

BAB II

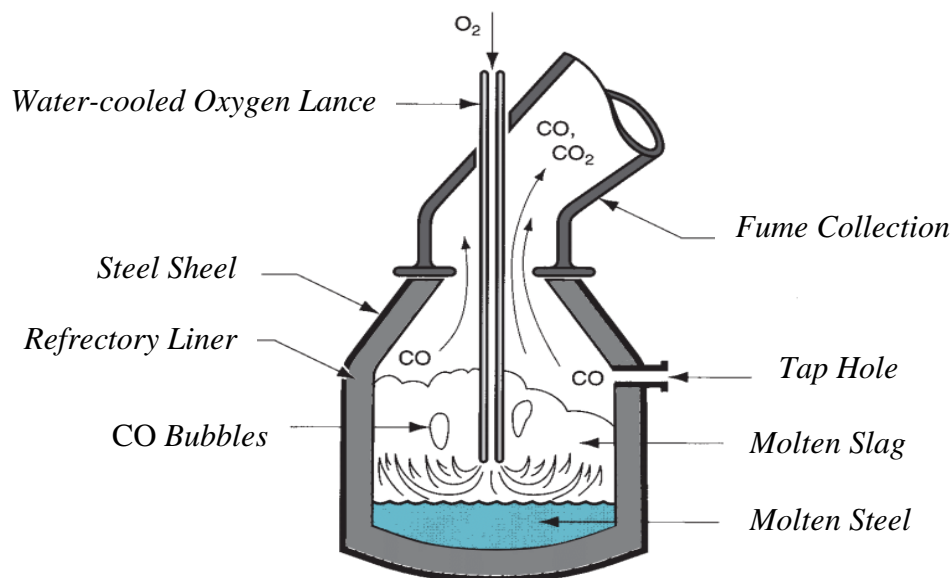
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Pembuatan Baja di BOF (*Basic Oxygen Furnace*)

Pembuatan baja adalah proses oksidasi selektif untuk menurunkan kadar karbon dalam besi cair (Ghosh, 2001). *Pig iron* hasil reduksi pada *blast furnace* mengandung 90% Fe, 3-5% karbon dan terdapat mangan (Mn), silika (Si), fosfor (P), dan sulfur (S). Unsur tersebut tidak dapat dihilangkan dalam proses reduksi sehingga diperlukan proses pemurnian lanjutan yang dilakukan dalam *converter*. Pada *BOF*, bahan baku utama yang digunakan adalah *molten pig iron* sebanyak 65-80% dari *blast furnace*, lalu diberi penambahan *scrap* sebanyak 30% dan *lime*. Pada Gambar 2.1 Gas oksigen dialirkan ke dalam tungku melalui pipa pengalir (*oxygen lance*) dan bereaksi dengan cairan logam di dalam tungku.

Cara kerja *basic oxygen furnace* adalah dengan menghembuskan oksigen dari atas *BOF* melalui *oxygen lance*. Selama injeksi gas oksigen, bahan yang tidak diinginkan akan teroksidasi kemudian berikatan dengan batu kapur dan membentuk *BOF slag* untuk melindungi *molten steel*. Tujuan proses reduksi adalah untuk mengurangi kadar karbon dari 4% menjadi 1% (biasanya kurang dari 0,1%), untuk mengurangi atau mengendalikan sulfur dan fosfor, serta untuk meningkatkan suhu baja cair yang terbuat dari *scrap* dan besi cair hingga sekitar 1635°C (Fruehan, 2012). Dari *BOF* akan dihasilkan *crude steel* dan menjadi baja yang paling banyak diproduksi sebanyak 71% atau sekitar 1.884,2 juta ton (World Steel Assosiation,

2022). Pada Gambar 2.1, BOF jenis *top blown* menginjeksi oksigen dengan tingkat kemurnian komersial dengan tekanan dan kecepatan tinggi melalui *lance* yang masuk dari atas ke dalam *liquid metal*. BOF dengan jenis ini memiliki permasalahan yaitu pengoksidasian besi, ketika konsentrasi karbon rendah dan menghasilkan laju dekarburisasi yang semakin menurun. Ketika kandungan besi oksida dalam slag meningkat secara berlebihan, maka besi oksida itu sangat cepat akan bereaksi dengan karbon dalam *molten steel*. Hal ini dapat menyebabkan pembentukan gas dengan tiba-tiba yang berbentuk campuran *slag* dan *molten steel*, dan dapat keluar dari *furnace*.



Gambar 2. 1 Basic Oxygen Furnace Top Blow Type (Razin, 2018)

Pada Tabel 2.1 terlihat bahwa gas CO terbentuk dari reaksi antara karbon dalam logam cair dengan oksigen yang dihembuskan melalui *nozzle*, dan *slag* terbentuk melalui reaksi antara unsur Si, P, Mn dan Fe dalam logam cair dengan oksigen. Adapun reaksi – reaksi yang terjadi pada *BOF* dapat terlihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Reaksi Utama yang Terjadi pada *BOF* (Ruuska, 2012)

Jenis Reaksi	Reaksi	ΔH (Kj/mol)	ΔS (Kj/mol)	ΔG (Kj/mol)
Pelarutan oksigen ke dalam logam	$O_2(g) \rightleftharpoons 2\underline{O}$	0	0	0
	$(FeO) \rightleftharpoons \underline{Fe} + \underline{O}$	-60,03	-13,58	-33,22
	$(Fe_2O_3) \rightleftharpoons 2(FeO) + \underline{O}$	-197,79	-61,87	-75,72
	$CO_2(g) \rightleftharpoons CO(g) + \underline{O}$	162,76	36,19	91,36
Oksida unsur dalam logam	$\underline{C} + \underline{O} \rightleftharpoons CO(g)$	93,56	29,63	35,09
	$\underline{Fe} + \underline{O} \rightleftharpoons (FeO)$	-60,03	-13,58	-33,22
	$\underline{Si} + 2\underline{O} \rightleftharpoons (SiO_2)$	-225,89	-47,10	-132,96
	$\underline{Mn} + \underline{O} \rightleftharpoons (MnO)$	-97,21	-21,13	-55,53
	$2\underline{P} + 5\underline{O} \rightleftharpoons (P_2O_5)$	-340,53	-95,26	-152,57
Oksida senyawa dalam <i>slag</i>	$2(FeO) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightleftharpoons (Fe_2O_3)$	-197,79	-61,87	-75,72
	$2(FeO) + CO_2(g) \rightleftharpoons (Fe_2O_3) + CO$	-197,79	-61,87	-75,72
Reaksi <i>flux</i>	$MgO(s) \rightleftharpoons (MgO)$	-145,36	-27,49	-91,11
	$CaO(s) \rightleftharpoons (CaO)$	-153,95	-26,99	-100,70
Reaksi gas	$CO(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightleftharpoons CO_2$	162,76	36,19	91,3

Terak akan mengapung di atas baja cair karena memiliki densitas yang lebih kecil dibandingkan dengan baja cair. Di antara baja cair dan terak yang mengapung

terdapat busa terak (*slag foam*). Volume *slag foam* akan berkurang atau bertambah sesuai dengan jumlah gas yang dihasilkan dan viskositas baja cair.

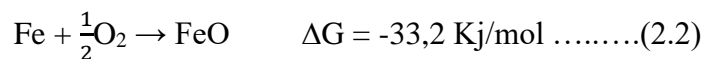
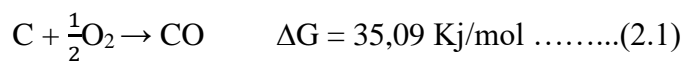
2.2 Slag Foaming

Dalam proses *BOF*, terdapat fenomena yang sering terjadi adalah *splashing* atau percikan yang terjadi ketika oksigen disuntikkan ke dalam cairan besi kasar. Kecelakaan percikan (*the splashing accident*) dapat menyebabkan korban jiwa dan kerusakan peralatan, efek peleburan yang buruk, kerugian bahan, serta polusi lingkungan, yang merupakan masalah sulit yang perlu segera dipecahkan. Percikan ini terjadi dikarenakan adanya *slag foam* yang tidak dapat dikendalikan (Wang, 2021).

Slag foaming adalah fenomena terbentuknya gelembung pada *slag* yang diakibatkan oleh gas CO yang terperangkap dalam *converter*. Saat proses *pretreatment* logam panas, reaksi karbon dengan oksigen di dalam logam panas akan menghasilkan gelembung gas CO. Ketika gas CO meningkat, gas tersebut akan terperangkap dan tertahan di dalam *slag* sehingga membentuk gelembung gas kecil. *Slag foaming* akan mengakibatkan pertumbuhan gelembung *slag* yang tinggi dan lama kelamaan akan tumpah dari *converter*. *Slag* yang tumpah ini memiliki temperatur 1300-1650°C sehingga apabila *slag* ini tumpah, maka akan mengakibatkan kerusakan pada peralatan di sekitarnya dan dapat menurunkan produktivitas dari *converter* (Matsuzawa, 2008).

Pada Gambar 2.2 proses pembentukan *slag foam* dapat bervariasi tergantung pada proses dan kondisi pembuatan baja tertentu. Langkah-langkah umum yang terjadi dalam pembentukan *slag foam* adalah sebagai berikut (Almeida, 2017):

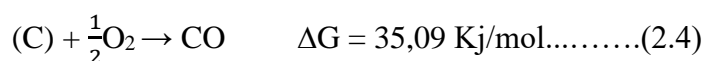
1. Pada tahap pertama, oksigen diinjeksi ke dalam logam cair. Oksigen ini bereaksi dengan karbon yang ada, membentuk gelembung karbon monoksida (CO). Oksigen juga bereaksi dengan besi yang ada di *basic oxygen furnace*.



2. Pada langkah selanjutnya, karbon diinjeksi ke dalam *slag*. Karbon ini bereaksi dengan oksida besi (FeO) dalam *slag*, menghasilkan gas CO₂. Gas CO yang dihasilkan berkontribusi pada pembentukan *slag foam*.



3. Pada tahap ini, oksigen diinjeksikan ke dalam *slag*. Oksigen yang dihembuskan bereaksi dengan gelembung karbon monoksida dan komponen *slag* lainnya, yang selanjutnya mendorong pembentukan dan stabilisasi *slag foam*.



Mudah atau tidaknya *slag foam* terbentuk dapat diketahui dengan menggunakan *foam index*. *Foam index* adalah satuan waktu yang menunjukkan mudah atau tidaknya suatu gas terjebak dalam *slag* cair. *Foam index* dapat diketahui melalui Persamaan 2.1 (Fruehan, 2012)

$$\Sigma = \frac{\eta^{1.2}}{\sigma^{0.2} \cdot \rho \cdot D_B^{0.9}} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan :

Σ = *Foam Index* (s)

η = Viskositas *Slag* (Pa.s)

σ = Tegangan Permukaan (N/m)

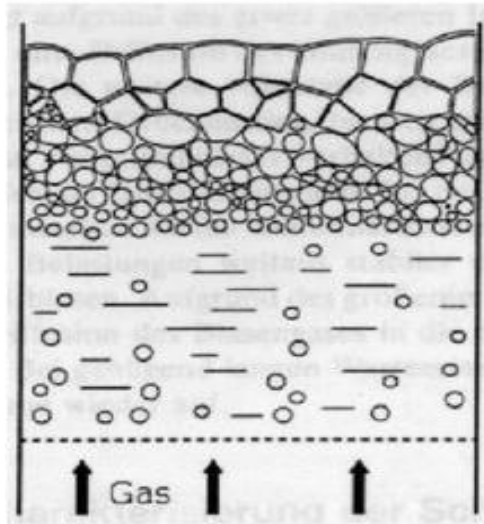
D_B = Diameter *Slag Foam* (cm)

ρ = Densitas *Slag* (gr/cm³)

Atau dengan menggunakan rumus

$$\Sigma = \frac{\Delta H}{\Delta V_g^s} \dots \dots \dots (2.2)$$

Pada Persamaan 2.1 terlihat bahwa viskositas *slag* berbanding lurus dengan *foam index* yang berarti semakin besar nilai viskositas *slag* maka semakin mudah terbentuknya *slag foam*. Pada Persamaan (2.2), adalah rasio antara perubahan *slag height* dalam cm (H) dan perubahan *superficial gas velocity* dalam cm/s (V_g^s) (Heenatimulla, 2022). Beberapa sifat penting yang ditemukan untuk mempengaruhi pembentukan busa pada *slag* adalah ukuran gelembung, dan keasaman/kebiasaan *slag*. *Foaming index* didasarkan pada sifat fisik *slag* seperti, viskositas, tegangan permukaan dan densitas *slag* (Almeida, 2017).



Gambar 2.2 *Slag Foam Phenomenon* (Collin, 1997)

Slag foam biasanya digunakan dalam beberapa proses peleburan untuk meningkatkan kinetika proses, perpindahan panas, dan efisiensi energi (Dicker, 2014). *Slag foam* dalam *converter BOF* sangat dihindari karena dapat menurunkan produktivitas *converter* dan mengakibatkan terjadinya fenomena *slopping* yang dapat menyebabkan kehilangan logam cair. Upaya untuk mengurangi jumlah gelembung *slag* yang timbul dengan melakukan penambahan *slag depressant* ke dalam *converter BOF*.

2.3 *Slag Depressant*

Slag depressant adalah suatu bahan aditif yang digunakan untuk mencegah terjadinya fenomena *slopping* pada *BOF*. *Slag depressant* dapat mencegah fenomena *slopping* dengan cara memecah gelembung *slag foam*, sehingga gas yang terjebak dalam gelembung tersebut dapat terbebas keluar. *Slag depressant* juga dapat mengontrol pembentukan *slag foam*. *Slag depressant* yang digunakan pada

BOF diharapkan dapat dengan mudah terurai sehingga tidak merubah atau mengotori komposisi baja cair yang ada di dalam *BOF* (Kanamori & Nashiwa, 2001).



Gambar 2.3 *Slag Depressant*

Slag depressant adalah suatu bahan aditif yang digunakan untuk mencegah terjadinya fenomena *slopping* pada *BOF*. *Slag depressant* dapat mencegah fenomena *slopping* dengan cara memecah gelembung *slag foam*, sehingga gas yang terjebak dalam gelembung tersebut dapat terbebas keluar. *Slag depressant* juga dapat mengontrol pembentukan *slag foam*. *Slag depressant* yang digunakan pada *BOF* diharapkan dapat dengan mudah terurai sehingga tidak merubah atau mengotori komposisi baja cair yang ada di dalam *BOF*.

Penggunaan *slag depressant* pada proses pembuatan baja dilakukan dengan cara menampung *slag depressant* tersebut di dalam sebuah *hopper* berbentuk kerucut yang berada tepat di atas *BOF*, sehingga *slag depressant* tertuang secara bertahap. *Slag depressant* diharapkan mampu menahan beban tumpuk selama penggunaannya di dalam *hopper*. Selain itu, *slag depressant* yang digunakan juga dapat terurai pada temperatur kurang dari 1000⁰C agar tidak merubah atau

mengotori baja cair yang terdapat pada *BOF*. Untuk memenuhi kriteria tersebut maka spesifikasi *slag depressant* menggunakan Patent JP 2001032007A dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi *Slag Depressant* (Kanamori & Nashiwa, 2001)

Spesifikasi	Besaran
Kadar Air	< 15 %
Kuat Tekan	>1500 N/cm ²
<i>Volatile matter</i>	> 20%
<i>Shatter Index</i>	>80%

Pada tahun 2020, dilakukan penelitian oleh Della dan Kusnadi mengenai bahan baku serta spesifikasi mengenai *slag depressant*. Digunakan kertas habis pakai sebagai alternatif solusi pengganti limbah pabrik kertas dan bentuk geometri dari *slag depressant* dan didapatkan nilai kuat tekan yang sesuai dengan Patent JP 2001032007A namun masih memiliki nilai porositas yang cenderung tinggi.

2.4 Bahan Baku *Slag Depressant*

Seperti pada Tabel 2.3 *Slag depressant* yang ada pada saat ini dibuat dari bubuk limbah industri kertas sebesar 60% dan kalsium karbonat sebesar 40%. Bubur limbah industri kertas digunakan sebagai bahan organik pada pembuatan *slag depressant* karena sifatnya yang mudah terbakar. Selain itu, penggunaan bubuk limbah industri kertas pada pembuatan *slag depressant* juga ditunjukkan sebagai bentuk pemanfaatan limbah industri. Kalsium karbonat atau batu kapur digunakan sebagai bahan pengikat atau *binder* pada pembuatan *slag depressant*. Selain itu,

kalsium karbonat pada *slag depressant* juga berperan sebagai pembentuk *slag* (*slag former*) CaO.

Tabel 2.3 Komposisi *Slag Depressant* (Kanamori & Nashiwa, 2001)

Bahan	Komposisi (%)
<i>Slag</i>	20 – 70
Bahan Organik	20 – 70
Kalsium Karbonat	5 – 50

2.4.1 *Slag Blast Furnace*

Ironmaking slag atau yang biasa disebut *Blast Furnace slag* (*BF slag*) yang terlihat pada gambar 2.4 merupakan *slag* yang dihasilkan dari proses peleburan bijih besi menggunakan *BF*.



Gambar 2.4 *Slag Blast Furnace*

BF slag merupakan produk non-logam yang pada dasarnya terdiri dari silikat dan alumina silikat kalsium dan basa lainnya yang dikembangkan dalam kondisi cair bersamaan dengan besi dalam tanur tinggi. Ketika campuran bijih besi, kokas, dan *flux* dimasukkan kedalam tanur tinggi, logam panas dan *slag* akan terbentuk pada suhu 1500°C. Biasanya untuk setiap 1 ton logam panas yang dihasilkan akan terbentuk 200-400kg *slag*. (Yuksel, 2018).

Tabel 2.4 Komposisi Kimia BF *slag* (Yuksel, 2018).

Unsur	Persentase(%)
SiO ₂	35,09
CaO	37,79
MgO	5,50
Al ₂ O ₃	17,54
Na ₂ O	0,30
S	0,66
MnO	0,83
TiO ₂	0,68
Fe	0,70
P ₂ O ₅	0,37

Dapat dilihat pada Tabel 2.4 komposisi kimia dari BF *slag* pada umumnya cukup seragam, yaitu mengandung silika, alumina dan kapur dengan tambahan magnesium, mangan dan beberapa oksida. BF *slag* dapat dibedakan menjadi 3 jenis berdasarkan metode pendinginan dan pematatan dari *molten slag*, yaitu *granulated BF slags*, *air-cooled BF slag*, dan *expanded BF slags* (Yuksel, 2018). Pada paten JP2001032007A, penambahan *slag blast furnace* yang terlalu besar dapat mengakibatkan ketidaksesuaian komposisi oksida anorganik pada baja cair dan jika terlalu sedikit maka efek yang didapatkan tidak dapat terlihat sehingga penambahannya diatur pada komposisi 20 – 70%.

2.4.2 Batu Kapur

Batu kapur atau *limestone* adalah jenis batuan karbonat yang terbentuk di alam. Mineral utama batu kapur adalah kalsit (CaCO_3). Sedangkan mineral pengotor pada batu kapur berupa silika (SiO_2), siderit (FeCO_3), ankerit ($\text{Ca}_2\text{MgFe}(\text{CO}_3)_4$), dan magnesit (MgCO_3) (Aziz, 2010). Batu kapur dapat digunakan sebagai *binder* atau pengganti semen pada pembuatan beton dengan komposisi tertentu. Batu kapur dapat meningkatkan kekuatan mekanik beton karena ion Ca^{2+} pada batu kapur dapat membentuk reaksi produk yang kuat (Ortega-Zavala et al., 2019).



Gambar 2.5 Batu Kapur

Penambahan kalsium karbonat pada pembuatan *slag depressant* karena kalsium karbonat dapat berfungsi sebagai zat pendingin atau menurunkan temperatur di sekitar *slag* dan dapat menahan reaksi antara karbon di dalam logam cair dan antara oksigen di dalam *slag*. Jika kalsium karbonat yang ditambahkan ke dalam pembuatan *slag depressant* kurang dari 5%, maka kalsium karbonat tidak dapat berperan sebagai zat pendingin dan penahan reaksi karbon di dalam logam cair dan reaksi oksigen di dalam terak. Di sisi lain, jika kalsium karbonat yang ditambahkan lebih dari 50%, maka peran

kalsium karbonat menjadi jenuh. Oleh karena itu, penambahan kalsium karbonat pada pembuatan *slag depressant* diatur pada komposisi 5 – 50% (Kanamori & Nashiwa, 2001).

2.4.3 Limbah Kertas Habis Pakai

Di Indonesia terdapat 62 perusahaan yang bergerak di industri kertas dan *pulp*. Kapasitas industri kertas nasional mencapai 13 juta ton per tahun (Indonesia Eximbank Institute, 2018). *Paper mill sludge* atau limbah berupa bubuk kertas adalah produk samping dari industri kertas dan *pulp*. Pembuangan limbah tersebut menjadi masalah publik karena dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Setiap satu ton kertas yang diproduksi menghasilkan 30 Kg *paper mill sludge* (Maschio et al., 2009)

Selain limbah kertas yang dihasilkan oleh industri pembuatan kertas terdapat juga limbah kertas yang dihasilkan oleh rumah tangga, sekolah maupun perkantoran. Sebanyak 85% manusia di bumi ini melakukan kegiatannya dengan kertas (Arfah, 2017). Adapun komposisi kimia *paper mill sludge* dapat dilihat pada Tabel 2.5 (Yanfen & Xiaoqian, 2010).

Tabel 2.5 Komposisi Kimia Limbah Kertas (Yanfen & Xiaoqian, 2010)

Komponen	Komposisi (%)
Karbon	23,99
Oksigen	25,01
Hidrogen	5,21
Nitrogen	0,14
Sulfur	0,40

Kertas terdiri dari serat selulosa yang diperoleh dari kayu atau selulosa lainnya melalui proses pembuatan bubur (Khrisna, Vincentius; Setiawan, 2017). Penambahan limbah kertas pada pembuatan *slag depressant* dimaksudkan karena limbah kertas sangat cepat terbakar dan menghasilkan gas CO saat dimasukkan ke dalam *slag* yang memiliki temperatur tinggi sehingga *slag foam* hancur (akibat tekanan gas). Jika penambahan limbah kertas pada pembuatan *slag depressant* kurang dari 20%, maka *slag foam* tidak dapat hancur. Jika limbah kertas yang ditambahkan lebih dari 70%, maka dapat menyebabkan ketidaksesuaian komposisi *slag* (Kanamori & Nashiwa, 2001).

2.4.4 Binder

Pada proses pembuatan *pellet* bijih besi biasanya ditambahkan suatu zat aditif dalam jumlah yang sedikit dengan salah satu tujuannya adalah meningkatkan kekuatan mekaniknya. Selain pada pembuatan *pellet*, zat aditif juga ditambahkan pada proses pembuatan cetakan pasir untuk pengecoran dan pada pembuatan beton untuk meningkatkan kekuatan tekan. Zat tersebut disebut sebagai *binder* atau bahan pengikat. Bahan pengikat yang ditambahkan dapat berupa material organik maupun anorganik (Rosenqvist, 2010). Bahan pengikat organik seperti tepung kanji, gula tetes, dan dekstrin. Sedangkan bahan pengikat anorganik yang biasa ditambahkan dapat berupa semen, NaOH, Na₂CO₃, K₂O₃, CaCl₂, dan FeSO₄ (R. C. Gupta, 2010). Molase merupakan jenis *binder* kental dan tidak memiliki serat kasar sehingga

memungkinkan daya tarik antar molekul untuk membentuk ikatan yang lebih kuat.

Tabel 2.5 Komposisi Kimia Molase (Zhai et al., 2018)

Komponen	Komposisi (%)
Karbon	47,40
Oksigen	41,97
Hidrogen	7,87
Nitrogen	2,63
Sulfur	0,33

Molase akan menempel pada permukaan partikel padat untuk menghasilkan ikatan kuat yang mirip dengan jembatan padat (Syahri et al., 2018; Yusmadi et al., 2015). Pada penelitian kusnadi 2020, penambahan molase 3% dapat meningkatkan kuat tekan hingga 1760,98 N/cm². Penggunaan molase memiliki beberapa kegunaan, antara lain (Kumar, 2018):

- a. **Merekat partikel.** Molase membantu mengikat partikel-partikel bahan dalam campuran, termasuk partikel-partikel *slag depressant* dan bahan lainnya. Ini membentuk ikatan yang kuat antara partikel, menjaga struktur yang padat, dan mencegah partikel-partikel dari terpisah atau bergerombol.
- b. **Meningkatkan kekuatan mekanik.** *Binder* molase dapat meningkatkan kekuatan mekanik dari campuran. Ketika molase mengisi ruang pori-pori dan mengikat partikel-partikel bersama-

sama, ini menghasilkan campuran yang lebih padat dan kokoh, meningkatkan kekuatan tekan dan kekuatan tarik dari bahan.

- c. Pemanfaatan limbah. Molase sebagai produk sampingan dalam industri gula dapat dimanfaatkan sebagai *slag depressant*, sehingga mengurangi limbah yang dihasilkan. Ini membantu dalam menjaga keberlanjutan sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan.

2.5 Pengujian *Slag Depressant*

Agar *slag depressant* yang dibuat dalam penelitian ini sesuai dengan standar mutu *patent* JP2001032007A, perlu diketahui macam-macam pengujian yang akan dilakukan. Berikut adalah pengujian yang akan dilakukan

2.5.1 Pengujian XRF

Pengujian XRF singkatan dari *X-Ray Fluorescence*, dalam bahasa Indonesia disebut sebagai fluorosensi sinar-X. XRF merupakan sebuah teknik analisis non-destruktif yang bisa digunakan untuk menentukan komposisi unsur (elemen) dalam suatu bahan atau sampel yang terkandung pada bahan baku dengan cara yang cepat dan akurat. Prosedur pengujian XRF adalah sebagai berikut (ASTM E-1621) :

- a. Persiapan Sampel

Sampel yang akan diuji harus bersih dari kontaminasi, debu, atau partikel lain yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Jika diperlukan, sampel dapat dihaluskan atau dihomogenkan untuk

memastikan representasi yang baik dari komposisi elemen.

b. Pengaturan Instrumen

Instrumen XRF perlu diatur dengan parameter yang sesuai untuk jenis sampel yang akan diuji. Parameter yang dimaksud adalah energi sinar-X yang digunakan, filter yang digunakan untuk menghilangkan radiasi yang tidak diinginkan, dan waktu pengukuran.

c. Pengukuran

Sampel ditempatkan di bawah alat XRF, dan instrumen akan menghasilkan sinar-X yang mengenai sampel. Ketika sinar-X mengenai sampel, atom-atom dalam sampel akan mengalami fluoresensi, menghasilkan sinar-X sekunder dengan energi yang khas untuk setiap elemen.

d. Pengolahan Data

Instrumen XRF akan mendeteksi dan mengukur energi sinar-X yang dihasilkan oleh sampel. Data yang dihasilkan akan dikalibrasi untuk menentukan konsentrasi relatif dari elemen-elemen dalam sampel.

e. Analisis Hasil

Beberapa instrumen XRF dilengkapi dengan perangkat lunak analisis yang dapat secara otomatis menghitung konsentrasi elemen berdasarkan data yang diukur.

2.5.2 Volatile Matter

Volatile matter adalah bagian dari suatu zat yang hilang saat bahan tersebut dipanaskan pada suhu tertentu. Contohnya adalah ketika batu bara dipanaskan dalam kondisi tertentu, sebagian unsurnya seperti air, senyawa hidrokarbon, dan beberapa senyawa oksigen yang terkait dengan karbon dalam batu bara akan menguap dan dapat diukur. Pada *slag depressant*, nilai *volatile matter* yang dibutuhkan adalah lebih dari 20%, jika kurang dari 20% maka *slag depressant* tidak dapat terbakar dengan mudah dan akan mengendap pada *slag* (Kanamori & Nashiwa, 2001). Dengan menggunakan standar D 3172, 2021 berikut adalah cara menghitung nilai *volatile matter*:

$$\text{Kadar } \textit{volatile matter} = \frac{B - C}{W} \times 100\% \dots\dots\dots(3.3)$$

Keterangan:

B = Berat sampel setelah dikeringkan (gram)

C = Berat sampel setelah dipanaskan dalam *furnace* (gram)

W = Berat sampel sebelum pengujian (gram)

2.5.3 Porositas

Porositas adalah ukuran dari ruang kosong di antara material dan merupakan fraksi dari volume ruang kosong terhadap total volume. Porositas Pada 2008, Cheng menyatakan bahwa nilai kuat suatu bahan akan berbanding terbalik dengan nilai porositasnya dikarenakan pori-pori dalam suatu merupakan cacat struktural yang dapat melemahkan ikatan antara partikel-material penyusunnya. Sebagai akibatnya, bahan dengan porositas tinggi

cenderung memiliki kuat tekan yang lebih rendah. (Gupta, 2010 dan E20-00, 2015)

$$\text{Porositas (\%)} = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100\% \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan :

M_1 = Berat awal sampel (gram)

M_2 = Berat sampel dalam air (gram)

M_3 = Berat sampel setelah dikeluarkan (gram)

2.5.4 Shatter test

Pengujian *shatter test* dilakukan untuk mengetahui tingkat kerusakan dan jumlah *slag depressant* yang hilang akibat proses penuangan *slag depressant* dari ketinggian saat penanganan (*handling*) dan transportasi *slag depressant*. Pada *Indian Standard 9963* tahun 1981, *shatter index* yang baik adalah lebih dari 80% hal ini dikarenakan *slag depressant* akan mengalami beban tumpuk dan beban gesek saat diletakan pada *hopper*. Adapun cara menghitungnya dengan menggunakan rumus berikut:

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \times 100\% \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan :

SI = *Shatter Index* (%)

M_1 = Berat awal (gram)

M_2 = Berat sampel tertahan di ayakan 10mm (gram)

2.5.5 Uji tekan

Pengujian tekan adalah pembebanan aksial yang dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan tekan maksimum atau *compressive strength* pada *slag depressant* sampai bahan tersebut retak. Nilai kekuatan tekan yang diharapkan adalah lebih dari 1500 N/cm². Dengan menggunakan standar ASTM E9-9 2000 nilai kuat tekan dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (3.2)$$

Keterangan:

F= Gaya yang diterima (N)

A= Luas penampang (cm²)