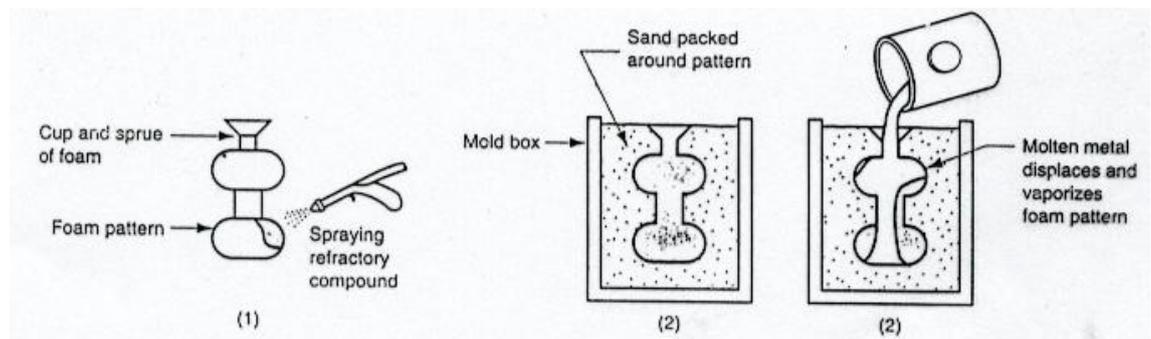
Gambar 2.1. Proses peleburan logam [1]

Di Indonesia masih banyak terdapat proses peleburan logam dengan menggunakan tungku kupola dan tungku induksi serta melakukan proses pengecoran logam dengan menggunakan *sand casting* seperti di daerah Ceper, Klaten. Di bawah ini merupakan alur poses pengecoran dengan menggunakan *sand casting*/cetakan pasir.



Gambar 2.2. Diagram proses pengecoran produk besi cor [2]

Pada industri pengecoran logam di daerah Cepur Klaten penggunaan tungku induksi dengan frekuensi tinggi masih banyak digunakan selain itu pengecoran logam di daerah tersebut masih dengan cetakan pasir (*sand cast*). Pasir yang dipakai merupakan pasir alami yang mengandung lempung, cetakan pasir mudah dibentuk dan tidak mahal dapat membuat benda ukuran kecil sampai dengan ukuran yang besar, serta dapat di produksi dalam jumlah banyak.



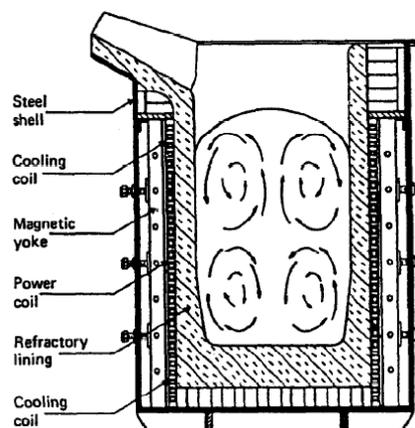
Gambar 2.3. Proses penuangan logam cair ke dalam pola cetakan [2]

Pada saat proses penuangan logam cair ke dalam cetakan pasir, logam cair mengalir melalui pintu cetakan selanjutnya akan mengisi celah-celah sesuai cetakan tersebut oleh karena itu pintu cetakan dibentuk sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran logam cair. Setelah logam cair dituangkan ke dalam cetakan akan terjadi pemadatan dan pendinginan karena proses perpindahan panas dari logam cair

terhadap pasir cetak. Kemudian setelah produk coran membeku dan dikeluarkan dari cetakan biasanya dilakukan beberapa tahapan pekerjaan seperti pemangkasan untuk bagian-bagian yang tidak perlu dibuang dari coran, pembersihan permukaan coran dengan mengamati secara visual, pengukuran dimensi dan pengujian.

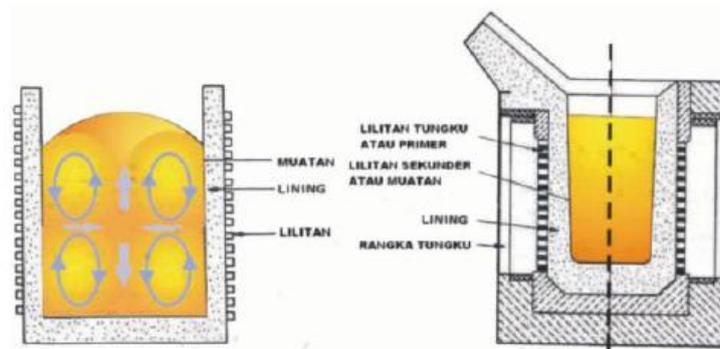
2.2 Tungku Induksi

Definisi tungku induksi (Gambar 2.1) yaitu tungku listrik yang memanfaatkan prinsip induksi untuk memanaskan logam hingga titik leburnya dimana panas yang diterapkan oleh pemanasan induksi medium konduktif (biasanya logam). Frekuensi operasi berkisar dari frekuensi yang digunakan antara 60 Hz sampai dengan 400 kHz bahkan bisa lebih tinggi hal tersebut tergantung dari material yang mencair, kapasitas tungku dan kecepatan pencairan yang diperlukan. Frekuensi medan magnet yang tinggi juga dapat berfungsi untuk mengaduk agar menghomogenkan komposisi logam cair. Tungku induksi banyak digunakan dalam peleburan modern karena sebagai metode peleburan logam yang bersih dari pada peleburan dari tungku *reverberatory* atau kupola. Ukuran tungku berkisar dari satu kilogram kapasitas sampai seratus ton kapasitas dan digunakan untuk meleburkan berbagai jenis logam seperti besi, baja, tembaga, aluminium. Keuntungan menggunakan tungku induksi adalah peleburan yang bersih karena tidak ada kontaminasi dari sumber panas, hemat energi, dan proses peleburan dapat dikontrol dengan baik [3].



Gambar 2.4. Skematik dari tungku induksi (*coreless*) [4]

Gambar 2.4 menunjukkan adanya *power coil* yang berfungsi merubah arus listrik menjadi panas. Jika kawat konduktor itu dibentuk kumparan dan di dekatnya diletakkan materi yang dapat menghantarkan listrik (biasanya logam), maka logam tersebut akan menerima pengaruh garis gaya magnet lalu di dalam logam tersebut akan mengalir arus eddy. Arus eddy ini yang menyebabkan pemanasan logam sehingga logam akan meleleh pada titik leburnya. Keunggulan tungku induksi diantaranya gerakan pengadukan logam cair yang dihasilkan oleh arus induksi yang disebut *stirring*.



Gambar 2.5. Proses pengadukan logam cair di dalam tungku [5]

Tungku induksi menghasilkan panas yang bersih, tanpa pembakaran. Arus listrik bolak-balik dari sebuah tenaga induksi mengalir ke dalam sebuah tungku dan dililitkan sebuah koil yang terbuat dari pipa tembaga. Arus induksi listrik mengalir ke dalam logam tersebut, panas yang dihasilkan tersebut menyebabkan logam akan meleleh secara cepat. Tungku induksi membutuhkan dua sistem elektrikal diantaranya yang pertama, untuk sistem pendinginan, memiringkan tungku serta instrumentasi, dan yang lainnya untuk koil induksi [3].

Keuntungan dari tungku induksi yaitu [3] :

1. Hasil peleburan yang bersih.
2. Mudah dalam mengatur atau mengendalikan temperatur.
3. Komposisi cairan homogen.
4. Efisiensi penggunaan energi panas tinggi.
5. Dapat digunakan untuk melebur berbagai jenis material.

Dalam penggunaan tungku induksi selain prinsip pemanasan dan pencairan logam hal sangat diperhatikan adalah lapisan bahan tahan panas (*lining*) yang berfungsi

sebagai krus. Jenis bahan dinding krusibel (*lining*) yaitu refraktori yang bersifat asam, basa atau netral dengan berbentuk bata api, krusibel, atau monolitik. Material *lining* dengan konduktifitas termal yang tinggi menyebabkan kehilangan panas berlebih dan lamanya waktu *sintering* akan membutuhkan konsumsi energi yang besar untuk pemanasan pertama. Instalasi *lining* yang tidak tepat menyebabkan kegagalan diawal. Oleh karena itu penting untuk melakukan penentuan *lining* untuk mendapatkan hasil yang optimal terhadap konsumsi energi [3].

Data spesifikasi tungku induksi yang digunakan di perusahaan pengecoran logam PT. Suyuti Sido Maju, Ceper, Klaten. Tungku induksi yang digunakan merupakan jenis *coreless* digunakan untuk peleburan besi cor seperti pada Gambar 2.5. Berikut spesifikasi tungku induksi tersebut.

- Jenis tungku : *coreless*
- Tinggi tungku : 75-80 cm
- Diameter dalam tungku : 50 cm
- Arus yang digunakan : 350-400 kVA
- Frekuensi : 50-1000 Hz
- Ketebalan refraktori
 - Sisi samping : 10 cm
 - Sisi bawah : 15-20 cm
- Kapasitas tungku : ± 1000 kg
- Aplikasi : peleburan baja, besi cor, kaca



Gambar 2.6. Tungku induksi PT. Suyuti Sido Maju, Ceper [6]

2.3 Klasifikasi Material Refraktori

Industri modern sekarang memiliki sebuah variasi yang luas dari kondisi pekerjaan dan seperti yang telah diketahui refraktori sering digunakan dalam kondisi yang bertemperatur tinggi. Material refraktori berdasarkan bentuknya dapat dibagi dua yaitu menjadi bata (*shaped*) dan monolitik (*unshaped*). Bentuk-bentuk bata refraktori tersedia dalam banyak bentuk dan ukuran, antara lain: lurus, kecil, kubah, belahan, tabung, dan lain-lain. Sedangkan untuk refraktori monolitik merupakan campuran butiran serbuk mineral (agregat) material refraktori yang kering dengan bahan pengikat (*binder*) baik cair maupun bahan kimia cair lainnya yang berfungsi sebagai pengikat, sehingga diperoleh campuran yang homogen dan bersifat plastis apabila bercampur dengan air dan digunakan segera setelah proses pencampuran dilakukan.

Material refraktori merupakan kategori dari metalurgi keramik yang tersusun dari senyawa antara logam dan non logam. Material refraktori juga merupakan multi-komponen yang terdiri mineral oksida yang stabil pada temperatur tinggi, bahan pengikat, dan zat *additive*. Secara strukturnya refraktori mengandung butiran-butiran kecil dan besar dalam komposisi tertentu serta memiliki ikatan yang kuat dan biasanya terdiri dari multifasa. Kekuatan refraktori dalam penekanan jauh lebih tinggi dari pada tarik (*tension*), tapi kebanyakan material keramik seperti refraktori cenderung getas. Refraktori yang baik diharapkan tidak memiliki pori-pori, bersamaan dengan komposisi fasa, dan porositas merupakan faktor yang sangat penting untuk diperhatikan selama pembuatan produk refraktori. Mengurangi porositas akan meningkatkan kekuatan dan tahanan terhadap korosi. Berdasarkan bentuknya refraktori dapat dibagi ke dalam empat kategori, yaitu [6]:

1. Bata api refraktori (*Refractory Brick*)
2. *Castable*/beton refraktori (*Refractory Castable*)
3. Mortar refraktori (*Refractory Mortars*) dan refraktori *anchor*

Kriteria dalam pemilihan yang harus dimiliki oleh refraktori yang umum digunakan untuk dapur jenis *crucible*, yaitu memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

1. Tidak melebur pada suhu yang relatif tinggi.
2. Sanggup menahan panas lanjutan yang tiba-tiba ketika terjadi pembebanan suhu.

3. Tidak hancur di bawah pengaruh tekanan yang tinggi ketika digunakan pada suhu tinggi.
4. Mempunyai koefisien termal yang rendah sehingga dapat memperkecil panas yang terbuang.

Refraktori dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan :

1. Komposisi kimia penyusunnya, terdiri dari: refraktori asam (MO_2), refraktori netral (M_2O_3), refraktori basa (MO), serta refraktori khusus seperti C, SiC, Borida Karbida, Sulfida dan lainnya.
2. Metode pembentukannya: refraktori yang dibentuk dengan tangan (*hand molded*), refraktori yang dibentuk secara mekanik (tekanan tinggi), refraktori yang dibentuk melalui cetak tuang, dan lainnya. Jenis lainnya adalah refraktori yang berupa serbuk, seperti *castable*, dan *gun mix mortar*.
3. Komposisi mineral penyusunnya, seperti *corundum*, silika, tanah liat *mullite*, magnesite dan lainnya.

2.3.1 Refraktori Basa

Istilah refraktori basa adalah penggolongan refraktori secara umum yang bahan bakunya terbuat dari oksida-oksida yang bersifat basa, atau yang penggunaannya dalam lingkungan kondisi operasi basa. Alasan dari penggunaan refraktori basa, antara lain karena kemampuan operasinya pada temperatur tinggi dan memiliki ketahanan terhadap *slag* basa, tahan terhadap korosi, memiliki kekuatan mekanik yang tinggi. Magnesia (MgO) merupakan unsur yang utama dari kelompok refraktori basa. Oleh karena itu refraktori yang mengandung banyak magnesia termasuk ke dalam kelompok basa, umumnya terdapat jenis-jenis dari refraktori basa yaitu magnesia (MgO), *magnesia-chrome*, *magnesia-spinel*, *magnesia-carbon*, *dolomite*. Penggunaan refraktori basa terdapat pada tungku busur listrik, tungku sembur oksigen, *hot metal car*, dan lain-lain [11].

2.3.2 Refraktori Alumina Tinggi

Refraktori alumina tinggi (Al_2O_3) memiliki kandungan alumina di atas 47,5% hal ini sesuai menurut standar ASTM dan digunakan temperatur operasi mencapai

2050⁰C. Beberapa kelompok refraktori yang lain adalah *mullite*, *alumina-chrome*, *alumina-carbon*. Produk refraktori alumina tinggi dengan kandungan alumina antara 70%-78% dimana fasanya adalah *mullite* termasuk kategori refraktori *mullite* alumina tinggi. Refraktori jenis ini memiliki ketahanan *spalling* yang sangat baik dan ketahanan pembebanan yang tinggi. Selain itu refraktori jenis ini memiliki ketahanan terhadap *slag*/terak dan logam cair yang baik. Penggunaan refraktori alumina biasanya terdapat pada tungku peleburan baja, besi cor, keramik, kaca, *rotary klin*, dan lain-lain [11].

2.3.3 Refraktori Silica

Refraktori silika juga digolongkan ke dalam refraktori kelompok asam, penggolongan ini menurut jumlah dari kemurnian kandungan refraktori silika yang biasa disebut "*flux factor*", dimana kandungan unsur yang lain harus lebih sedikit seperti alumina (Al_2O_3) tidak lebih dari 1,5%, titania (TiO_2) tidak lebih dari 0,2%, besi oksida (FeO_3) tidak lebih dari 2,5% dan semen oksida (CaO) tidak lebih 4%. Nilai rata-rata dari MOR tidak kurang dari 3,45 MPa. Refraktori silika mempunyai temperatur leleh pada (1600⁰C-1725⁰C) dan dapat menahan tekanan yang relatif tinggi karena itu refraktori silika volumenya konstan pada temperatur tinggi, serta mempunyai tahanan *slag* asam yang baik tapi tidak cukup kuat untuk menahan *slag* basa. Beberapa penggunaan batu bata jenis ini, antara lain tungku induksi peleburan besi cor, keramik, atap tungku busur listrik [11].

2.3.4 Refraktori Fireclay High Duty

Refraktori dengan jenis *fireclay* sebagian kandungannya terdiri dari *hydrated aluminosilicates*, tapi dalam jumlah yang sedikit dibandingkan kandungan mineral lain. Salah satu mineral yang digunakan dalam memproduksi *fireclay* adalah *kaolinite* ($2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Refraktori *fireclay* mempunyai temperatur *service* yang maksimum dan nilai *pyrometric cone equivalent* (PCE) yang tinggi. Pada umumnya temperatur leleh dan temperatur *service* meningkat dengan kandungan alumina yang tinggi antara 40%-44%. Kelompok *fireclay* dibagi ke dalam klasifikasi menurut standar ASTM yaitu, *low-duty fireclay* (maks. 870⁰C, PCE 18-28), *medium duty fireclay* (maks.

1315⁰C, PCE 29), *high-duty fireclay* (maks. 1480⁰C-PCE 31), *super-duty fireclay* (maks. 1619⁰C, PCE 33), *semi-silica fireclay* (kandungan silika minimal 72%) [11].

2.4 Refraktori Monolitik

Refraktori monolitik merupakan campuran butiran mineral refraktori yang kering melalui proses pencampuran dengan bahan pengikat (*binder*) sehingga diperoleh campuran yang homogen. Di pasaran refraktori monolitik dapat diperoleh dalam bentuk serbuk, plastis, maupun pasta. Material yang digunakan untuk refraktori monolitik dengan batu bata refraktori tidak ada perbedaan yang signifikan. Pada monolitik tidak semuanya memerlukan proses pembentukan dan pembakaran, kondisi ini dapat menghemat penggunaan energi dan waktu pengerjaan. Sebagai pembanding dinding material yang dilapisi refraktori monolitik akan lebih *solid* dan tidak terdapat sambungan dalam konstruksinya hal ini mengurangi kerusakan pada sambungan [6]. Klasifikasi refraktori monolitik berdasarkan bentuk fisik dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Klasifikasi Refraktori Monolitik Berdasarkan Bentuk Fisik [6]

Bentuk fisik	Jenis refraktori monolitik
Pasta	<i>Mortar, injection refraktori, coating</i>
Plastis	<i>Plastis, ramming, patching</i>
Serbuk	<i>Castable, gunning, trowelling, mortar</i>

Refraktori monolitik tersedia dalam beberapa jenis dan metode instalasinya, adapun cara pemasangannya dapat dilakukan dengan cara penyemprotan (*injecting*), penembakan (*gunning*), di tempelkan (*ramming*), dan di tuangkan ke dalam cetakan (*casting*) atau dibentuk dengan tangan (*hand molded*). Pada refraktori monolitik jenis yang dipakai untuk berbagai keperluan peleburan logam untuk industri yaitu jenis *castable* dan *mortar*.



Gambar 2.7. Produk serbuk refraktori monolitik

2.4.1 Refraktori *Castable*

Refraktori *castable* adalah jenis refraktori monolitik yang pemakaiannya makin meluas dan fleksibel. Refraktori *castable* tersusun dari bahan refraktori berupa agregat atau samot yang ukuran butir dan distribusi butirannya bervariasi dan bahan perekat berupa semen kalsium alumina dengan atau tanpa ditambah aditif. Dalam campurannya dengan air, semen alumina dan *castable* akan mengikat partikel-partikel agregat secara bersama dalam ikatan hidrolis yang mengeras pada suhu ruang membentuk beton refraktori. Adapun sisi lain bahan perekat seringkali memiliki ketahanan api yang lebih rendah, kekuatan mekanisnya lebih lemah dan tidak sangat stabil pada temperatur kerja. Dalam pemakaiannya sekarang, penggunaan semen alumina diminimalisir dengan tujuan agar pengaruh adanya CaO dalam semen dapat dihilangkan, utamanya untuk *castable* temperatur tinggi. Sedangkan *grog* atau butiran kasar umumnya merupakan material yang telah mengalami proses kalsinasi (pemanasan suhu tinggi) dengan baik, memiliki kekerasan yang tinggi, stabilitas volume yang baik hingga suhu servisnya [15].

Pada temperatur ruang, beton refraktori memiliki kekuatan mekanis yang tinggi dan melemah dengan kenaikan temperatur hingga 1000⁰C tetapi meningkat lagi ketika dipanasi hingga temperatur 1100⁰C-1500⁰C [15]. Refraktori *castable* terutama untuk alumina dan alumina-silika (*mullite*) diklasifikasikan berdasarkan kandungan semen alumina (CaO) diantaranya [16]:

- *Medium-Cement Castable Refractories*, kandungan CaO lebih dari 2,5 %.
- *Low-Cement Castable Refractories*, kandungan CaO antara 1% - 2,5%.
- *Ultra-Low Cement Refractories*, kandungan CaO antara 0,2% - 1 %.
- *No-Cement Castable Refractories*, kandungan CaO sampai dengan 0,2%.



Gambar 2.8. Sampel refraktori *castable*

2.4.2 Refraktori Mortar

Refraktori mortar berfungsi untuk mengikat satu bata dengan bata lainnya dan membentuk lapisan penutup pada sambungan. Setiap mortar memiliki sifat sendiri-sendiri, seperti perpaduan, kekuatan, ketidak tembusan, sifat plastis, dan kestabilan isi (*volume stability*). Pemakai harus mengingat akan kecocokan mortar, apakah material refraktori akan tahan terhadap *slag*, logam cair dan kondisi atmosfer yang dihadapinya.

Refraktori mortar harus sedekat mungkin dengan bata refraktori yang akan digunakan, baik dari segi komposisi maupun sifat fisika, kimia dan termal. Contohnya mortar silika harus dipakai untuk bata refraktori silika, dan *fireclay* harus dipakai untuk bata refraktori *fireclay* atau campuran *chrome* dipakai untuk bata refraktori basa. Ada dua jenis pengikatan (*setting*) mortar yaitu *air setting* (udara) dan *heat setting* (panas). Mortar *air setting* akan membentuk suatu ikatan yang kuat tanpa dipanaskan, sedangkan mortar *heat setting* memerlukan pemanasan untuk menghasilkan suatu ikatan. Kedua jenis mortar ini tersedia dalam dua bentuk yaitu bentuk kering maupun basah. Mortar kering mudah disiapkan dengan menambahkan air atau pun bahan pengikat lainnya.

Perubahan temperatur yang cepat akan menyebabkan terdeformasi dan rontoknya (*spalling*) lapisan refraktori. Untuk kondisi operasi yang berat dalam waktu yang lama penggunaan refraktori monolitik lebih menguntungkan. Refraktori monolitik dapat dipakai untuk perbaikan lokal atau daerah tertentu di sekitar kerusakan tanpa merusak daerah di sekitarnya. Biasanya refraktori monolitik memiliki ekspansi termal yang rendah dibandingkan bata refraktori. Pada refraktori monolitik dapat dipilih kombinasi material yang optimal, desain dan karakteristik instalasi sesuai yang diharapkan [6].

2.5 Refraktori Pada Tungku Induksi

Refraktori merupakan salah satu jenis keramik yang memiliki kemampuan untuk mempertahankan kondisinya baik secara fisik maupun kimia pada kondisi temperatur yang relatif tinggi. Karena kemampuan inilah maka bahan refraktori ini umumnya digunakan pada operasi-operasi yang berlangsung pada temperatur relatif tinggi, seperti pada tungku-tungku peleburan logam, cerobong asap, *furnace*. Keramik jenis ini lebih dikenal sebagai material yang tahan api serta tetap stabil pada temperatur yang tinggi.

Maksudnya stabil disini adalah bahwa refraktori tersebut tidak meleleh, tidak terdeformasi, mempunyai perubahan volume yang sangat kecil (baik perubahan volume terhadap penyusutan ataupun pemuaian), tahan terhadap perubahan temperatur yang mendadak serta tahan terhadap korosi baik yang disebabkan oleh *slag*, logam cair maupun gas [6].

Temperatur dan perlakuan pemanasan pada proses *sintering* sangat bergantung dari jenis bahan dan merek *lining* yang digunakan, oleh karena itu sangat disarankan untuk mempelajari terlebih dahulu spesifikasi teknis dari *lining* yang akan digunakan. Secara umum bahan *lining* untuk tungku peleburan terdiri dari 3 jenis yang masing-masing memiliki karakteristik pemakaian yang berbeda, tergantung dari basisitas bahan baku yang membentuknya. Basisitas adalah perbandingan antara mineral yang terbentuk dari oksida-oksida basa umumnya MgO (magnesit) dan Cr₂O₃ (Chromit) dengan mineral yang terbentuk dari Silika (SiO₂) yang bersifat asam dan oksida netral (AlO₂) sebagai berikut.

Kualitas refraktori sangat berperan terhadap fungsi, keselamatan kerja, metalurgi peleburan, dan efisiensi peleburan. Berikut merupakan beban-beban yang harus dapat diatasi oleh refraktori [6].

- Temperatur tinggi selama proses peleburan dan perubahan temperatur dari tinggi ke rendah yang sangat cepat (temperatur *shock*) dan berlangsung terus menerus khususnya ketika bahan baku dimasukkan.
- Gaya-gaya mekanik yang dihasilkan oleh tekanan cairan, benturan dari bahan baku, dan gesekan baik ketika bahan masih beku ataupun telah mencair.
- Efek-efek metalurgi dari reaksi-reaksi yang berlangsung antara refraktori dengan bahan dan terak (*slag*) cair, unsur-unsur asing serta merusak yang berasal dari bahan baku yang pada temperatur peleburan besi/baja berada dalam keadaan sangat cair sehingga mampu menyusup diantara celah-celah refraktori [7].

Ketebalan *lining* tungku induksi berpengaruh pula terhadap efisiensi penggunaan energi listrik karena *lining* yang terlalu tebal menghambat aliran induksi. Dengan demikian *lining* harus dibuat setipis mungkin dengan tetap mempertimbangkan keamanan tungku. Dewasa ini tergantung dari kapasitas muat tungku, ketebalan *lining* adalah antara 80 mm sampai dengan 200 mm. *Lining* tanur induksi terbuat dari bahan

berbentuk serbuk kasar yang kering. Bahan tersebut harus dapat terpasang dengan baik melapisi kumparan bagian dalam. Kekuatan dari bahan *lining* tersebut baru diperoleh setelah bahan mengalami proses *sintering*.



Gambar 2.9. Konstruksi *lining* refraktori tungku induksi [6]

Lining refraktori baru dapat digunakan setelah mengalami proses *sintering*, dimana sebagian dari bahan refraktori (bagian luar) yang semula terurai sebagai serbuk diubah menjadi keramik melalui proses pemanasan pada temperatur tinggi [3]. Degradasi yang terjadi terhadap *lining* dipengaruhi oleh faktor seperti termal, reaksi kimia, fisik dan mekanik. Karena terdapat banyak alasan yang menyebabkan degradasi pada *lining* refraktori maka terdapat banyak cara untuk mengkarakterisasi sebuah refraktori guna mengklasifikasikan sifat dari sebuah material *lining* refraktori. Salah satu yang penting dan banyak digunakan yaitu mengkarakterisasi sifat mekanik dengan metode kuat tekan (*Cold Crushing Strength*) yaitu dengan melakukan penekanan secara *uniaxial* pada temperatur ruang. Pengujian tersebut digunakan sebagai sebuah petunjuk untuk kekuatan mekanik refraktori. Pada dasarnya suatu refraktori yang baik yaitu yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi hal ini dapat diartikan bahwa material tersebut lebih tahan terhadap tegangan mekanik. Namun pada kenyataannya dalam tungku induksi uji kuat tekan dingin tidak selalu menggambarkan performa refraktori tapi temperatur operasi yang akan dikenakan pada refraktori akan jauh lebih tinggi.

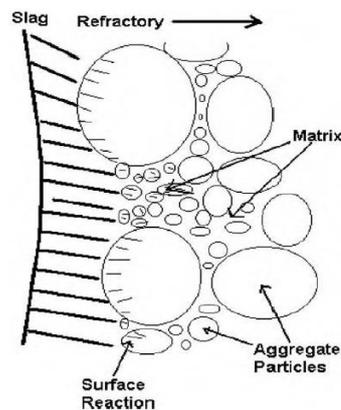
2.6 Kerusakan-kerusakan Pada Refraktori

Kebanyakan kerusakan dari peralatan yang menggunakan refraktori hanya diamati dari kerusakan yang sifatnya besar dan mudah terlihat, seperti refraktori yang rontok, lapisan yang melekok dan sebagainya. Pengamatan yang lebih dalam dan secara

mendetail biasanya dilakukan apabila perlu dan menjelang suatu perbaikan secara total dan menyeluruh. Untuk dapat membuat pemeriksaan yang benar terhadap refraktori perlu suatu pengetahuan tentang penyebab-penyebab kerusakan pada refraktori.

2.6.1 Slagging (Terak)

Slagging merupakan penyebab utama dari kerusakan refraktori. Bilamana *slag* yang terbentuk pada refraktori tetap pada tempatnya, maka *slag* tidak akan menyebabkan kerusakan pada bahan refraktori. Tetapi kenyataannya *slag* tersebut tidak tetap pada tempatnya melainkan terlepas dan keluar membawa beberapa bagian dari bahan refraktori dan memperlihatkan suatu bagian permukaan yang baru untuk serangan *slag* lebih lanjut. Bila *slagging* dan *spalling* telah merusakkan bagian dari refraktori, maka pencegahan yang dapat dilakukan adalah dengan membongkar bagian refraktori yang rusak dan menggantinya dengan bahan refraktori yang baru [6].



Gambar 2.10. Tahapan awal terhadap serangan *slag* [7]

2.6.2 Pengkerutan (*Shrinkage*)

Penyebab yang lain dari kerusakan tungku adalah terjadinya pengkerutan pada bahan refraktori. Bila mana terjadi pengkerutan pada refraktori, maka terjadi perubahan luas/ukuran permukaan bagian yang panas dari pada bagian permukaan yang dingin. Akibat dari pengkerutan ini terbentuk suatu ruangan terbuka di sekeliling bagian refraktori, sehingga bagian permukaan yang ditutupi bahan refraktori menjadi renggang. Kondisi tersebut akan sangat membahayakan karena apabila mendapat serangan *slag* maka konstruksi refraktori tersebut akan rapuh dikarenakan cairan *slag* yang menempel

akan menggerus lapisan-lapisan refraktori. Keadaan yang demikian sangat membahayakan pada desain konstruksi tungku, sehingga harus dilakukan perbaikan secara keseluruhan secepatnya [6].

2.6.3 Abrasi (*Abbrasion*)

Secara umum kerusakan abrasi/pengikisan pada bahan refraktori disebabkan oleh gesekan dan dampak. Tetapi pada kenyataannya kerusakan pada refraktori akibat abrasi ditimbulkan oleh beberapa faktor, seperti partikel debu dan gas di dalam tungku pada temperatur tinggi. Metode untuk menguji ketahanan abrasi dari suatu bahan refraktori dapat dilakukan pengujian *rattle test*, *sand blast test*, *scratch test*, maupun *rotating disk test*. Biasanya *hardness test* dilakukan untuk mengetahui hubungan antara ketahanan abrasi dengan kekerasan bahan refraktori [6].

2.6.4 Retakan (*Crack*)

Sebelum dilakukan pemanasan atau pembakaran refraktori terlihat sempurna, tetapi sebenarnya mengandung bahan-bahan yang dapat rusak bila mengalami pemanasan. Bentuk retakan yang terjadi dapat berupa retakan radial yang diikuti oleh retakan miring pada bagian bahan refraktori. Bila mana hal ini terjadi, maka bagian refraktori cenderung untuk lepas. Kerusakan seperti ini dapat diperbaiki dengan membersihkan semua retakan, melepas lapisannya, dan menambalnya dengan suatu campuran refraktori plastis/mortar. Retakan akibat pembakaran juga dapat disebabkan penambahan air yang terlalu banyak saat pencampuran bahan refraktori [6].



Gambar 2.11. Retakan yang terjadi pada refraktori [6]

2.7 Faktor-faktor yang Berpengaruh pada Kekuatan Refraktori

Faktor-faktor berikut yaitu parameter yang mempengaruhi kekuatan refraktori, diantaranya [7]:

Komposisi kimia atau mineral bahan

Pada keadaan bahan mentah atau kering, komposisi kimia tidak sepenting bila dibandingkan saat benda dibakar. Pada temperatur rendah/kamar reaksi mungkin tidak terjadi, tapi pada kondisi temperatur tinggi reaksi kimia terjadi dan memegang peranan penting.

1) Sifat fisik bahan

Sifat fisik meliputi ukuran bentuk, tekstur permukaan, porositas, koefisien ekspansi termal (memuai dan menyusut), dan daya adesi ikatannya. Semakin besar benda biasanya memiliki kekuatan desakan yang semakin baik. Bila ada bagian yang bengkok atau retak akan menjadi pusat konsentrasi tegangan.

2) Cara penyiapan pembuatan bahan

Cara penyiapan harus dimulai dari penentuan, distribusi dan ukuran butir/partikel, penggunaan jumlah dan perbandingan bahan tambahan *binder* (air, resin, dan lain-lain) yang ditambahkan, proses pencampuran, dan lamanya waktu penyimpanan.

3) Cara pembuatan

Cara pembentukan akan mempengaruhi kekuatan bahan yang dihasilkan. Benda yang dicetak dengan menggunakan mesin umumnya lebih kuat dibandingkan dengan pencetakan manual. Benda yang dibuat dengan proses penekanan kekuatannya bergantung pada kuat tekan dan arah penekanannya.

4) Kondisi pengeringan

Pengeringan yang baik dilakukan dengan laju pengeringan yang lambat. Hal ini dimaksudkan agar uap air dapat keluar dengan kecepatan yang merata pada seluruh benda tanpa menimbulkan retakan pada bahan.

5) Kondisi pemanasan atau pembakaran

Benda yang dibakar umumnya akan lebih kuat dibandingkan benda yang dikeringkan saja. Hal ini tergantung pada sifat dan jumlah bahan pengikat yang

dihasilkan selama pemanasan, partikel yang membentuk agregat oleh ikatannya, temperatur dan lamanya waktu pembakaran.

6) Temperatur pemakaian

Prosedur yang harus diketahui bahwa setiap refraktori memiliki jenis dan kegunaannya, maka sebelum menggunakan sebaiknya perlu diketahui batas temperatur suatu refraktori agar menghindari tingkat kesalahan yang fatal.

7) Kondisi lingkungan

Kondisi iklim, perubahan temperatur yang mendadak, dan pemanasan yang lama. Bahan refraktori yang disimpan terlalu lama akan rusak, karena dipengaruhi oleh keadaan cuaca disekitarnya. Perubahan temperatur yang mendadak pada suatu bahan dapat mengakibatkan bahan tersebut pecah. Kondisi tersebut dapat terlihat saat bahan mengalami perubahan kimia dan fisika selama proses pemanasan dan pendinginan yang berulang-ulang (*termal shock*).

2.8 Karakteristik Refraktori

2.8.1 Karakteristik Sifat Kimia Refraktori

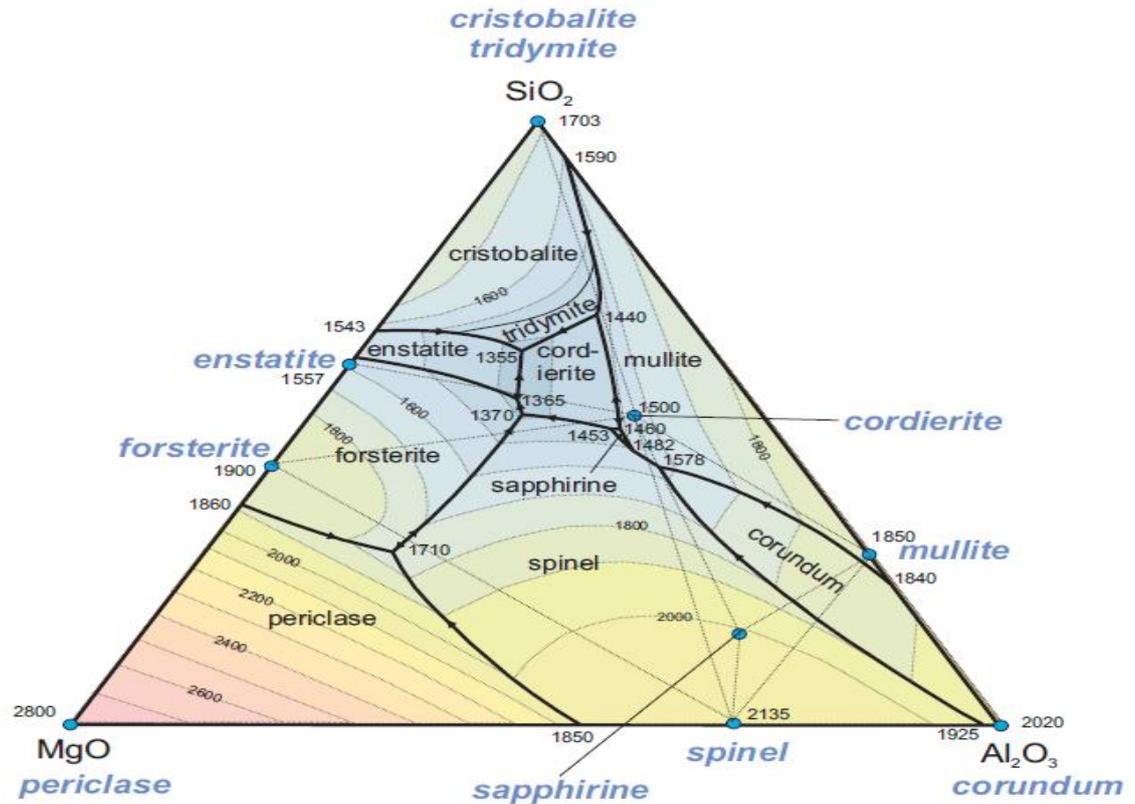
Komposisi senyawa dalam sebuah refraktori sebagaimana yang telah diketahui, refraktori dikelompokkan menjadi refraktori asam, netral, dan basa. Kelompok refraktori tersebut didasarkan pada senyawa komposisi senyawa kimia atau kemampuan dari refraktori untuk mempertahankan kondisinya dari reaksi logam cair, *slag* yang bertemperatur tinggi.

Refraktori jenis asam seperti refraktori silika biasa digunakan pada lingkungan operasi yang bersifat asam. Refraktori jenis basa terdiri dari magnesita dan *dolomite* dan paling sering digunakan pada terak di dalam tungku akan tetapi refraktori akan bersifat netral ketika tidak bereaksi di lingkungan asam atau basa. Sifat kimia sebuah material refraktori ditentukan oleh komposisi kimia refraktori tersebut terlihat pada Tabel 2.1. Ketika refraktori diekspose terhadap cairan yang korosif ditemperatur tinggi luasan korosi/erosi bergantung pada butiran refraktori dan ikatan kimia dari refraktori tersebut.

Tabel 2.2. Kandungan Komposisi Kimia Refraktori [9]

Refractory Type	Composition (wt%)							Apparent Porosity
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	
Fireclay	25-45	70-50	0-1		0-1	0-1	1-2	10-25%
High-Alumina	90-50	10-45	0-1		0-1	0-1	1-4	18-25%
Silica	0.2	96.3	0,6			2,2		25%
Periclase	1,0	3,0	90,0	0,3	3,0	2,5		22%
Periclase-Chrome	9,0	5,0	73,0	8,2	2,0	2,2		21%

Dari Tabel 2.2. telah dicantumkan klasifikasi refraktori dan komposisinya, yaitu *fireclay*, *silica*, *basic*, dan *special*. Kebanyakan material terdiri dari bahan-bahan yang kasar diantaranya butiran kasar dan butiran halus, dimana memiliki komposisi yang berbeda. Selama kondisi pemanasan, terjadi proses pemadatan meliputi bentuk fasa hal itu akan mempengaruhi kekuatan dari refraktori [10].

Gambar 2.12. Diagram fasa ternary sistem MgO-Al₂O₃-SiO₂ [7]

Gambar 2.12 menunjukkan sebuah diagram fasa sebagai fungsi dari komposisi dan temperatur untuk sistem tiga komponen yaitu MgO, Al₂O₃, dan SiO₂. Pada dasarnya diagram fasa di atas menunjukkan hubungan temperatur leleh dalam sebuah sistem senyawa kimia. Kegunaan dari diagram fasa tersebut dapat mengidentifikasi kandungan dan fasa yang terjadi, serta mengetahui temperatur leleh dari sebuah komposisi kimia suatu material seperti refraktori, komposisi kaca, dan keramik lainnya. Secara keseluruhan *ternary diagram* atau biasa disebut *the gibbs triangle* hanya menampilkan konsentrasi tiap tiga komponen, jumlah konsentrasi dari tiga komponen harus berjumlah 100% serta komponen yang murni dengan kandungan $\pm 100\%$ terletak di tiap sudutnya. Contoh, untuk kandungan SiO₂ 28% wt, Al₂O₃ 70% wt, dan MgO 2%, maka komposisi tiga komponen tersebut berada di daerah *mullite* (3Al₂O₃ 2SiO₂) dengan temperatur leleh berada pada kisaran 1850⁰C.

2.8.2 Karakteristik Sifat Fisik dan Mekanik Refraktori

Karakterisasi sifat fisik yang dimiliki material refraktori antara lain: struktur mikro, sifat mekanik, tekstur, sifat termal, dan sifat kimia. Parameter lain yang cukup penting dan saling berkaitan satu sama lain, yaitu: porositas, densitas, kekuatan tekan, refraktorines, dan konduktivitas panas. Seperti umumnya material refraktori memiliki porositas tertentu sehingga menyebabkan refraktori memiliki kekuatan dan konduktivitas panas yang berbeda.

Dalam masing-masing kelompok refraktori memiliki perbedaan dalam tingkat ketahanan, dan dalam hal ini mekanisme untuk memperbaiki mutu refraktori dalam pemakaian dengan cara memilih bahan baku yang tepat, kualitas yang seragam, metode yang tepat dalam pembuatan, serta menggunakan teknologi yang tepat. Pada umumnya data yang dicantumkan pihak produsen berupa densitas, porositas, refraktorines, dan sifat mekanik, tetapi belum cukup untuk memberikan deskripsi tentang ketahanan suatu bahan refraktori dalam kondisi aplikasinya.

Selain itu untuk mengetahui kekuatan dari refraktori para peneliti telah melakukan riset tentang sifat mekanik refraktori diantaranya *Cold Crushing Strength* (CCS) dan *Modulus of Rapture* (MOR). Sifat-sifat ini penting untuk mendapatkan refraktori dengan rekomendasi yang baik. Densitas dan porositas berkaitan dengan

katahanan tekan, dan aksi abrasi. Porositas terbentuk selama proses *sintering* akibat gas yang terperangkap serta penyebaran fasa cair yang meleleh tidak merata saat *sintering*. Semakin tinggi densitas dan porositas yang rendah akan sangat baik dalam instalasi konstruksi. CCS merupakan pengujian kuat tekan pada kondisi dingin dan berkaitan dengan waktu penyimpanan konstruksi. Sedangkan MOR atau sering disebut uji kuat lentur merupakan kekuatan suatu refraktori mengatasi beban lentur.

Kekuatan tekan dan porositas merupakan dua sifat refraktori yang sangat mudah ditentukan. Hal ini dapat digunakan sebagai indikator dalam menentukan homogen atau tidaknya bahan dasar yang digunakan dan baik atau tidaknya teknologi yang digunakan dalam proses. Sedangkan densitas dan kekuatan tekan suatu refraktori dapat dijadikan indikator dalam mempertahankan kondisinya terhadap ketahanan tekan, aksi abrasi, dan permeabilitas [9]. Tabel berikut merupakan nilai dari jenis sifat fisik dan mekanik dari beberapa tipe refraktori.

Tabel 2.3. Sifat Fisik dan Mekanik Material Refraktori [7]

Types of brick	Density, lb/ft ³	Apparent porosity	Cold crushing strength, lb/in ²	Modulus of rupture, lb/in ²
Fireclay				
Superduty	144-148	11-14%	1,800-3,000	700-1,000
High-duty	132-136	15-19	4,000-6,000	1,500-2,200
Low-duty	130-136	10-25	2,000-6,000	1,800-2,500
High-Alumina				
60% class	156-160	12-16	7,000-10,000	2,300-3,300
70% class	157-161	15-19	6,000-9,000	1,700-2,400
85% class	176-181	18-22	8,000-13,000	1,600-2,400
90% class	181-185	14-18	9,000-14,000	2,500-3,000
Corundum class	185-190	18-22	7,000-10,000	2,500-3,500
Silica (superduty)	111-115	20-24	4,000-6,000	600-1,000
Basic				
Magnesite, fired	177-181	15.5-19	5,000-8,000	2,600-3,400
Magnesite-chrome, fired	175-179	17-22	4,000-7,000	600-800
Magnesite-chrome, unburned	185-191	–	3,000-5,000	800-1,500
Chrome, fired	195-200	15-19	5,000-8,000	2,500-3,400
Chrome-magnesite, fired	189-194	19-22	3,500-4,500	1,900-2,300
Chrome-magnesite, unburned	200-205	–	4,000-6,000	800-1,500
Magnesite-carbon	170-192	9-13	–	1,000-2,500
Dolomite	165-192	5-20	1,500-3,500	500-2,500
Fused cast				
magnesite-chrome	205-245	1-15	900-1,400	6,000-8,000
Silicon carbide	160-166	13-17	9,000-12,000	3,000-5,000
Zircon	225-232	19.5-23.5	7,000-11,000	2,300-3,300

Dari Tabel 2.3. dapat dilihat beberapa jenis sifat refraktori serta nilai dari bermacam-macam refraktori. Refraktori akan memiliki nilai fisik yang berbeda tergantung dari cara pembuatan, penyimpanan, dan perlakuan. Perlu diadakan sebuah penelitian untuk mengetahui apakah refraktori tersebut telah termasuk dalam nilai-nilai standar yang diberlakukan baik oleh para peneliti atau pun produsen penyedia refraktori.

2.9 Material Refraktori Silika (SiO_2)

Refraktori silika merupakan material keramik yang memiliki peranan yang penting dalam industri saat ini. Refraktori silika juga digolongkan ke dalam refraktori kelompok asam, penggolongan ini menurut jumlah dari kemurnian kandungan refraktori silika yang biasa disebut "*flux factor*", dimana kandungan unsur yang lain harus lebih sedikit seperti alumina (Al_2O_3) tidak lebih dari 1,5%, titania (TiO_2) tidak lebih dari 0,2%, besi oksida (FeO_3) tidak lebih dari 2,5% dan semen oksida (CaO) tidak lebih 4%. Nilai rata-rata dari MOR tidak kurang dari 3,45 MPa. Refraktori silika mempunyai temperatur refraktori silika volumenya konstan pada temperatur tinggi, serta mempunyai tahanan *slag* asam yang baik tapi tidak cukup kuat untuk menahan *slag* basa. Beberapa penggunaan batu bata jenis ini, antara lain tungku induksi peleburan besi cor, keramik, atap tungku busur listrik [11].

Tabel 2.4 Sifat Refraktori Silika [7]

Rumus Molekul	SiO_2
Temperatur Leleh	1650 ⁰ C
Densitas	1,7 gr/cm ³
Konduktivitas Termal	1,2 W/m.K
Kuat Tekan	4000-6000 lb/in ²
Modulus of Rupture	600–1000 lb/in ²

Dari Tabel 2.4 dapat dilihat sifat refraktori silika dengan rumus molekul SiO_2 , temperature leleh 1650⁰C, densitas 1,7 gr/cm³, konduktivitas termal 1,2 W/m.K, kuat tekan 4000-6000 lb/in², modulus of rupture 600-1000 lb/in².

2.7.1 Mineral-mineral Silika

Quartzite atau *Garnister* merupakan bahan baku dari mineral silika yang relatif paling murni dan paling banyak digunakan. Kebutuhan refraktori dari bahan ini menurun secara drastis dengan beralihnya pemakaian beberapa bagian dinding tanur *open hearth* dari refraktori asam ke refraktori basa.

Sandstone atau *firestone* merupakan batuan endapan berupa ikatan antara butiran-butiran pasir dengan kandungan SiO_2 antara 90 - 96% dengan 3 - 5% Al_2O_3 dan sejumlah oksida besi dan kapur. Bahan ini relatif lunak dan mudah dipotong-potong dalam bentuk tertentu dan langsung digunakan sebagai refraktori.

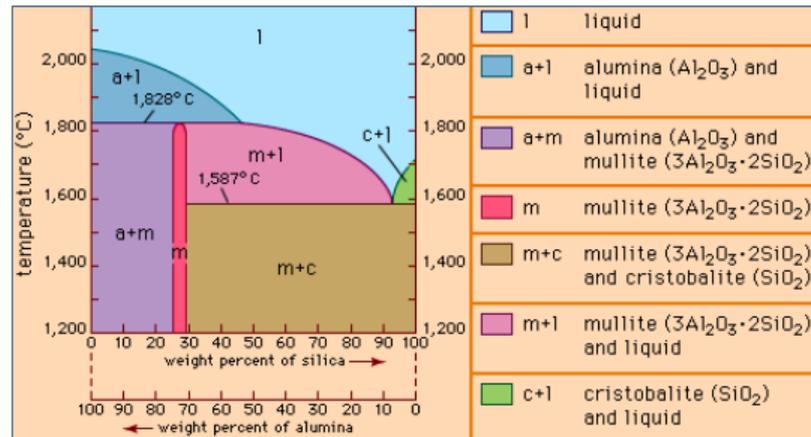
Mica Schist, mempunyai sifat-sifat seperti *sandstone*, hanya kandungan SiO_2 -nya lebih rendah. Saat ini tidak populer digunakan dalam industri besi baja. Lempung api silika, sejenis lempung yang memiliki kandungan silika yang sangat bervariasi dengan kandungan silika minimum 75%. Memiliki kandungan unsur-unsur alkali dan oksida besi relatif rendah. Umum digunakan sebagai bahan pembuatan refraktori semi silika atau mortar [6].

2.7.2 Alumina-Silika (*Mullite*)

Salah satu jenis refraktori silika diantaranya ialah refraktori mullite merupakan kategori refraktori yang spesial karena terbentuk dari dua senyawa yaitu Al_2O_3 - SiO_2 . Mullite adalah salah satu material yang sangat penting dan merupakan sebuah fasa mineral yang utama di dalam produk keramik. Rumus kimia dari mullite yaitu $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ dengan kandungan alumina yang cukup besar yaitu antara 60%-78% dan kandungan silika sekitar 28,4% [12]. Mullite mempunyai titik leleh berada pada temperatur 1850°C , penamaan mullite diberikan karena terjadinya proses *sintering*. Kandungan alumina di dalam mullite akan menentukan banyak faktor seperti temperatur *sintering*, waktu untuk perlakuan pemanasan, ukuran partikel dan lain-lain. Pada dasarnya refraktori alumina tinggi dengan kandungan silika lebih dari 20% akan menurunkan kekuatan refraktori pada temperatur tinggi sebab kandungan silika akan menggerus permukaan alumina.

Diagram fasa pada Gambar 2.13 menunjukkan sebuah komposisi dari kandungan Al_2O_3 dan SiO_2 dalam persen dan temperatur dalam derajat celsius. Mullite

mempunyai kekuatan yang tinggi pada temperatur tinggi, ekspansi termal yang rendah, tahan terhadap *thermal shock*, sifat kimia yang stabil.



Gambar 2.13. Diagram fasa alumina-silika [11]

Pada Gambar 2.13, terjadinya fasa *eutectic* berada pada batas temperatur 1600°C diantara mullite dan corundum. Fasa *eutectic* ini mengandung 77,4% alumina, kebanyakan komposisi mullite yang mengandung lebih dari 71,8% alumina akan berada pada fasa cair ditemperatur 1840°C . Jika komposisi mengandung lebih dari 71,8% akan tetapi masih di bawah 77,4%, fasa *solid* terbentuk pada daerah mullite. Namun jika komposisi mengandung lebih dari 77,4% alumina fasa *solid* akan terbentuk pada daerah corundum dikarenakan kandungan alumina lebih dominan dari pada silika. Dengan demikian apabila temperatur dinaikan di atas 1840°C maka fasa *solid* yang terbentuk (mullite dan corundum) akan melarut menjadi fasa *liquid* sampai terjadinya pencairan kedua kandungan tersebut secara sempurna.

2.10 Sintering

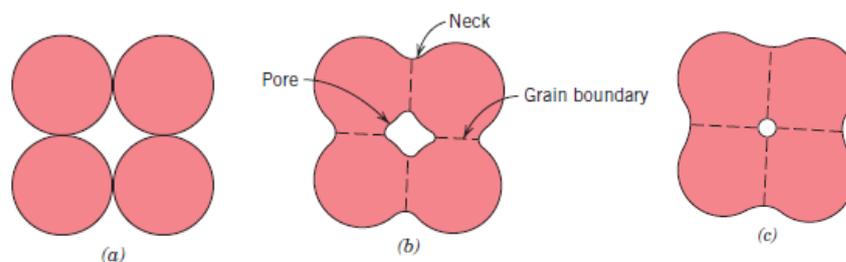
Proses *sintering* bertujuan untuk pengurangan porositas, peningkatan densitas dan sifat mekanik dari bahan keramik sehingga bahan keramik semakin kuat. Perubahan ini terjadi karena penggabungan partikel serbuk ke bentuk yang lebih padat proses ini disebut dengan *sintering* [9]. Dengan melalui *sintering* ini terjadi perubahan struktur mikro seperti pengurangan jumlah dan ukuran pori, pertumbuhan butir (*grain growth*),

peningkatan densitas, dan penyusutan volume (*shrinkage*) akibat proses difusi antar butir. Temperatur yang diberikan pada sebuah material keramik sebaiknya di bawah titik cair bahan tersebut sehingga fasa cair tidak terbentuk, selain itu temperatur pada proses *sintering* sangat tergantung pada jenis bahan keramik yang digunakan karena tiap bahan keramik memiliki titik leleh yang berbeda.

Berikut ini merupakan beberapa faktor yang menentukan mekanisme proses *sintering*, antara lain: jenis bahan material, komposisi utama material, bahan pengotor, dan ukuran butir. Untuk penggunaan partikel yang lebih kecil maka proses *sintering* akan dapat berjalan lebih cepat dibandingkan dengan penggunaan partikel yang lebih besar. Mekanisme pemanasan dimulai dengan adanya kontak antar butir yang dilanjutkan dengan pelebaran titik kontak akibat proses difusi atom-atom. Difusi secara keseluruhan mengakibatkan penyusutan yang diiringi pengurangan porositas akibat pergerakan batas butir. Sebagai akibat dari penyusutan volume pori yang terjadi selama proses *sintering* berlangsung, densitas material meningkat terhadap peningkatan temperatur pemanasan. Secara keseluruhan mekanisme proses *sintering* pada material keramik dapat dilihat pada Gambar 2.14 [9].

Dimana proses *sintering* diantaranya yaitu:

1. Proses pencetakan dengan memberikan penekanan pada serbuk mengakibatkan terjadinya konsolidasi butiran serbuk satu sama lain (Gambar 2.14a).
2. Pada tahap awal *sintering* terjadi kontak antar butir sehingga terjadi lekukan kontak (*neck*) sepanjang daerah kontak antar butir tersebut. Dan setiap celah antar butir yang berkontak akan membentuk pori (Gambar 2.14b).
3. Pada tahap akhir dari *sintering* serta waktu yang dibutuhkan untuk pemanasan terjadi pembesaran ukuran butir sehingga pori-pori akan menjadi lebih kecil dan terjadi penyusutan (Gambar 2.14c)



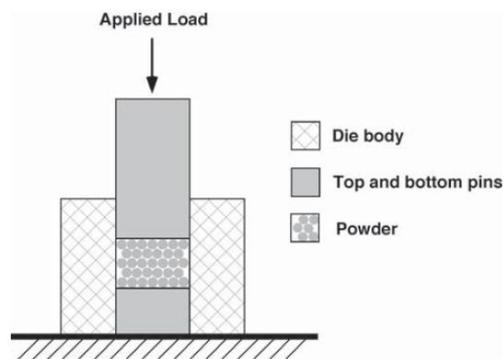
Gambar 2.14. Mekanisme proses *sintering* [10]

Gambar 2.14 memperlihatkan mekanisme proses *sintering* dimana sebelumnya material bahan melalui proses pencetakan dengan memberikan penekanan sehingga terjadi penggabungan butir membentuk material yang padat, akan tetapi ikatan butir satu dengan yang lain belum terikat kuat. Butiran akan memiliki ikatan yang sangat kuat apabila dilakukan proses *sintering*.

2.11 Proses Pencetakan Refraktori *Green Body Strength*

Proses pembuatan refraktori yang dilakukan antara lain pemilihan dan pemeriksaan bahan baku, baik komposisinya maupun sifat-sifatnya. Selanjutnya dilakukan pencampuran bahan baku dan bahan tambahan guna memperoleh campuran dengan komposisi kimia yang sesuai dengan yang diinginkan, dan dilakukan pengaturan komposisi ukuran bahan baku tersebut [6]. Pencampuran jenis bahan pengikat dan jumlahnya adalah faktor yang sangat menentukan dalam penampilan suatu produk material keramik, untuk refraktori campuran yang digunakan diantaranya air, resin, minyak tar batubara, dan lain-lain. Bahan yang telah homogen selanjutnya menuju proses pencetakan yang dapat dilakukan dengan sistem kering (*dry*), semi kering, atau semi basah.

Pencetakan refraktori dilakukan dengan memasukkan bahan baku ke dalam cetakan yang memiliki ukuran sesuai kegunaan untuk yang berukuran kubus yaitu (51 mm x 51 mm x 51 mm). Selanjutnya memberikan tekanan dengan mesin *press* bertekanan tinggi pada seluruh permukaannya sampai menghasilkan sampel uji yang solid/padat dan tidak rapuh.



Gambar 2.15. Skema proses pencetakan spesimen uji [8]

Gambar 2.15 merupakan salah satu proses pencetakan refraktori metode ini cocok dilakukan untuk membuat bentuk yang sederhana dan tebal. Dalam industri yang memproduksi refraktori proses pencetakan dengan mesin *press* bertekanan tinggi lebih sering digunakan karena lebih hemat biaya dan waktu. Penggunaan mesin *press* biasa digunakan untuk memproduksi dalam jumlah banyak.



Gambar 2.16. Sampel uji refraktori [13]

2.12 Karakterisasi Refraktori Silika

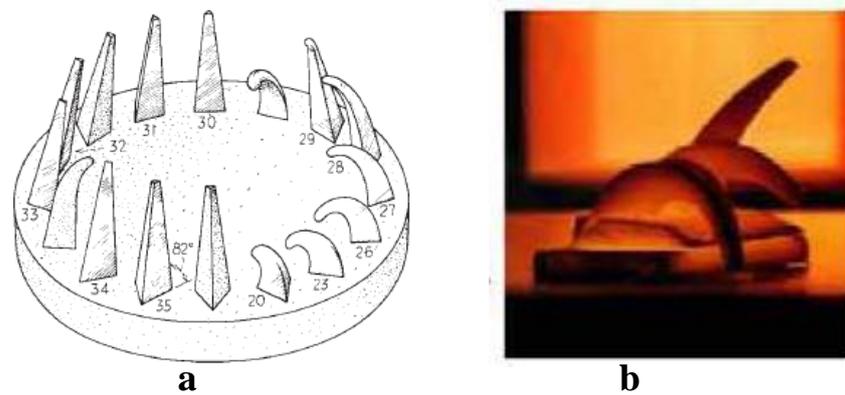
Pada dasarnya semua material memiliki sifat dan kemampuannya masing-masing sama seperti material refraktori yang beroperasi dalam temperatur yang relatif tinggi maka perlu dilakukan suatu pengujian dan analisa untuk mengetahui sifat-sifat dan kemampuannya. Karakterisasi refraktori silika ini untuk mengetahui titik pelunakan serta kekuatan mekanik sebagai informasi tambahan bagi industri peleburan logam, karena salah satu kerusakan sebuah *lining* disebabkan oleh gangguan mekanik seperti pada saat instalasi ataupun terbenturnya *lining* dengan bahan baku (*scrap*). Beberapa pengujian dan analisa yang dilakukan pada penelitian ini diantaranya: *Pyrometric Cone Equivalent*, kuat tekan dingin (*Cold Crushing Strength*).

2.13 Karakterisasi Sifat Refraktorines

2.13.1 *Pyrometric Cone Equivalent*

Sifat refraktorines adalah kesanggupan bahan refraktori dalam menahan pengaruh temperatur tinggi tanpa mengalami pelarutan. Pengujian PCE bukan mengindikasikan sebuah definisi titik leleh atau titik peleburan karena pengujian ini bukan sebuah ukuran, tapi hanya sebuah perbandingan dari perlakuan *thermal* dari

sampel uji terhadap standar *cone* [7]. Pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi kualitas refraktori dalam manufaktur dan kontrol kualitas dari produk refraktori. Metode pengujian ini mencakup penentuan titik leleh dari bata tahan api, bata alumina tinggi, silika, dan lain-lain dengan membandingkan *cone* yang diuji dengan *pyrometric cone* yang telah distandarkan dan sudah diketahui titik pelunakannya pada suatu kondisi yang terkontrol dengan baik.



Gambar 2.17. Metode penyusunan *cone* dan tampilan setelah pengujian [8]

1. Metode penyusunan *cone* (Gambar 2.17.a)
2. Tampilan setelah pengujian (Gambar 2.17.b)

Standar *cone* merupakan sebuah piramida yang mempunyai tinggi 30 mm, sisi dasar 8 mm dan permukaan atas mempunyai sisi 2 mm. Setelah dibentuk spesimen uji diletakkan pada pelat atau tatakan yang terbuat dari bahan alumina (Al_2O_3) dengan tingkat kemurnian tinggi (>95%) dan selanjutnya spesimen uji dimasukkan ke dalam tungku dan dibakar pada temperatur tinggi. Selama proses pembakaran, spesimen uji akan mengalami deformasi dan pembengkakan.

Beberapa *cone* yang telah disusun berdasarkan nomor urut *cone* selanjutnya dilakukan pembakaran, contoh penyusunan *cone* dapat dilihat pada Gambar 2.15. Temperatur saat mulai terjadinya penempelan bagian atas dari *cone* menyentuh bagian dasar diambil sebagai dasar perhitungan refraktoriness atau standar *melting* dari material refraktori. Kejadian ini dicatat sebagai *Pyrometric Cone Equivalent* (PCE) dari refraktori yang diuji disesuaikan dengan *cone* standar yang telah mempunyai nomor tertentu atau biasa disebut nilai SK (*Seeger Kegel*) seperti pada Tabel 2.4. Standar acuan tersebut digunakan untuk pengujian refraktori untuk berbagai jenis bahan refraktori,

salah satu tujuan dilakukan tes PCE ini adalah untuk menghindari kesalahan pada saat pembakaran sehingga untuk mengetahui material dengan komposisi baru untuk pembuatan refraktori sebaiknya dilakukan uji PCE terlebih dahulu.

Tabel 2.5. Persamaan Temperatur *Pyrometric Cones* Untuk Pengujian Refraktori [14]

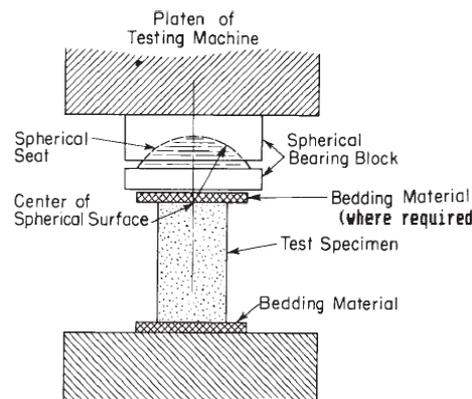
Cone No.	End Point, °F (°C)	Cone No.	End Point, °F (°C)
12	2439 (1337)	31	3061 (1683)
13	2460 (1349)	31 1/2	3090 (1699)
14	2548 (1398)	32	3123 (1717)
15	2606 (1430)	32 1/2	3135 (1724)
16	2716 (1491)	33	3169 (1743)
17	2754 (1512)	34	3205 (1763)
18	2772 (1522)	35	3245 (1785)
19	2806 (1541)	36	3279 (1804)
20	2847 (1564)	37	3308 (1820)
23	2921 (1605)	38	3335 (1835)
26	2950 (1621)	39	3389 (1865)
27	2984 (1640)	40	3425 (1885)
28	2995 (1646)	41	3578 (1970)
29	3018 (1659)	42	3659 (2015)
30	3029 (1665)		

2.13.2 Kuat Tekan Dingin/*Cold Crushing Strength*

Pengujian kuat tekan dingin dalam material refraktori adalah salah satu bagian penting untuk mengetahui sifat material dalam mengatasi beban atau tekanan. Kekuatan dapat diukur di temperatur ruang atau diberbagai variasi temperatur sesuai kegunaan. Untuk kekuatan pada temperatur rendah/kamar tidak dapat digunakan secara langsung untuk memprediksi *performance* pada saat beroperasi. Pengujian pada temperatur rendah juga dapat mengindikasikan kemampuan material refraktori terhadap menangan penahanan bentuk dan pengiriman tanpa kerusakan, penahanan abrasi serta menahan *impact* dalam aplikasi temperatur yang relatif rendah. Aplikasi terpenting pengetahuan ini terutama untuk tujuan konstruksi di dalam instalasi *lining* tungku, pengangkutan dan penyimpanan [8]. Untuk mendapatkan kekuatan yang tinggi, maka harus:

- Mempunyai zat pengikat yang baik (*good binding agent*)

- Mempunyai susunan butir-butir yang kompak/padat, terutama jika proporsi ikatannya rendah/kecil.
- Mempunyai densitas atau kerapatan yang tinggi pada masing-masing butir yang memadu. Bahan yang porous (berpori) umumnya memiliki kekuatan tekannya rendah.



Gambar 2.18. Ilustrasi pengujian kuat tekan dingin [15]

Gambar 2.18 menggambarkan ilustrasi pengujian kuat tekan dingin, sebuah spesimen uji diletakkan pada *testing machine* dan akan diberikan pembebanan yang di naikan secara bertahap dengan luas yang telah di standarkan untuk *castable refractories*. Pengujian kuat tekan dilakukan hingga sampel uji tersebut hancur atau pecah mengalami deformasi. Spesimen uji untuk pengujian kuat tekan dingin (CCS) berbentuk kubus dengan dimensi (50 mm x 50 mm x 50 mm). Permukaan spesimen yang hendak dilakukan uji kuat tekan sebaiknya memiliki permukaan yang rata atau halus agar pembebanannya merata keseluruhan permukaan. Besarnya gaya maksimum yang diterima oleh sampel uji dinyatakan dalam rumus berikut ini.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

dengan:

- σ = Cold Crushing Strength (kg/cm², N/mm²)
- F = Gaya maksimal (kg, N)
- A = Luas penampang benda uji (cm², mm²)

BAB III

METODELOGI PENELITIAN

3.1 Spesifikasi Bahan Baku

Bahan baku yang dipakai dalam penelitian ini merupakan serbuk refraktori dengan komposisi kandungan kimia sebagai berikut:

Tabel 3.1. Spesifikasi Komposisi Bahan [13]

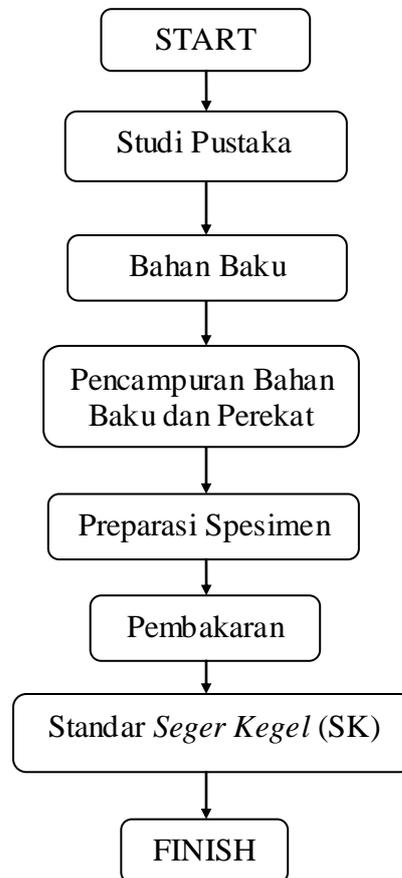
Komponen Bahan	Kadar (%)
SiO ₂	99,2%
Al ₂ O ₃	0,5%
Fe ₂ O ₃	0,2%
<i>Other</i>	0,1%
TOTAL	100%

Jika dilihat dari Table 3.1 bahan ini termasuk ke dalam silika dengan kandungan SiO₂ 99,2% dan Al₂O₃ 0,5%. Bahan baku tersebut dipesan dari P.T. Makmur Meta Graha Dinamika Surabaya dengan jumlah 1 *sag* (25 kg) kode bahan baku DRI VIBE 462S. Bahan baku yang digunakan dalam pembuatan spesimen untuk penelitian ini adalah bahan refraktori *silika* dalam bentuk serbuk dan juga sering digunakan untuk industri peleburan logam seperti besi cor, baja paduan serta industri-industri yang beroperasi pada temperatur tinggi

3.2 Diagram Alir Penelitian

Metode penelitian berisi tahapan-tahapan pekerjaan membuat benda uji dari bahan serbuk yang digunakan untuk pembuatan refraktori untuk *lining* tungku induksi. Tahapan berikutnya merupakan langkah-langkah untuk melakukan pengujian karakterisasi sifat refraktori, yaitu sifat refraktorines (*Pyrometric Cone Equivalent*) dengan membandingkan sampel uji dengan material refraktori yang telah distandarkan.

2.8.3 Diagram Alir Pengujian Sifat Refraktorines



Gambar 3.1. Diagram alir proses pengujian sifat refraktorines

Keterangan:

1. Studi Pustaka

Studi pustaka dilakukan dengan membaca buku-buku yang berkaitan dengan tema dan judul tugas sarjana ini, jurnal-jurnal dari internet, laporan tugas sarjana yang berhubungan dengan penelitian tugas akhir ini agar mempermudah dalam menentukan proses yang akan dilakukan selama pengerjaan.

2. Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan dipesan dari P.T. Makmur Meta Graha Dinamika, Surabaya. Bahan baku ini berupa serbuk refraktori yang mengandung SiO_2 99,2% dan Al_2O_3 0,5% dan biasa digunakan untuk refraktori *lining* tungku induksi.

3. Pencampuran Bahan Baku dan Perekat

Pencampuran bahan baku dilakukan secara acak yang terdiri dari butiran kasar (*grog*) dan butiran halus. Setelah bahan baku dihaluskan dilakukan pencampuran bahan perekat berupa diextrin sampai homogen.

4. Preparasi Spesimen

Preparasi spesimen yang dilakukan sebelum melakukan uji refraktorines dengan cara serbuk dibentuk pada cetakan besi dengan bentuk segitiga kerucut dengan ukuran yang telah distandarkan. Spesimen uji akan diletakkan pada tempat yang terbuat dari bahan alumina (Al_2O_3) dengan tingkat kemurnian yang tinggi (>95%) dan selanjutnya spesimen akan mengalami proses pembakaran di dalam tungku pada temperatur tinggi.

5. Pembakaran

Pengujian PCE dilakukan untuk mengetahui titik pelunakan suatu sampel bahan refraktori. Setelah preparasi selanjutnya spesimen akan mengalami proses pembakaran dalam tungku pada temperatur tinggi yang khusus digunakan untuk pengujian kesetaraan pancang. Selama proses pembakaran, spesimen uji akan mengalami deformasi dan pembengkokan. Deformasi inilah yang akan dijadikan acuan dalam memberikan nilai *Seger Kegel* (SK) pada sampel uji.

3.3 Bahan Baku Pembuatan Refraktori

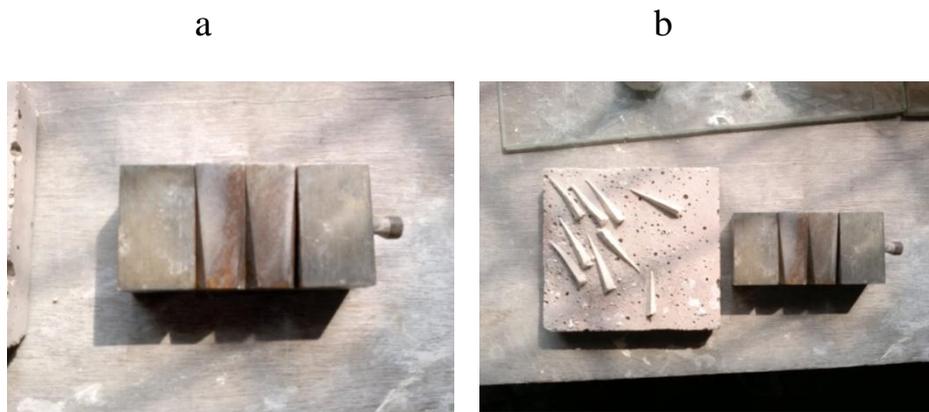
Bahan baku yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini merupakan berupa serbuk refraktori sebanyak 1 *sag* (25 kg) diperoleh dari produsen material refraktori, PT. Makmur Meta Graha Dinamika, Surabaya. Serbuk refraktori tersebut sering digunakan untuk *lining* tungku induksi peleburan logam seperti besi cor dan logam lainnya.

3.4 Peralatan dan Prosedur Pengujian

Berikut ini merupakan prosedur dan peralatan pengujian yang digunakan, antara lain:

a. Cetakan Segitiga Kerucut

Cetakan segitiga kerucut ini digunakan untuk mencetak spesimen uji yang diperlukan untuk pengujian sifat refraktorines. Cetakan terbuat dari material baja yang telah dibentuk profil segitiga kerucut, dengan tinggi 30 mm, sisi dasar 8 mm dan permukaan atas 2 mm, selanjutnya serbuk uji dicetak dalam bentuk segitiga kerucut dengan ukuran yang telah di standarkan oleh ASTM C24 atau SNI 15-4936-1998. Preparasi pembuatan spesimen tersebut dilakukan di Balai Besar Keramik Bandung.



Gambar 3.2. Cetakan segitiga kerucut

1. Cetakan material baja (Gambar 3.2 a)
 2. Bentuk serbuk uji segitiga kerucut (Gambar 3.2 b)
- b. Tungku Listrik (*Refractorines Furnace*)

Tungku refraktorines khusus digunakan untuk menguji PCE. Temperatur kerja maksimal yang bisa dicapai oleh tungku tersebut adalah $\pm 1700^{\circ}\text{C}$. Untuk pengujian PCE seorang operator bertugas untuk mengawasi perubahan *cone* yang terjadi di dalam tungku dengan sebuah kaca mata pelindung khusus. Pembakaran yang dilakukan di dalam tungku dengan laju pemanasan untuk nomor *cone* 12 sampai 37 sebesar $150^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Proses pengujian dilakukan di Balai Besar Keramik Bandung.



Gambar 3.3. *Refractorines furnace*

3.5 Variabel dan Parameter Pengujian

3.5.1 Variabel

1. Bahan Baku : Serbuk silika untuk *lining* refraktori tungku induksi

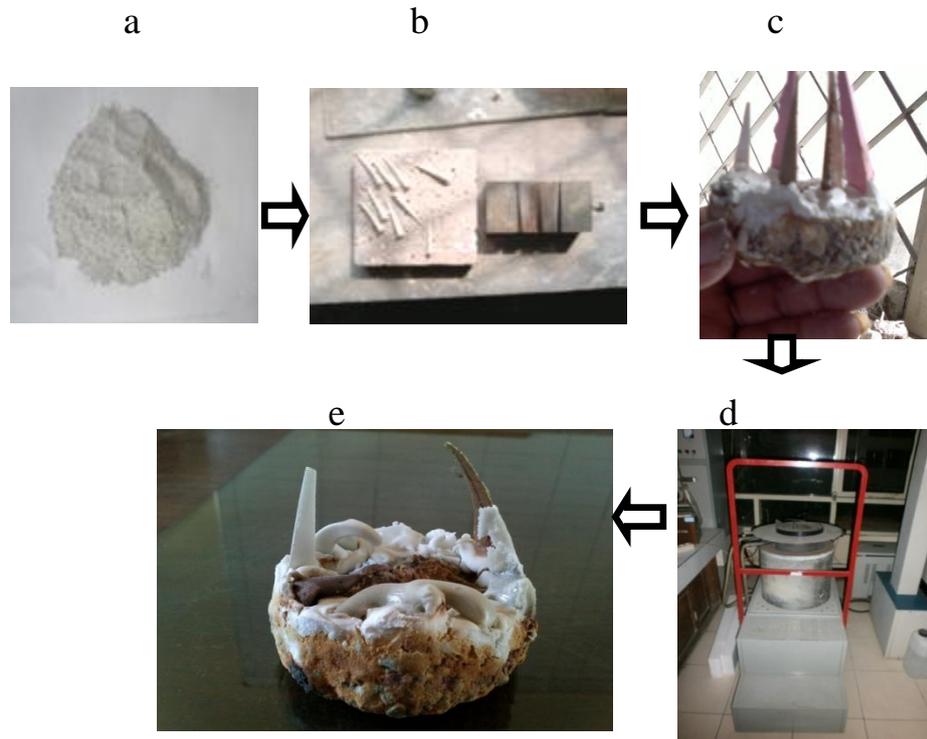
3.5.2 Parameter

1. Analisis *Pyrometric Cone Equivalent* (PCE)

3.6 Pembuatan Spesimen Uji

3.6.1 Pembuatan Spesimen Pengujian *Pyrometric Cone Equivalent* (PCE)

1. Mempersiapkan bahan baku serbuk refraktori yang digunakan untuk *lining* tungku induksi peleburan besi cor.
2. Bahan baku kemudian dihaluskan digiling sampai halus $< 0,5$ mm. Kemudian melakukan pencampuran dengan bahan perekat berupa diextrin.
3. Melakukan pencetakan dengan memasukkan serbuk yang telah dihaluskan pada cetakan besi dan dijadikan pancang uji berbentuk segitiga.
4. Menyusun spesimen segitiga pada tempat/papan tahan api sesuai dengan nomor *cone* yang telah ditentukan dan siap untuk dilakukan pembakaran di dalam tungku.



Gambar 3.4. Alur pembuatan spesimen uji PCE

1. Serbuk monolitik (Gambar 3.4 a)
2. Cetakan dan bentuk serbuk segitiga kerucut (Gambar 3.4 b)
3. Segitiga kerucut yang sudah diletakan pada tatakan alumina (Gambar 3.4 c)
4. *Furnace* (Gambar 3.4 d)
5. Hasil pengujian PCE (Gambar 3.4 e)

3.7 Karakterisasi Refraktori

3.7.1 Karakterisasi Sifat Refraktorines

3.7.1.1 Analisa *Pyrometric Cone Equivalent* (PCE)

Karakterisasi sifat refractories dilakukan dengan cara pengujian *Pyrometric Cone Equivalent* (PCE). Pengujian ini dilaksanakan di Laboratorium Balai Besar Keramik Bandung.

1. Mempersiapkan Bahan Baku

Bahan baku yang dipersiapkan untuk pengujian PCE berupa material refraktori yang mengandung butiran kasar dan butiran halus yang masing-masing telah dihaluskan.

Pencampuran bahan tambahan seperti diextrin diperlukan untuk memudahkan dalam proses pencetakan.

2. Mempersiapkan Alat

Peralatan yang digunakan berupa cetakan baja kesetaraan pancang berbentuk segitiga serta tungku pembakaran.

3. Melakukan Proses Pembuatan Spesimen Uji

- Setelah proses penghalusan bahan baku dan pencampuran dengan bahan tambahan dilakukan, langkah selanjutnya diaduk sampai bahan baku tersebut bersifat homogen dan plastis.
- Pencetakan dilakukan pada saat bahan baku selesai diaduk untuk mencegah terjadinya pengerasan. Bahan baku tersebut dimasukkan ke dalam cetakan baja hingga berbentuk segitiga kerucut. Kemudian disusun pada wadah/tempat tahan api berdasarkan nomor *cone* yang telah ditentukan.

4. Melakukan Proses Pengujian

- Mengoperasikan tungku pembakaran dimana temperatur yang diberikan tidak ada acuan sehingga langsung pada temperatur tinggi. Selain itu dilakukan pengamatan pada setiap temperatur dengan peralatan untuk mengamati proses terjadinya pembakaran.
- Setelah proses pembakaran selesai untuk menyatakan nilai *Seger Kegel* (SK), perlu diamati spesimen uji yang mengalami pelengkungan hampir menyentuh dasar bidang wadah/tempat pancang.
- Kesetaraan nilai SK dilaporkan dengan menyebutkan pancang standar yang melengkung hampir bersamaan dengan spesimen uji.

5. Publikasi Hasil

Hasil yang diperoleh dari pengujian sifat refraktorines berupa nilai *Seger Kegel* (SK). Dimana nilai tersebut akan membantu menentukan variasi temperatur dalam proses *sintering*.

Setelah tahapan proses pengujian dan karakteriasi selesai, dilakukan analisis dan pembahasan dari hasil yang didapatkan dalam pengerjaan tugas akhir ini.