

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

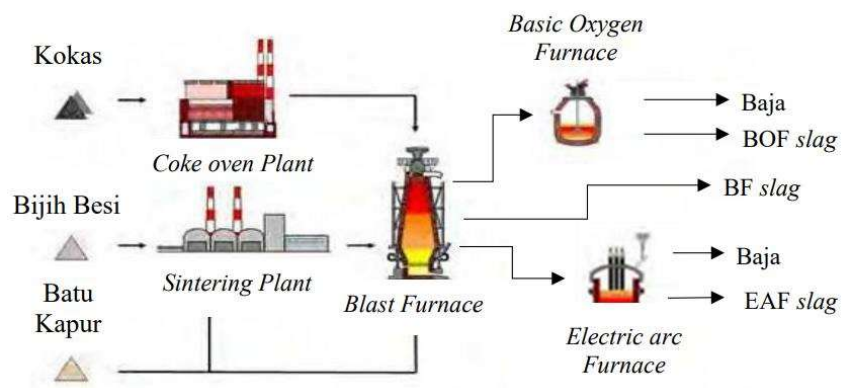
2.1 *Steel Slag*

Slag adalah produk hasil sisa dari pembuatan besi dan baja yang diproses dengan peleburan pada *furnace* seperti pada Gambar 2.1. *Slag* terdiri dari oksida-oksida logam yang terkumpul pada saat proses peleburan besi dan baja. *Slag* terbentuk dari oksida-oksida logam yang berasal dari logam-logam pengotor yang berada didalam komposisi bijih. *Slag* mempunyai sifat fisik keras pada saat keadaan dingin karena didominasi oleh oksida. *Slag* dapat dimanfaatkan untuk berbagai macam kegunaan apabila dilihat dari karakteristiknya. *Slag* dapat digunakan sebagai agregat konstruksi jalan jika dilihat dari sifatnya yang keras dan kasar. *Slag* juga dapat dimanfaatkan sebagai pertanian & semen. Selain itu, *slag* dapat digunakan sebagai agen *fluks* dan bahan perbaikan pada tanah karena didalam *slag* terdapat kumpulan senyawa-senyawa oksida (CaO , MgO , FeO , MnO , SiO_2). (Suwarno,2010).



Gambar 2.1 Limbah *Steel slag* (Suwarno,2010).

Slag dapat diklasifikasikan berdasarkan tungku yang digunakan dan proses yang dilaluinya pada saat *slag* terbentuk. Jenis utama *slag* yang dihasilkan dari industri pembuatan besi dan baja diklasifikasikan menjadi dua yaitu *ironmaking slag* dan *steelmaking slag*. (Horii et al, 2015). *Steel slag* merupakan bagian terbesar dari produk samping yang terbentuk pada saat proses *steelmaking* dan *ironmaking* pada suatu pabrik baja. Pada Gambar 2.2 dapat dilihat diagram alir untuk proses pembuatan besi dan baja serta jenis *slag* yang dihasilkan dari setiap proses.



Gambar 2.2 Diagram alir pembuatan besi dan baja (Annunziata et al, 2012)

2.1.1 *Ironmaking slag*

Ironmaking slag atau yang lebih dikenal dengan *blast furnace slag* (BF slag) adalah *slag* hasil dari sisa produk yang diperoleh dari peleburan bijih besi dengan menggunakan *blast furnace*. *Blast furnace* merupakan salah satu tungku pada proses peleburan yang digunakan untuk mereduksi bijih besi (*iron ore*), pellet, dan sinter secara kimia dengan mengubah material besi padat menjadi logam besi cair bersuhu tinggi (*hot metal*)

dengan menggunakan tungku pelebur. Proses ini dikenal sebagai tanur tiup karena sepanjang prosesnya ditiupkan udara panas (*hot blast*) ke dalam tungku. Udara bersuhu 1800°C ditiupkan melalui lubang (*tuyere*) yang terdapat dibagian bawah tungku. Logam panas dan *slag* akan terbentuk saat campuran bijih besi, fluks dan kokas dimasukan kedalam tanur tinggi dengan suhu mencapai 1800°C. Setiap 200-400kg *slag* dapat dihasilkan dari 1 ton logam panas. (Yuksel, 2018)

2.1.2 *Steelmaking slag*

Steelmaking slag adalah *slag* yang dihasilkan pada saat proses produksi baja. Berdasarkan industri pembuatan baja, jenis utama *slag* yang dihasilkan dapat diklasifikasikan menjadi BOF (*basic oxygen furnace*) *slag* dan EAF (*electric arc furnace*) *slag* (Yildirim et al, 2011). *Slag* terbentuk dari serangkaian hasil proses reaksi kompleks antara sumber energi (kokas, oksigen), muatan non logam (kapur, dolomit, *fluks*) dan refraktori atau bata tahan api. Pembentukan *slag* terjadi saat ditambahkan *fluks* seperti dolomit, batu kapur dan pasir silika kedalam tungku pembuatan baja untuk menghilangkan skrap, kandungan pengotor dari bijih dan buatan besi lainnya selama dalam proses peleburan. Karena pada proses pembuatan baja menggunakan suhu yang tinggi (sekitar 1600° C) selama pembuatannya, maka terak tidak mengandung zat organik apapun (Annunziata et al, 2012).

Tabel 2.1 Komposisi Kimia *Steel Slag*

Senyawa/%	%
CaO	45-60
SiO ₂	10-15
Al ₂ O ₃	1-5
Fe ₂ O ₃	3-9
FeO	7-20
MgO	3-13
MnO	2-6
P ₂ O ₅	1-4
C ₃ S	0-20
C ₂ S	30-60

Dapat dilihat pada Tabel 2.1 merupakan komposisi pada *steel slag*. *Steel slag* mempunyai kandungan CaO dan SiO yang tinggi. Selain itu, mempunyai kandungan Fe yang cukup tinggi sehingga terlihat sebagai bongkahan yang keras. *Slag* mempunyai densitas berkisar antara 3,300-3,600 kg/m³, kekerasan 6-7 mohs, berat 2900-3500 kg/ m³, dan kadar air 1,56-13%. *Steel slag* juga mempunyai komponen kimia yang bervariasi berdasarkan dari jenis tungku, nilai baja dan metode *pre-treatment* yang dilakukan. (Yi H et al, 2012).

2.2 *Crushing*

Crushing adalah proses reduksi/pengecilan ukuran dari bahan galian/bijih

yang langsung dari tambang yang masih berukuran besar (diameter sekitar 110cm) menjadi ukuran 20-25cm bahkan bisa mencapai 2,5cm. Peremukan material pada dasarnya bertujuan untuk mereduksi ukuran material, dari ukuran bongkahan besar menjadi pecahan kecil. Peremukan umumnya dilakukan dalam tiga tahap (Currie, 1973), yaitu :

1. *Primary Crushing*

Primary Crushing merupakan tahap penghancuran yang pertama, dimana umpan berupa bongkahan-bongkahan besar berukuran $\pm 300\text{mm}$ dan produknya berukuran 150mm, alat yang digunakan dalam *primary crushing* adalah *jaw crusher* dan *gyratory crusher*.

2. *Secondary Crushing*

Secondary Crushing merupakan tahapan penghancuran dari kelanjutan *primary crushing* dimana ukuran umpan lebih kecil. Dapat memecah material yang berukuran 150mm menjadi 12.5-25.4mm. Pada tahapan ini kadang masih di jumpai ukuran partikel yang belum hancur sesuai ukuran sehingga perlu di lakukan *crushing* kembali. Alat yang digunakan adalah *Cone Crusher*, *roll crusher* dan *Hammer Mill*

3. *Fine Crushing*

Fine Crushing merupakan peremukan tahap lanjutan dari proses *secondary crushing*. Proses penghancuran pada milling menggunakan *shearing stress*. Tahapan ini merupakan tahap penghalusan biji. Alat yang digunakan adalah *ball mills*, *Disc mills*.

2.3 *Grinding*

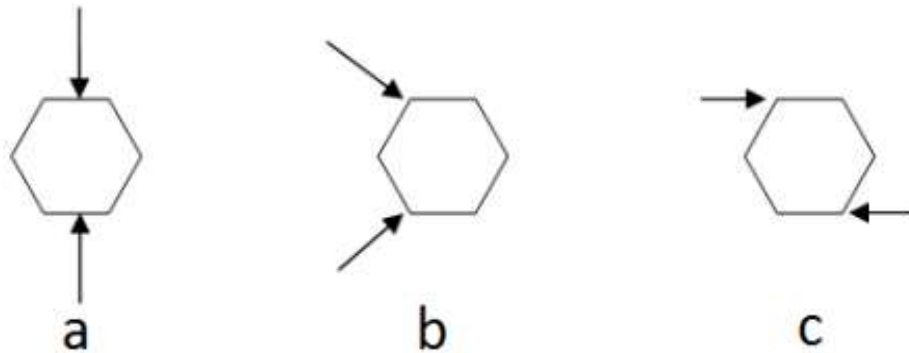
Grinding sendiri merupakan proses penghalusan bijih material dengan sistem menggiling. Proses dari *grinding* sendiri menggunakan beberapa jenis alat (Zhang Y et al, 2017). Indikator atau ukuran pemisahan dari setiap alat ini pun akan berbeda-beda sesuai dengan hasil penghalusan bijih material yang diinginkan. Alat dari proses ini disebut *grinder* (Ates SM et al, 2017). *Grinder* akan mengecilkan ukuran dengan metode yang beragam sesuai dengan *grinder* yang digunakan. Proses *grinding* ini akan membantu dalam proses pengolahan material selanjutnya yakni proses konsentrasi (Ates SM et al, 2017).

Pada proses penghalusan material menggunakan *grinding* dapat dilakukan dalam keadaan basah (*wet condition*) dan dalam keadaan kering (*dry condition*) yang telah dihancurkan untuk mendapat batas ukuran halus yang diinginkan. Alat-alat yang digunakan tersebut bekerja menggunakan prinsip tekanan gerusan yang terjadi dalam suatu silinder berputar. Tahapan pengolahan dengan metode *grinding* ini biasanya menggunakan media penggerus berupa silinder baja, bola-bola baja/keramik dan batuan keras/natural (Gikanga et al, 2018)

Mekanisme kerja dari teknik *grinding* melibatkan gaya-gaya yang pada dasarnya akan memecah material dalam media *grinding* berupa silinder berputar. Gaya-gaya tersebut antara lain berupa impak atau penekanan, *Chipping*, dan Abrasi seperti pada Gambar 2.3.

- a. Impak atau penekanan, dimana gaya diberikan hampir ke seluruh permukaan partikel.
- b. *Chipping*, dimana gaya memiliki sudut tertentu.

c. Abrasi (gesek), dimana gaya paralel terhadap permukaan partikel.



Gambar 2.3 Gaya-gaya yang bekerja pada proses *grinding* (a) impak (*compression*)(b) *chipping* (c) abrasi

2.4 Pengayakan

Hasil yang didapatkan pada proses grinding lalu dilakukan proses (*sieving test*) atau pengayakan menggunakan *sieve shaker*. Variasi ayakan yang digunakan adalah berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) ukuran partikel pada produk agregat dan pupuk yaitu 35#, 48#, 100#, dan 200#. Material hasil dari *grinding* dilakukan pengayakan yang akan menghasilkan dua macam produk yaitu produk yang lolos ayakan yang disebut *undersize*, merupakan produk yang akan diolah lebih lanjut atau juga sebagai produk akhir. Material yang tidak lolos ayakan disebut *oversize*, merupakan produk yang akan dikembalikan lagi ke alat *grinding* untuk dilakukan penggerusan.

2.5 *Magnetic Separator*

Magnetic separator adalah alat untuk memisahkan material padat berdasarkan sifat kemagnetan suatu bahan seperti pada Gambar 2.4. Hal ini dapat

dilakukan karena bijih yang terdapat di alam mempunyai sifat kemagnetan yang berbeda antar satu dengan yang lain. Sifat kemagnetan yang tinggi (*ferromagnetic*), lemah (*paramagnetic*) dan *nonmagnetic* (*diamagnetic*). Alat ini terdiri dari *pulley* yang dilapisi dengan magnet yang berada disekitar arus listrik. Alat pemisah material padatan ini memiliki prinsip kerja yaitu dengan melewati suatu bahan/material campuran padatan yang mengandung logam dan non logam pada suatu bagian dari *magnetic separator* yang diberi medan magnet, maka padatan yang mengandung logam akan menempel (tertarik) pada medan magnet sedangkan padatan non logam akan jatuh secara gravitasi dengan demikian terjadi pemisahan secara fisik.



Gambar 2.4 *Magnetic Separator*

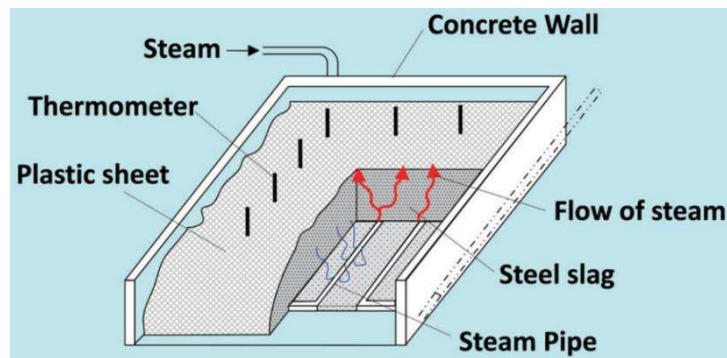
Material dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar, tergantung dari pada ketertarikan material tersebut dengan magnet : (1) *ferromagnetic*, yaitu benda yang mempunyai sifat kemagnetan sangat tinggi dan apabila tertarik oleh medan magnet maka akan menempel pada permukaan magnet, (2) *Diamagnetik* (*Non Magnet*), yaitu benda yang sukar untuk ditarik oleh magnet dan bila terletak di dalam medan magnet cenderung dihindari oleh garis-garis gaya magnet. Sedangkan, benda paramagnetik adalah kategori khusus dari benda *ferromagnetic*

yaitu benda-benda yang tergolong pada jenis ini tidak begitu kuat dapat ditarik oleh magnet, benda dapat ditarik magnet tetapi tarikannya lemah. (Wills,B.A, 2006)

2.6 *Steam Aging*

Proses *aging* dengan menggunakan uap merupakan salah satu pilihan yang menjanjikan dan ekonomis. Dalam konsep ini, sebuah proses telah dikembangkan untuk mempercepat proses *aging* pada *steel slag* menggunakan uap. *Aging treatment* merupakan metode penuaan yang digunakan untuk mengatasi stabilitas *steel slag* dan sebuah metode yang paling sederhana serta efektif untuk menghilangkan pemuai volume pada *steel slag* (Ma Zhaol et al,2014). *Aging* adalah sebuah *treatment* yang dilakukan untuk menurunkan kandungan f-CaO pada *steel slag*. Dapat dipahami bahwa jika dibandingkan dengan air, uap akan meresap lebih cepat melalui pori-pori kecil pada *slag* dan menghidrasi f-CaO sehingga dapat menurunkan kandungan f-CaO sehingga membuatnya stabil.

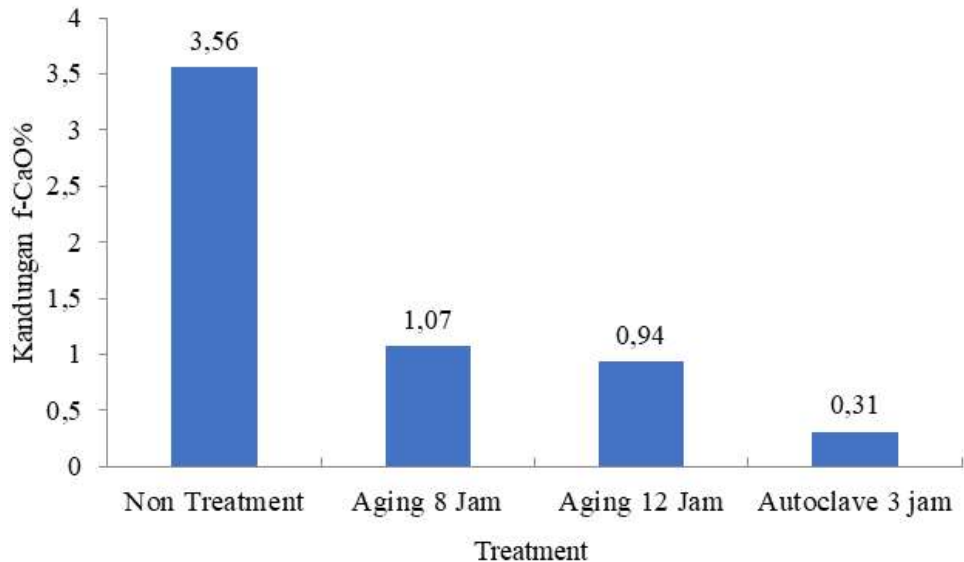
Terdapat dua metode pada *aging*, pertama yaitu perlakuan *normal aging* dan kedua yaitu perlakuan *accelerated aging*. Pada metode perlakuan *normal aging* ini, proses hidrasi berlangsung secara alami menggunakan air hujan dan udara bebas, sedangkan pada perlakuan *accelerated aging* proses hidrasi dipersingkat agar dapat selesai lebih cepat. Yang termasuk kedalam *accelerated aging* yaitu diantaranya *steam aging* seperti pada Gambar 2.5 dimana menggunakan temperatur uap yang tinggi, *hot water aging* dimana *slag* dimasukan kedalam air panas dan perlakuan *high pressure aging* dimana *slag* bereaksi dengan udara dibawah tekanan yang tinggi (Kabir Malhotra,2019).



Gambar 2.5 Konsep *Steam Aging* (Sasaki T,2015).

Berdasarkan studi penelitian yang sudah dilakukan di kokura,jepang tentang proses *aging* yang dibutuhkan untuk menstabilkan *steel slag* dengan menggunakan peralatan dan proses *steam aging*. Proses *steam aging* yang dilakukan yakni dengan waktu selama 6 hari. Dimana dari waktu tersebut terbagi beberapa proses yaitu preparasi *slag* baja yang dilakukan selama 12 jam, menaikkan dan menahan temperatur agar tetap stabil selama 1 hari, melakukan *steam aging* pada *steel slag* selama 2 hari, melakukan pendinginan pada *slag* baja selama 2 hari dan yang terakhir mengambil sampel *slag* baja dari alat *steam aging*. Proses *steam aging* yang dilakukan ini sudah mempersingkat waktu steam aging lebih cepat. Dari yang 6 bulan dengan metode *normal aging* dengan menggunakan udara bebas dan air hujan, menjadi 6 hari dengan menggunakan metode *steam aging* sehingga dapat mempercepat dan mempersingkat waktu (Tsuyoshi sasaki,2015) Dalam meningkatkan pemanfaatan *steel slag*, terdapat perlakuan yang dilakukan untuk mengurangi kandungan f-CaO. Salah satu cara yang efektif yaitu dengan *steam aging* dalam penelitian yang dilakukan oleh (Longhua Wei, 2017). Teknologi *pre-treatment steam aging steel slag* dengan menggunakan *autoclave* bertekanan tinggi dapat menurunkan kandungan f-CaO

jauh lebih rendah sehingga dapat meningkatkan stabilitas terhadap *steel slag*.

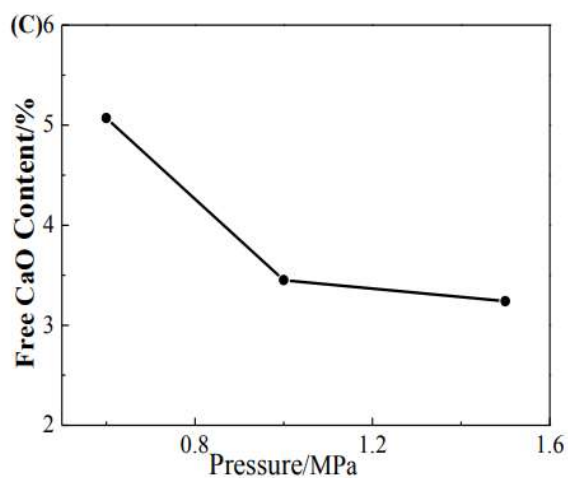


Gambar 2.6 Kandungan f-CaO *steel slag* setelah *ditreatment* (Lun Yunxia, 2008)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Lun Yunxia menggunakan *steam treatment* dengan waktu 8 jam dan 12 jam dan juga dengan autoclave menggunakan tekanann 2.0 MPa pada waktu 3 jam seperti pada Gambar 2.6. Sebelum dilakukan treatment kandungan f-CaO yakni sebesar 3,56%. Lalu, setelah *treatment* yang dilakukan untuk menurunkan kandungan f-CaO menggunakan *steam treatment* pada waktu 8 jam diperoleh kandungan f-CaO sebesar 1,07% dan *steam treatment* pada waktu 12 jam diperoleh kandungan f-CaO sebesar 0,94. Dan untuk *treatment* yang menggunakan autoclave diperoleh kandungan f-CaO sebesar 0,31%. Dari penelitian yang sudah dilakukan ini dapat diketahui bahwa dengan *steam treatment* dan juga *autoclave* dapat menurunkan kandungan f-CaO.

Tabel 2.2 *Steel Slag Autoclave Test*

<i>Pressure</i> (MPa)	Time (h)	Temperature (°C)
0,6	3	162
1,0	3	183
1,5	3	203



Gambar 2.7 Grafik Hasil *autoclave test* (Longhua Wei, 2017)

Penelitian juga dilakukan oleh Longhua Wei dkk dengan menggunakan alat *autoclave*, dilakukan penelitian pada sampel *steel slag* sebanyak 100g menggunakan variasi yang berbeda-beda yaitu tekanan dan waktu. Untuk variasi tekanan yaitu menggunakan 0,6 MPa, 1,0 MPa, 1,5 MPa dan untuk variasi temperature yaitu menggunakan 162, 183, 203 selama 3 jam seperti pada Tabel 2.2 dengan menggunakan *autoclave*. Dapat dilihat pada Gambar 2.7 bahwa melalui tekanan *autoclave* hingga 1,5MPa dapat mengurangi kandungan f-CaO dari sekitar 6% berat menjadi kurang dari 3,2% berat dalam waktu 3 jam dapat dilihat pada Gambar 2.5. Dari hasil percobaan yang dilakukan oleh Han jiaxing

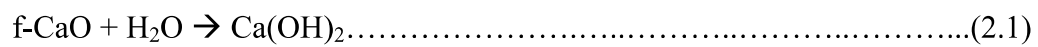
dkk yaitu *steam aging* menggunakan *autoclave* tersebut menunjukkan bahwa tekanan berpengaruh terhadap %kandungan f-CaO. Semakin tinggi tekanan pada *autoclave* yang digunakan, maka %kandungan f-CaO akan semakin berkurang sehingga % f-CaO yang didapatkan akan semakin menurun juga.

Proses *accelerated aging* dapat dikembangkan menggunakan *steam aging* dimana *slag* akan mengalami tekanan udara dibawah sistem yang tertutup untuk benar-benar menghidrasi *slag* dalam waktu yang cepat. Proses *aging* menggunakan tekanan dan uap dapat dilihat sebagai pilihan yang tepat dan ekonomis karena limbah *slag* dengan jumlah besar yang dibuang di pabrik baja dapat digunakan dan dimanfaatkan kembali. Dimana tujuan utamanya dari konsep ini untuk mengetahui pengaruh tekanan uap, lamanya waktu dan tingkat kestabilan saat *slag* dilakukan proses *steam aging*. (Yildirim et al, 2011).

2.7 f-CaO

f-CaO atau kapur bebas adalah senyawa yang tidak berikatan dengan oksida-oksida lainnya serta tidak bereaksi dan tidak membentuk oksida lainnya. f-CaO dalam *steel slag* berasal dari yaitu sisa CaO dari bahan baku, endapan kapur dari *molten slag*, dan Kapur (CaO) yang tidak bereaksi dengan sempurna selama pembentukan *slag*. Menurut Afrimirza (2017), adanya kapur bebas disebabkan oleh jumlah kapur yang digunakan berlebihan dengan kebutuhan pada komposisi raw material dan reaksi yang berlangsung dalam furnace kurang sempurna. f-CaO berasal dari kapur yang tidak larut, ditambahkan *flux* sebagai pemurnian yang menghasilkan pengendapan f-CaO selama proses pematatan *slag*. Kadar f-CaO

membuat beton dan semen memiliki kuat tekan yang rendah (akibat ekspansi kapur bebas) membentuk gel yang akan mengembang (*swelling*) dalam keadaan basah sehingga dapat menimbulkan keretakan. Ketika f-CaO bersentuhan dengan uap air, lalu menghidrolisis akan membentuk senyawa kalsium hidroksida seperti pada persamaan (2.1).



Pada reaksi tersebut dapat dilihat kalsium oksida bereaksi dengan air dan membentuk larutan basa kalsium hidroksida. Kalsium hidroksida mudah larut dengan dalam air, jika terjadi pembuatan kalsium hidroksida terus-menerus yang mengakibatkan konsentrasi menjadi naik sehingga volumenya berlipat ganda. Pembentukan Ca(OH)_2 melalui reaksi antara kapur bebas dan uap air menyebabkan terjadinya pemuaian volume *slag* karena volume molaritas Ca(OH)_2 hampir dua kali lipat dari CaO (Chuanming Du et al, 2018).

Untuk menghindari pemuaian volume, f-CaO biasanya distabilkan dahulu sebelum *slag* didaur ulang atau dimanfaatkan menjadi agregat. Metode paling sederhana yaitu *natural aging*, dimana *slag* ditumpuk ditanah untuk waktu yang sangat lama dan hidrasi terjadi melalui hujan dan kelembapan alami. Untuk mempercepat hidrasi, proses *steam aging* banyak digunakan karena hidrasi f-CaO akan meningkat dengan meningkatnya suhu. Pada proses *steam aging* ini, waktu *aging* dipersingkat menjadi enam hari dari yang awalnya enam bulan waktu yang dibutuhkan oleh *natural aging*. Selanjutnya dengan menggunakan proses *steam*

aging dan *autoclave* bertekanan, dibawah tekanan 0,6 MPa waktu *aging* dikurangi hanya dua jam (Chuanming Du et al,2018).

2.8 Pemanfaatan *Steel Slag*

Steel slag merupakan hasil dari sisa produk sampingan dari proses pemurnian besi di industri baja. Dari proses pemurnian tersebut dihasilkan baja murni dengan hasil samping berupa *slag* yang masih dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan seperti agregat, pupuk, semen, dll. Berikut merupakan pemanfaatan dari *steel slag*:

2.8.1 Agregat

Pemanfaatan *steel slag* dalam konstruksi jalan dapat menggantikan kebutuhan agregat alam, sehingga mengurangi beban sumber agregat alam seperti Gambar 2.8. Sebagai agregat pada beton seperti Gambar 2.8, beton *steel slag* mempunyai kekuatan dan keawetan yang lebih baik dibandingkan beton biasa. PT.Ispat Indo pada tahun 2008 menyebutkan bahwa adanya peningkatan kekuatan beton menggunakan agregat *steel slag* dibandingkan menggunakan agregat kerikil. *Steel slag* memiliki karakteristik permukaan kasar, rasio berat, ketahanan abrasi yang baik dan kokoh sehingga dapat digunakan secara luas dalam agregat untuk berbagai kebutuhan.

Handayani pada tahun 2012 menyatakan amannya kandungan kimia pada *steel slag* apabila digunakan dalam campuran beton. Sifat fisik dan komposisi kimia dari *steel slag* hampir sama dengan spesifikasi

agregat pada campuran aspal, sehingga layak untuk menggantikan agregat alam. Secara umum, kelebihan yang unggul ditunjukkan *steel slag* dibandingkan dengan agregat pada hasil pengujian yaitu nilai kekuatan yang baik, ketahanan abrasi, dan ketahanan slip yang tinggi pada permukaan yang kering maupun basah. Jika *slag* yang mengandung f-CaO yang tinggi digunakan sebagai agregat atau aspal jalan, akan mengalami pemuaian volume yang mengakibatkan jalan menjadi mengembang sehingga menyebabkan penonjolan atau terjadinya retakan pada aspal (Kazuhiro hori, 2015).



Gambar 2.8 Agregat

Di china, *steel slag* telah banyak digunakan sebagai agregat dalam jumlah yang besar untuk pembangunan jalan raya, pelabuhan dermaga dan proyek stadion nasional. (Hitesh Kumar et al., 2020). Dampak positif pada pemanfaatan *steel slag* pada konstruksi bangunan yaitu (Wang et al, 2011):

1. Penurunan substansial dalam pencemaran lingkungan akibat perubahan praktek saat ini, dimana bahan yang ada dibuang dan ditimbun saja dapat dimanfaatkan.
2. Penggunaan bahan tersebut sebagai pengganti bahan-bahan alami, sehingga hal ini dapat dikatakan sebagai perlindungan sumber

daya alam yang tidak terbarukan dan pengurangan kebutuhan energi.

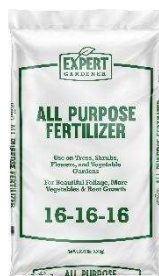
3. Terdapat kemungkinan mengubah, atau memodifikasi, sifat fisik dan kimia dari bahan dasar untuk memproduksi bahan rekayasa khusus yang dapat dimanfaatkan untuk aplikasi khusus.

Ada beberapa keuntungan penggunaan *steel slag* dalam campuran beton sebagai berikut :

1. Mempertinggi kekuatan tekan beton
2. Menaikkan rasio antara kelenturan dan kuat tekan beton
3. Mengurangi panas hidrasi dan menurunkan suhu
4. Mempertinggi keawetan karena pengaruh perubahan volume.

2.8.2 Pupuk

Steel slag yang merupakan produk sampingan dari pemurnian besi pada industri baja memiliki manfaat bagi pertanian, karena memiliki beberapa unsur atau senyawa yang dapat digunakan sebagai pupuk dan amolioran seperti pada Gambar 2.9 (Devnita.R *et al.*2021). Karena *steel slag* dikalsinasi pada suhu tinggi selama proses peleburan, kelarutannya meningkat dan mudah diserap dan dimanfaatkan oleh tanaman. Saat ini pupuk fosfat dan pupuk silicon dapat diproduksi dari *steel slag*.



Gambar 2.9 Pupuk

Pada *steel slag* mempunyai kandungan silikon, kalsium, fosfor, magnesium dan elemen lain yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman seperti pada Tabel 2.3. Sebagai pupuk, kandungan Ca, Mg dan Si dapat menambah unsur hara makro dalam tanah. Selain itu juga dapat digunakan sebagai amelioran karena senyawa CaO dan MgO dalam *steel slag* berfungsi sebagai kapur yang dapat meningkatkan pH tanah. Unsur Si juga berfungsi sebagai amelioran yaitu bahan yang dapat meningkatkan kesuburan tanah, membantu melepaskan P yang tertahan di andisols yaitu tanah yang mempunyai manfaat untuk menyerap fosfat yang sangat tinggi. Kandungan Si terdapat pada *steel slag* juga dapat digunakan untuk meningkatkan kandungan Si dalam tanah. Si berfungsi meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit (Qafoku et al,2004). Sebagai pupuk Si untuk tanaman padi sawah, *steel slag* di Indonesia dapat meningkatkan pertumbuhan dan produksi padi sawah pada tanah mineral berkadar Si rendah maupun tanah gambut. (Suwarno,2010)

f-CaO yang merupakan salah satu konstituen utama dari *slag* dapat larut apabila direaksikan dengan air untuk menghasilkan kalsium hidroksida seperti pada persamaan 2.1 Kalsium hidroksida akan terurai menjadi Ca^{2+} dan OH^- yang akan menaikkan pH (Annunziata dan Coll, 2012). Hal ini menjadikan *steel slag* sebagai material pengapuran yang baik untuk meningkatkan pH tanah dan menjadi pemasok nutrisi bagi tumbuhan.

Tabel 2.3 Manfaat Kandungan *steel slag* bagi tanaman (Kimio ito, 2015)

Senyawa	Manfaat
Kalsium Oksida	Menetralkan tanah asam, membantu ketahanan tanaman terhadap patogen. Selain itu Ca membuat akar kuat dan meningkatkan penyerapan kalium.
Magnesium Oksida	Membantu netralisasi tanah asam, selain itu sebagai unsur penyusun klorofil dan meningkatkan proses fotosintesis
Fosfor	Fosfor (P) merupakan unsur yang sangat diperlukan bagi kehidupan tanaman untuk mendorong pertumbuhan tanaman, pembentukan daun, peluasan akar, pembungaan, dan pembuahan.
Mangan	Mendorong fotosintesis
Besi	Membantu menstabilkan senyawa sulfida dalam tanah dengan cara membentuk besi sulfide sehingga dapat mengurangi toksisitas yang menguntungkan pada tanaman

2.8.3 Semen

Kehadiran C_3S (tricalcium silicate), C_2S (dicalcium silicate) dan C_4AF (tetracalcium alumino-ferrite) mendukung sifat semen *Steel slag*. C_3S berfungsi sebagai kekuatan awal semen, C_2S berfungsi sebagai kekuatan akhir dan C_4AF berfungsi sebagai penurun suhu, pemberi ketahanan terhadap asam sulfat dan dapat mempengaruhi warna semen. *Steel slag* mempunyai kandungan CaO yang cukup tinggi, CaO merupakan

komponen terbesar dalam semen yang berfungsi sebagai senyawa pembentuk mineral potensial penyusun kekuatan semen dalam menentukan kualitas semen. *Slag* dengan kandungan MgO rendah sangat tepat digunakan dalam campuran semen karena MgO dapat menghambat proses hidrasi pada semen dan menambah waktu pengerasan campuran semen. Oleh karena itu, *steel slag* yang digiling menjadi bubuk halus dapat digunakan sebagai bahan tambahan semen dan bahan tambahan beton..(Li Bing et al., 2019).

Kalsium oksida (CaO) adalah kadar kapur yang terkandung dalam semen, sedangkan f.CaO adalah kadar kapur bebas yang terkandung dalam semen yang apabila kadarnya melebihi persyaratan, maka akan sangat merugikan konsumen, karena jika kadar kapur bebas yang dimiliki oleh semen berlebih, berakibat semen tersebut tidak kuat dan rapuh. Steel slag dapat digunakan setelah halus dihancurkan sebagai bahan baku semen *slag*. Di Cina, standar berbagai jenis semen *steel slag* telah dikeluarkan termasuk semen *steel slag* untuk jalan raya, semen batu *steel slag*, semen *steel slag* portland, dan sebagainya.



Gambar 2.10 Semen *slag* (Horii, K. et al.,2015).

Penggunaan *steel slag* sebagai bahan pengikat dalam semen, sangat bergantung pada sifat mekanik *slag*. Komposisi pada *steel slag* menentukan tingkat mekanis kekuatan pada semen. Keuntungan dari *slag* semen ini yakni hemat energi. Permintaan semen *slag* saat ini meningkat pesat, semen *slag* menyumbang sekitar 20% dari seluruh produksi semen di Jepang (Horii, K. et al., 2015). Semen *slag* mempunyai keunggulan yaitu

1. ketahanan yang lebih baik terhadap air laut dan bahan kimia sehingga daya tahannya lebih tinggi.
2. Meningkatnya kekuatan dalam jangka waktu yang lama.
3. Lebih sedikit emisi CO₂ pada saat produksi semen

2.9 Titrasi Volumetri

Metode titrasi volumetri secara umum masih digunakan secara luas karena metode ini merupakan metode yang handal dari segi teknis dan prinsip, murah dan mampu memberikan ketepatan yang tinggi. Metode volumetri menggunakan pengukuran volume, yaitu dengan cara sejumlah zat yang dianalisis direaksikan dengan larutan baku (standar) yang telah diketahui kadar atau konsentrasinya secara teliti dan reaksinya berlangsung secara kuantitatif. Reaksi yang terjadi tidak untuk dikhususkan bagi bahan tertentu saja, akan tetapi dapat mencakup semua bahan dengan sifat yang sama atau hampir mirip secara umum. Misalnya, suatu reaksi asam basa dapat berlangsung dalam titrasi tanpa memperhatikan apakah itu basa atau asam kuat maupun asam basa lemah. Larutan standar diteteskan dari buret ke dalam larutan yang akan diteliti dalam reaktor, misal erlenmeyer. Proses mereaksikan dengan cara seperti ini disebut dengan titrasi. Larutan baku yang

diteteskan disebut dengan titran. Ketika reaksi telah selesai disebut dengan titik ekuivalen teoretis (stoikiometris) yang menyatakan bahwa bahan yang diuji telah bereaksi dengan reagen lain secara kuantitas (jumlah) tertentu sebagaimana dinyatakan dalam persamaan reaksi (Yayuk Mundriyastutik et al, 2021).

Pengamatan dalam metode titrasi volumetri dilakukan dengan cara pengamatan volume. Untuk mengamati volume secara akurat, alat utama yang digunakan dalam metode ini salah satunya adalah buret. Kriteria buret yang cocok dan baik digunakan untuk titrasi yaitu buret yang memiliki diameter dalam yang kecil sehingga memudahkan dalam pengamatan meniskus cairan secara lebih presisi. Ketika volume titran mencapai titik akhir untuk suatu analit bereaksi secara stoikiometris dengan titran maka saat itulah titrasi dihentikan dan disebut titik ekuivalen. Secara eksperimental, titik akhir titrasi dapat diamati dengan perubahan warna/perubahan bentuk larutan yang diakibatkan oleh adanya suatu indikator yang sengaja ditambahkan pada saat titrasi. Berakhirnya suatu titrasi harus disertai tanda yang muncul tepat saat reaksi kimia telah berlangsung setimbang. Tanda yang terjadi misal tampak dari perubahan warna atau adanya endapan (kekeruhan) yang dapat dilihat dengan jelas. Perubahan tersebut diamati dengan sendirinya atau dengan bantuan larutan (zat lain) yang disebut dengan indikator. Momen saat perubahan pertanda bahwa suatu titrasi harus berakhir disebut dengan titik akhir titrasi yang dinyatakan dengan berapa jumlah volume larutan baku yang terpakai dari buret sebanyak sekian milliliter (Yayuk Mundriyastutik et al, 2021).