

LAPORAN
TEKNIS PENELITIAN

PROSES MINERAL DRESSING SLAG BAJA SEBAGAI BAHAN BAKU
PEMBUATAN PUPUK DAN AGREGAT MENGGUNAKAN MAGNETIC
SEPARATOR



Disusun oleh :

Anistasia Milandia, ST.,MT

Andinnie Juniarsih, ST.,MT

Ummul Maghfiroh

Jurusan Teknik Metalurgi Fakultas Teknik

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Desember 2023

LEMBAR PENGESAHAN

LAPORAN PENELITIAN MANDIRI

PROSES MINERAL DRESSING SLAG BAJA SEBAGAI BAHAN BAKU
PEMBUATAN PUPUK DAN AGREGAT MENGGUNAKAN MAGNETIC
SEPARATOR

Di setujui oleh :

Ketua Jurusan
Teknik Metalurgi

Adhitya Trenggono, S.T.,M.Sc
NIP. 197804102003121001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji hanya tercurah bagi ALLAH yang telah berkehendak. Sesungguhnya hanya dari kuasa dan kehendakNya semata, semua yang telah diupayakan dapat terlaksana. Dengan penuh ucapan syukur, Laporan Penelitian yang berjudul **“PENGOLAHAN FISIK SLAG BAJA SEBAGAI BAHAN BAKU PEMBUATAN PUPUK DAN AGREGAT MENGGUNAKAN JAW CRUSHER DAN BALL MILL”** telah mampu diselesaikan.

Laporan penelitian ini dibuat sebagai pertanggungjawaban penulis terhadap kegiatan penelitian yang dilakukan pada semester genap 2022/2023. Dalam kesempatan ini ucapan terima kasih dan rasa hormat disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dorongan hingga selesainya Laporan ini, terutama ditujukan kepada :

1. Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Bpk Adhitya Trenggono, S,T., M.Sc
2. Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Metalurgi, Bapak Faiz Rahman, ST., M.S
3. Mahasiswa yang membantu selama di Laboratorium

Semoga Laporan Penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang berkepentingan.

Cilegon, Juni 2023

Anistasia Milandia

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	
	Hal.
Halaman Sampul.....	i
Halaman Pengesahan.....	
Kata Pengantar.....	vi
Daftar Isi.....	vii
Bab I PENDAHULUAN.....	
Bab II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
Bab III METODE PENELITIAN.....	23
Bab IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	28
Daftar Pustaka	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja merupakan salah satu produk logam yang paling banyak dimanfaatkan di dunia. Industri pembuatan baja menghasilkan produk berupa *slab*, *billet*, dan *bloom* yang merupakan bahan baku untuk industri konstruksi, otomotif, elektronika, dan lain-lain. Secara garis besar, proses produksi baja dibagi menjadi tiga proses, yaitu *ironmaking*, *steelmaking*, dan *metal forming*. Selama proses produksi baja tersebut, turut dihasilkan *by-product* berupa *steel slag* atau terak baja. *Steel slag* terbentuk ketika terjadi proses *smelting* pembuatan baja primer. Berdasarkan jenis *furnace* yang digunakan, *steel slag* terbagi menjadi *basic Oxygen Furnace* (BOF) *Slag* dan *Electric Arc Furnace* (EAF) *Slag* (Malhotra, 2019).

Produksi baja secara global telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir. Pada tahun 1967 dilaporkan bahwa produksi baja mentah di dunia kurang dari 500 juta ton. Kemudian jumlah ini terus meningkat, dimana pada tahun 2022 baja mentah yang dihasilkan menjadi sebanyak 1878 juta ton. Adapun produksi baja mentah di Indonesia pada tahun 2022 mencapai sekitar 15,6 juta ton (World Steel Association, 2023). Seiring dengan pesatnya peningkatan produksi baja tersebut, *steel slag* juga semakin banyak dihasilkan. Produksi *steel slag* di dunia pada tahun 2022 diperkirakan sebesar 10% hingga 15% dari produksi baja mentah atau berkisar antara 190 juta dan 290 juta ton (U.S. Geological Survey, 2022). Adapun jumlah

total *steel slag* yang diproduksi oleh pabrik - pabrik di Indonesia mencapai kurang lebih 2.200.000 ton/tahun (KEMENPERIN RI, 2020). Karena banyaknya jumlah *steel slag* yang dihasilkan, maka penelitian tentang pemanfaatan *steel slag* menjadi penting. *Steel slag* memiliki dampak negatif terhadap lingkungan jika tidak dikelola dengan benar. *Steel slag* yang dihasilkan berada di tempat penyimpanan *steel slag* dan akan mengakibatkan berkurangnya tempat penyimpanan dan menyebabkan polusi tanah. Selain itu, *steel slag* memiliki potensi ekonomi yang besar. Dengan pemrosesan dan pengolahan yang tepat, *steel slag* dapat digunakan untuk aplikasi seperti konstruksi jalan, semen, pupuk, dan menjadi terumbu karang buatan.

Dari segi mineralogi, *steel slag* mengandung mineral seperti kalsium oksida, silikat dan alumina, yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku sekunder yang ekonomis untuk mengganti bahan baku alami dalam aplikasi di industri konstruksi dan pupuk. Selain itu, *steel slag* juga mengandung sejumlah logam yang jika dilakukan pengkayaan dapat menjadi sumber daya sekunder yang berharga. Salah satu logam yang banyak terkandung dalam *steel slag* yaitu besi (Fe) (Shi et al, 2020). Dari data tersebut, perlu dilakukan proses pemisahan logam Fe agar kandungan *steel slag* tersebut sesuai untuk aplikasi agregat dan pupuk yaitu memiliki kandungan Fe yang rendah tetapi kandungan kalsium oksida dan silikat yang tinggi. Selain itu, ketika logam Fe tersebut telah terpisah, maka densitas *steel slag* berkurang sehingga densitasnya hampir sama dengan densitas agregat alami.

Untuk memisahkan logam Fe dari mineral lain dalam *steel slag* seperti kalsium oksida dan silikat, maka pemisahan dilakukan menggunakan *magnetic separator*. Hal ini dilakukan dengan memanfaatkan perbedaan sifat kemagnetan

pada material, antara lain feromagnetik yaitu kemampuan material untuk tertarik secara kuat oleh gaya magnet, paramagnetik yaitu kemampuan material untuk tertarik oleh gaya magnet namun tidak sekuat material feromagnetik, dan diamagnetik yaitu sifat material yang tidak dapat ditarik oleh garis-garis gaya magnet sama sekali. Logam Fe dalam *steel slag* merupakan material yang bersifat feromagnetik sehingga dapat ditarik dengan kuat oleh medan magnet yang kecil, sedangkan kalsium oksida bersifat paramagnetik dan silikat bersifat diamagnetik sehingga sulit untuk ditarik oleh medan magnet yang kecil (Yu, 2018). Karena hal tersebut, maka pemisahan dengan menggunakan *magnetic separator* merupakan cara yang efisien untuk dilakukan. Selain itu metode ini juga mudah dilakukan karena menggunakan peralatan yang sederhana, mudah dioperasikan, dan berbiaya rendah (Das et al., 2021).

Pada penelitian tentang pemanfaatan *steel slag* menyebutkan bahwa *steel slag* yang dihasilkan dari *basic oxygen furnace* (BOF) memiliki kandungan Fe sekitar 27,42% (Klug et al., 2022). Kemudian terdapat penelitian yang menyebutkan bahwa untuk memanfaatkan *steel slag*, perlu dilakukan proses pemisahan menggunakan *magnetic separator* untuk menurunkan kandungan Fe. Dari proses tersebut dihasilkan *recovery* Fe sebesar 70% sehingga kandungan Fe pada fraksi non-magnetik turun menjadi sekitar 14-16%. Kemudian, *steel slag* dengan kandungan Fe sebesar 13,35% dapat digunakan menjadi pengganti agregat alami (Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2016).

Steel slag yang akan digunakan sebagai bahan baku pupuk besi, perlu mengandung Fe sekitar 16,83%. Kandungan tersebut membuat pH tanah menjadi

meningkat, karena pH *steel slag* yang bersifat basa (Humaria, 2014). Dari data tersebut maka penelitian ini perlu dilakukan yaitu memisahkan Fe dari *steel slag* menggunakan *magnetic separator* dengan variasi intensitas medan magnet dan kecepatan putaran drum untuk menghasilkan *steel slag* dengan kandungan Fe yang rendah yaitu sekitar 15% pada fraksi non-magnetik.

1.2 Identifikasi Masalah

Kandungan Fe yang masih tinggi untuk aplikasi sebagai agregat dan pupuk, memerlukan proses konsentrasi yang tepat agar dapat menurunkan kandungan Fe sehingga sesuai dengan aplikasi tersebut. Berdasarkan karakteristik sifat kemagnetan yang dimiliki oleh Fe, maka metode pemisahan yang efektif untuk memisahkan Fe pada *steel slag* adalah *magnetic separation*. Pada proses *magnetic separation* terdapat beberapa variabel yang mempengaruhi proses pemisahan, antara lain yaitu intensitas medan magnet, ukuran partikel, kecepatan putaran drum, dan sebagainya. Intensitas medan magnet merupakan variabel utama dalam proses pemisahan menggunakan metode *magnetic separation* yaitu berdasarkan perbedaan sifat kemagnetan atau *magnetic susceptibility* dari material yang akan dipisahkan, dimana pada penelitian ini yaitu memisahkan logam Fe dari kalsium oksida dan silikat. Selain itu variabel kecepatan putaran drum yang akan mempengaruhi lamanya proses pemisahan sehingga apakah proses tersebut dapat berjalan secara efektif dan efisien. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan proses konsentrasi menggunakan metode *magnetic separation* dengan variasi dari beberapa variabel yang mempengaruhi yaitu intensitas medan magnet dan

kecepatan putaran drum, kemudian akan ditinjau pengaruhnya terhadap kadar Fe pada *steel slag* tersebut.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini adalah menurunkan kandungan logam Fe pada *steel slag* sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku agregat atau pupuk. Sedangkan tujuan khusus tersebut adalah:

1. Memperoleh *steel slag* dengan kandungan Fe sekitar 15%.
2. Menentukan nilai intensitas medan magnet dan kecepatan putaran drum untuk dapat memisahkan logam Fe pada *steel slag* dengan ukuran partikel sebesar -20+35#, -35+50#, -50+100#, dan -100+200#.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sampel yang digunakan adalah *steel slag* yang berasal dari *Basic Oxygen Furnace* (BOF).
2. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pengolahan Bahan Galian Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan Institut Teknologi Bandung.
3. Sampel dilakukan karakterisasi kandungan mineral menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan komposisi kimia menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang dilakukan di Laboratorium Sistemika Indonesia.

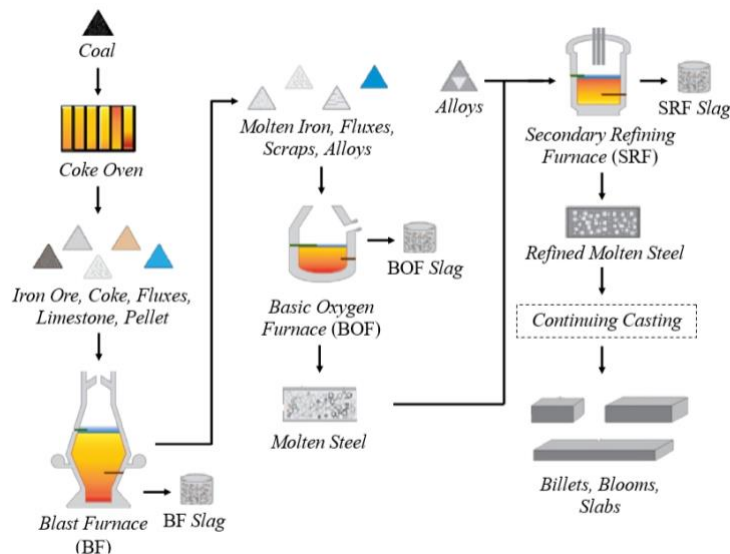
4. Proses peremukan (*crushing*) dilakukan menggunakan *roll crusher*.
5. Proses penggerusan (*milling*) dilakukan menggunakan *ball mill*.
6. Sampel *steel slag* yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari beberapa fraksi ukuran yaitu -20+35#, -35+50#, -50+100#, dan -100+200#.
7. Proses *magnetic separation* dilakukan menggunakan *Lift Type Induction Magnetic Separator* dengan proses kering (*dry process*) dan intensitas medan magnet rendah.
8. Proses *magnetic separation* dilakukan dengan variasi intensitas medan magnet 500, 700, 1000, 1800, dan 3500 G, dan variasi kecepatan putaran drum 30, 50, 70, dan 160 rpm.
9. Proses *magnetic separation* dilakukan selama 60 menit untuk setiap sampel berukuran 50 gram.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Pembuatan Baja dan Pembentukan *Slag*

Baja adalah logam paduan antara besi dan karbon yang banyak digunakan dalam konstruksi, transportasi, dan aplikasi lainnya. Proses pembuatan baja terdiri dari proses *ironmaking* di *blast furnace* (BF) dan proses *steelmaking* di *basic oxygen furnace* (BOF) atau *electric arc furnace* (EAF). Baja cair dari proses BOF atau EAF dapat melalui proses pemurnian sekunder dalam *ladle furnace*, atau dikirim langsung ke *continous caster*. Selama proses *ironmaking* dan *steelmaking*, dihasilkan *by-product* berupa *slag*. *Slag* tersebut selanjutnya ditempatkan dalam tempat penampungan, dimana dilakukan pendinginan dengan udara atau diperlakukan di bawah kondisi pendinginan yang berbeda. Berikut merupakan diagram alir yang menyajikan proses pembuatan besi dan baja serta jenis *slag* yang dihasilkan dari setiap tahap yang dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Proses Pembuatan Besi dan Baja (Wang G, 2014)

Bahan baku yang digunakan dalam sistem BF-BOF meliputi bijih besi, kokas, fluks (terutama batu kapur dan dolomit), *scrap*, dan paduan unsur lainnya. Rata-rata proses ini menggunakan sekitar 1400 kg bijih besi, 800 kg kokas, 300 kg fluks, dan 120 kg *scrap* untuk menghasilkan 1000 kg *crude steel*. Untuk membuat produk baja, unsur paduan dapat ditambahkan seperti mangan, silikon, nikel, seng krom, timah, dan tungsten. *Steel slag* dihasilkan setiap hari secara bersamaan dengan pembuatan besi. Karena jumlah *slag* yang di-*tapping* dari *furnace* biasanya tidak diukur secara rutin, tingkat keluaran *steel slag* biasanya diperkirakan secara luas berdasarkan rasio produksi *slag* ke *crude steel*. Untuk kadar bijih besi yang tinggi (60–66% besi), BOF biasanya menghasilkan sekitar 0,25–0,30 ton *slag* per ton *crude steel* yang diproduksi (Wang G, 2014).

2.2 *Steel Slag*

Slag adalah produk sampingan dari proses ekstraksi dan pemurnian logam. Sebagian besar *slag* merupakan campuran oksida yang dihasilkan dalam proses peleburan atau pemurnian dan berasal dari bahan pengotor bijih, fluks, dan erosi refraktori. Secara umum, terdapat dua jenis *slag* yang dibedakan berdasarkan penyusun bijih logam utamanya, pertama yaitu *ferrous slag* yang dihasilkan dari proses pembuatan besi dan baja atau proses produksi *ferroalloy*, kemudian *non-ferrous slag* yang dihasilkan dalam ekstraksi logam lain selain besi (Yu, 2018). Dalam proses primer, *crude steel* diproduksi dengan dua cara. Pada metode pertama, besi diproduksi dari bijih di BF, sehingga menghasilkan *slag* BF (BFS). BOF *slag* (BOFS) diproduksi dalam proses pembuatan baja dengan menggunakan

besi cair yang berasal dari BF. Pada metode kedua, *slag* dihasilkan di industri baja berbasis *scrap*. Tahap pertama produksi industri baja berbasis *scrap* menghasilkan EAF *slag* (EAFS) dan tahap kedua dilakukan untuk memurnikan baja cair (Thomas *et al.*, 2018). Komposisi kimia dan fisik *steel slag* sebelum menjalani perlakuan dan pemrosesan khusus, pada dasarnya bergantung pada jenis proses pembuatan baja dan kadar baja yang dihasilkan. Namun, secara umum komposisi kimia dan mineral serta sifat fisik *slag* dari BOF dan EAF secara keseluruhan adalah serupa. Beberapa *steel slag* mengandung sejumlah kecil V_2O_5 dan TiO_5 . Berikut merupakan komposisi kimia dan sifat fisik *steel slag* yang dapat dilihat pada tabel 2.1 dan 2.2 berikut.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia *Steel Slag* (Klug *et al.*, 2022)

Komposisi Kimia	Kandungan (%)
CaO	42.14
T. Fe	27.42
SiO ₂	8.86
MgO	8.68
Al ₂ O ₃	1,75
P ₂ O ₅	1.98
MnO	1.95

Tabel 2.2 Sifat Fisik *Steel Slag* (Piemonti *et al.*, 2021)

Sifat Fisik	Satuan	Nilai
Massa jenis	Kg/m ³	3100-3600
Berat	Kg/m ³	2980-3580
Permukaan	Cm ² /g	4510-4530
Warna	-	Abu-abu /hitam Abu-abu/coklat Abu-abu/coklat putih
Daya serap air	%	0,7-4,23
Kadar air	%	1,56-13
<i>Grindability index</i>	-	0,7
<i>Crushing value</i>	%	21
<i>Impact value</i>	%	16

Komposisi mineral dari *steel slag* berkaitan dengan proses pembentukan dan komposisi kimianya. *Steel slag* terdiri dari dikalsium silikat (Ca_2SiO_4), trikalsium silikat (Ca_3SiO_5), campuran kristal MgO, FeO, dan MnO; yaitu, $\text{MgO}\cdot\text{MnO}\cdot\text{FeO}$, yang disebut sebagai fasa RO, dikalsium aluminoforit ($\text{Ca}_2(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})_2\text{O}_5$), dan *free*-CaO (Guo *et al.*, 2018). Berikut merupakan bentuk fisik dari BOF *slag* yang dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut



Gambar 2.2 *Steel Slag*

2.3 Pemanfaatan *Steel Slag*

Pada awalnya, pengolahan *slag* dilakukan dengan cara ditampung, dimana metode tersebut tidak diinginkan karena beberapa alasan seperti memerlukan banyak lahan, hilangnya sumber daya mineral yang berguna, dan merusak lingkungan. Pada sebuah tambang di Calaveras County (California), pemaparan *slag* ke tanah dan air telah menghasilkan konsentrasi Cd, Cu, dan Zn di air permukaan yang melebihi pedoman toksisitas untuk perlindungan kehidupan air. Dari peristiwa tersebut, jelas bahwa pengolahan *slag* untuk pemanfaatan menjadi bahan yang ramah lingkungan sangat diinginkan, dan semakin menjadi kewajiban. Dengan meningkatnya perhatian tentang pembangunan berkelanjutan, emisi rumah kaca, dan penekanan pada pengurangan bahan, penggunaan kembali, dan daur ulang, maka penggunaan *slag* dikembangkan untuk mengurangi dampak potensi lingkungan dan untuk sumber daya alam berkelanjutan, dengan pengembalian finansial, daripada biaya pembuangan.

Slag merupakan *by-product* dari proses pembuatan baja yang memiliki beberapa sifat kimia, fisik, serta mekanik yang mirip dan cocok dengan beberapa

bahan baku untuk sejumlah aplikasi di kehidupan. Karena terdapat beberapa karakteristik khusus dari *slag* tersebut yang kurang sesuai dengan standar, maka terdapat kemungkinan untuk mengubah atau memodifikasi sifat fisik dan kimia *slag* agar dapat menjadi pengganti bahan baku yang sesuai sehingga dapat digunakan untuk berbagai aplikasi. Terdapat dua fokus utama pengolahan *slag*, yaitu *recovery* elemen/mineral berharga dari *slag*, dan penggunaan kembali *slag* dalam aplikasi lain (Yu, 2018).

2.3.1 Pemisahan Fe dari *Steel slag*

Slag memiliki kandungan utama berupa besi (Fe) karena merupakan sisa proses ekstraksi bijih besi. Meskipun demikian, terdapat kandungan lain seperti Kalsium, Silika, Magnesium dan Alumina. Untuk memanfaatkan kembali *slag*, maka perlu pengolahan *slag* antara lain dengan mereduksi ukuran *slag* kemudian dilakukan proses konsentrasi menggunakan alat *magnetic separator* untuk memisahkan Fe. Fe metalik dan Fe oksida akan menempel pada drum dan masuk ke bagian fraksi magnetik sehingga diperoleh konsentrat total Fe. Dengan proses konsentrasi ini maka sisa komponen dalam *slag* atau dalam fraksi non-magnetik akan didominasi oleh kalsium dan silika. Pada penelitian pemisahan Fe dari *steel slag*, *recovery* Fe yang tinggi sebesar 65,7% dari *steel slag* dihasilkan dengan menggunakan *magnetic separator* tipe *low intensity* (LIMS) dan *high intensity* (HIMS) untuk memisahkan Fe metalik yang bersifat feromagnetik dan Fe oksida yang bersifat paramagnetik (Menad et al., 2014).

2.3.2 Penggunaan Kembali dalam Aplikasi Lain

Steel slag yang telah dilakukan pemisahan Fe, akan menghasilkan fraksi non-magnetik yang memiliki kandungan kalsium dan silika yang tinggi, serta besi atau Fe yang rendah. Kemudian, fraksi non-magnetik tersebut dapat dimanfaatkan menjadi berbagai aplikasi di luar pabrik metalurgi. Berbagai aplikasi tersebut antara lain menjadi agregat untuk bahan baku beton, konstruksi jalan, produksi pupuk, dan sebagainya. Berikut merupakan penjelasan dari berbagai pemanfaatan *steel slag* di luar pabrik metalurgi (Yu, 2018):

a. Pemanfaatan Agregat *Slag* sebagai Bahan Baku Beton

Slag memiliki bentuk bongkahan kecil dimana secara bentuk fisik menyerupai agregat kasar alami. Setelah dilakukan proses *magnetic separation*, masih terdapat sekitar 15% berat Fe pada fraksi non-magnetik *slag* BOF, dimana selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk produksi beton. Penelitian mengenai pemanfaatan potensi *steel slag* yang pernah dilakukan menunjukkan bahwa ketika persentase penggantian *steel slag* yang digunakan sebagai agregat halus yaitu berkisar antara 15% dan 30%, kuat tekan beton meningkat seiring dengan penambahan *slag* dalam beton (Guo *et al.*, 2018). Selain itu agregat beton dengan bahan baku *slag* BOF membutuhkan lebih sedikit air daripada agregat alami pada proses pencampuran dengan bahan baku beton lainnya (Kumara *et al.*, 2021).

b. Pemanfaatan Agregat *Slag* sebagai *Road Base*

Steel slag adalah bahan yang sangat padat dan keras. Karena nilai stabilitas yang tinggi, produksi aspal yang berkualitas tinggi menjadi mungkin karena stabilitas, kekerasan, dan sifat ikatannya. Agregat *slag* memiliki struktur angular atau sudut. Dengan demikian, *interlocking* partikel yang lebih rapat meningkatkan ketahanan aspal terhadap formasi lintasan roda. Penelitian mengenai pemanfaatan agregat *slag* untuk *road base* yang pernah dilakukan menunjukkan bahwa sampel yang mengandung partikel *steel slag* 80%, batu kapur yang terhidrasi 7%, dan silika 13% memiliki kekuatan tekan 36,2 MPa. setelah satu tahun, beton aspal yang mengandung agregat *steel slag* mengungguli beton aspal yang mengandung agregat alami dalam hal ketahanan selip (Gencel *et al.*, 2021).

c. Pemanfaatan *Slag* Sebagai Pupuk

Kandungan yang ada di dalam *steel slag* memiliki unsur yang menyusun komposisi pupuk dalam bentuk oksidanya. Misalnya Ca, Si, Mg, dan P yang terbentuk sebagai CaO, SiO₂, MgO, dan P₂O₅. Selain komponen tersebut, *slag* juga mengandung komponen seperti Fe₂O₃ dan MnO yang menjadi nutrisi untuk tanaman sehingga dapat digunakan untuk berbagai keperluan pertanian. Pada tahun 2011, dilakukan penelitian pengaruh *steel slag* sebagai pupuk Fe terhadap tanah berkapur yang

mengandung 16,83% Fe₂O₃ ditambah sejumlah besar kalsium, silikon, fosfor, dan mangan. Dari penelitian tersebut dihasilkan bahwa dengan menggunakan pupuk tersebut dapat meningkatkan pH tanah dan menjadi sumber ketersediaan Fe yang murah untuk mengurangi klorosis Fe pada berbagai tanaman di tanah berkapur (Torkashvand, 2011).

2.4 Proses Kominusi dan *Sizing*

Kominusi merupakan salah satu proses pada pengolahan mineral yang bertujuan untuk menghasilkan bijih dengan ukuran yang sesuai untuk tahap selanjutnya serta meningkatkan derajat liberasi (Wills *et al.*, 2006). Kominusi dibagi dalam dua tahapan, yaitu operasi peremukan (*crushing*) dan operasi penggerusan (*grinding*). *Crushing* merupakan proses reduksi ukuran partikel dari bongkahan bijih hingga ukuran yang dapat dilakukan pada operasi *grinding*. Umumnya *crushing* dilakukan dalam keadaan kering dan dilakukan dalam dua atau tiga tahap. *Grinding* merupakan proses penggerusan bijih material. Sama seperti *crushing*, *grinding* juga dapat dilakukan pada kondisi basah atau kering. Proses *grinding* akan membantu dalam proses pengolahan mineral selanjutnya yakni proses konsentrasi. Setelah bijih diremuk dan digerus, maka akan diperoleh bermacam-macam ukuran partikel. *Sizing* adalah proses pemisahan secara mekanik berdasarkan perbedaan ukuran partikel. *Sizing* harus dilakukan agar sesuai dengan ukuran yang dibutuhkan pada proses pengolahan yang berikutnya.

Reduksi ukuran pada *steel slag* diperlukan untuk membebaskan logam dan mineral pembawa logam yang selanjutnya akan dimanfaatkan kembali pada pabrik metalurgi. Secara umum, reduksi ukuran *steel slag* dicapai dengan proses peremukan dan penggerusan menggunakan energi yang intensif. Misalnya, ada dua cara utama untuk menghancurkan *steel slag*. Salah satunya adalah *multi-step crushing* yang melibatkan *jaw crusher*, *cone crusher*, *hammer/impact crusher*, diikuti dengan penggerusan dalam *ball mill* atau *rod mill* (Yu Q, 2018).

2.5 *Magnetic Separation*

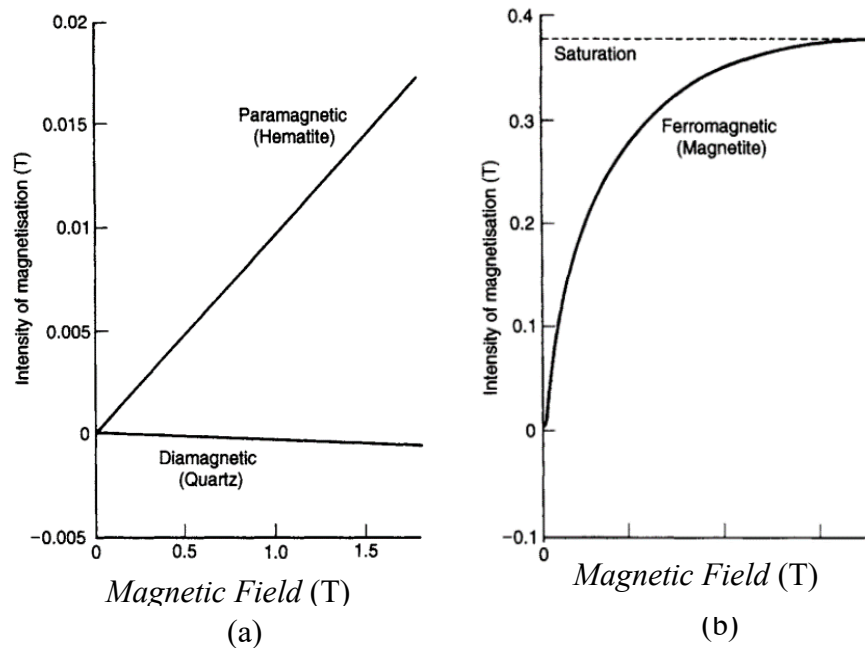
Di alam terdapat mineral yang apabila diletakkan pada medan magnet, mineral tersebut akan tertarik dan tidak tertarik oleh medan magnet. *Magnetic separation* merupakan proses pemisahan mineral menggunakan sebuah magnet. Prinsip dari *magnetic separation* adalah memisahkan mineral berharga dari pengotornya berdasarkan atas sifat kemagnetannya atau *magnetic susceptibility*. Efisiensi dari konsentrasi secara magnetik dapat dilihat dengan adanya *recovery* dan kadar pada hasil pemisahan. Pada metode konsentrasi ini terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses pemisahan, antara lain yaitu medan magnet, ukuran partikel mineral, kecepatan aliran fluida, kecepatan putaran drum, serta laju pengumpanan. Medan magnet yang lebih kuat akan meningkatkan perolehan mineral magnetik. Kemudian semakin besar kecepatan drum akan meningkatkan kecepatan fluida sehingga semakin tinggi nilai *recovery*. Lalu dengan ukuran partikel mineral yang lebih besar, perolehan mineral magnetik akan semakin meningkat (A.Gupta dan D.S.Yan, 2006).

2.5.1 *Magnetic Susceptibility*

Prinsip *magnetic separation* ialah memisahkan mineral berharga dari pengotornya berdasarkan sifat kemagnetannya atau *magnetic susceptibility*. *Magnetic susceptibility* merupakan sifat material yang menentukan mudah atau tidaknya material mengalami pengaruh dalam medan magnet. Menempatkan material apapun di dekat magnet, medan magnet eksternal yang diterapkan menciptakan medan magnet yang diinduksi di dalam material. Kekuatan medan magnet eksternal disebut *magnetic field*, H ($A\ m^{-1}$). Sedangkan magnetisasi yang diinduksi dalam material, disebut sebagai intensitas magnetisasi (*intensity of magnetization*), M ($A\ m^{-1}$). Sifat kemagnetan (*magnetic susceptibility*), χ adalah rasio dari gaya magnetisasi yang diterapkan dalam material terhadap intensitas magnetisasi yang diinduksi dalam material, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M = \chi H \dots \dots \dots (2.1)$$

Hubungan antara gaya magnetisasi dan intensitas magnetisasi pada material dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Kurva Magnetisasi (a) Material Diamagnetik dan Paramagnetik, serta (b) Feromagnetik (Wills *et al.*, 2006)

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa untuk material diamagnetik dan paramagnetik didapat hubungan yang linier. Namun, tidak demikian bagi material feromagnetik. *Slope* atau kemiringan kurva merupakan nilai *magnetic susceptibility* suatu material. Berikut merupakan penjelasan untuk ketiga material tersebut (Yu, 2018):

- a. Feromagnetik, merupakan material yang memiliki gaya tarik yang kuat terhadap medan magnet. Nilai *magnetic susceptibility* (χ) material feromagnetik adalah positif dan besar. Nilai *magnetic susceptibility* mineral ini biasanya lebih besar dari $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Interaksi antara atom-atom dalam material feromagnetik begitu kuat sehingga momen semua atom dalam suatu daerah mengarah sesuai dengan medan magnet luar yang diinduksikan. Contoh mineral feromagnetik antara lain yaitu

magnetit, maghemit, magnesium ferit. Mineral yang bersifat feromagnetik dapat mudah dipisahkan dengan intensitas medan magnet yang lemah dari ratusan hingga 2000 G.

- b. Paramagnetik, merupakan material yang memiliki gaya tarik yang lemah terhadap medan magnet. Nilai *magnetic susceptibility* (χ) material yang bersifat paramagnetik bernilai positif tetapi kecil. Nilai *magnetic susceptibility* mineral tersebut berkisar dari 1×10^{-7} ke $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Interaksi antaratom pada material ini lemah. Momen magnetnya tersebar acak, tetapi jika diberi medan magnet luar, momen tersebut akan menyejajarkan arah dengan medan luar tersebut. Contoh mineral paramagnetik antara lain yaitu wüstit, hematit, dan ilmenit. Mineral yang bersifat paramagnetik dapat dipisahkan dalam intensitas medan magnet yang lebih tinggi dari 2000 G.
- c. Diamagnetik, merupakan material yang jika diletakkan dalam medan magnet akan ditolak lemah oleh medan magnet tersebut. Material ini memiliki nilai suseptibilitas (k) negatif dan kecil. Nilai *magnetic susceptibility* mineral tersebut lebih rendah dari $1 \times 10^{-7} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Orientasi elektron orbital (elektron paling luar) material ini selalu berlawanan arah dengan medan magnet luar sehingga medan totalnya selalu berkurang atau saling meniadakan. Contoh mineral diamagnetik antara lain yaitu kalsit dan kuarsa dimana material ini tidak dapat dipisahkan dengan pemisahan magnetik konvensional. Nilai *magnetic susceptibility* untuk setiap mineral yaitu berbeda, pemisahan dapat

dicapai dengan memvariasikan medan magnet. Tabel 2.3 menampilkan nilai *magnetic susceptibility* dari beberapa mineral yang terdapat pada *steel slag* (Yu, 2018).

Tabel 2.3 *Magnetic Susceptibility* Mineral dalam *Steel Slag* (Yu, 2018)

Mineral		<i>Magnetic Susceptibility</i> ($10^{-8} \times \text{m}^3\text{kg}^{-1}$)
Kalsit	CaCO_3	-0.3 – 1.4
Kuarsa	SiO_2	-0.5 – 0.6
Wüstit	FeO	130
Hematit	Fe_2O_3	10-760
Magnetit	Fe_3O_4	20,000 – 110,000
Maghemit	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	40,000 – 50,000

Saat pemisahan, pada setiap partikel mineral akan bekerja beberapa gaya. Gaya-gaya yang bekerja tersebut akan tergantung pada alat (*separator*) yang digunakan. Dalam proses pemisahan yang menggunakan *drum separator* misalnya, akan bekerja empat gaya pada partikel mineral. Proses pemisahan secara magnetik sendiri akan bergantung pada kompetisi gaya-gaya (*competing forces*) tersebut yang dimiliki tiap-tiap partikel mineral.

1. Gaya magnetik (F_m), gaya magnet akan mempengaruhi medan magnet yang ditimbulkan. Ketika mineral diletakkan pada medan magnet yang berada pada permukaan *drum*, maka mineral tersebut akan mengalami gaya magnet. Gaya magnet akan mempengaruhi banyak atau sedikitnya

mineral yang dapat tertarik sehingga terpisah menjadi fraksi magnetik dan non-magnetik.

$$F_m = -32\pi^2 \frac{H_d}{\theta_d R} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

$$\pi = \text{pi} = 3,14$$

H_d = kekuatan medan magnet di permukaan drum (A/m)

θ_d = sudut antara kutub magnet

R = diameter drum (m)

2. Gaya gravitasi (F_g), merupakan gaya yang bergantung pada densitas dari mineral yang akan dipisahkan.

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_s^3 (\rho_s - \rho_f) g \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

$$\pi = \text{pi} = 3,14$$

d_s = diameter partikel (m)

ρ_s = densitas partikel (gr/cm³)

ρ_f = densitas fluida (gr/cm³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

3. Gaya gesek hidrodinamik / *hydrodynamic drag* (F_d), adalah gaya yang menghambat pergerakan sebuah benda padat melalui sebuah fluida. Untuk *dry magnetic separator*, gaya magnet harus cukup kuat untuk menahan mineral magnetik dan melawan gaya gravitasi. Sedangkan untuk *wet magnetic separator*, gaya magnet harus cukup kuat untuk menahan mineral magnetik dan melawan gaya *drag* dari aliran fluida.

$$F_d = 3\pi d_s v \eta \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

$$\pi = \text{pi} = 3,14$$

d_s = diameter partikel (m);

v = kecepatan pengendapan (m/s)

η = viskositas fluida ($\text{gr}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

4. Gaya sentrifugal (F_c), adalah gaya yang berperan penting untuk melepaskan mineral dari drum *magnetic separator*.

$$F_c = \rho_s V \omega^2 R \dots\dots\dots (2.4)$$

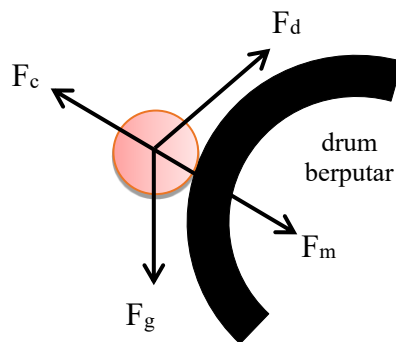
Keterangan:

ρ_s = densitas partikel (gr/cm^3)

V = volume partikel (m^3)

ω = kecepatan sudut/anguler drum (rad/s)

R = diameter drum (m)



Gambar 2.4 Gaya pada *Magnetic Separator* (Yu, 2018)

2.5.2 Jenis Magnetic Separator

Berdasarkan intensitas medan magnet, *magnetic separator* terbagi menjadi dua tipe yaitu *low intensity magnetic separation* (LIMS) dan *high intensity magnetic separation* (HIMS). Pada HIMS biasanya digunakan untuk memisahkan mineral yang bersifat paramagnetik. Jenis ini memiliki intensitas medan magnet sampai 20.000 G. Biasanya proses pemisahan pada HIMS terbatas untuk memproses partikel yang lebih halus dari 1 mm. *Low intensity magnetic separation* (LIMS), digunakan untuk memisahkan partikel yang bersifat ferromagnetik. Intensitas medan magnet pada tipe LIMS berkisar antara ratusan sampai 3000 G (Z.M. Dogan, 1987).

2.5.3 Neraca Kesetimbangan

Neraca kesetimbangan atau *material balance* adalah suatu neraca pada pengolahan mineral dimana masa umpan yang masuk dalam proses akan sama dengan masa produk yang keluar. Pada pengolahan mineral, terdapat dua produk yang dihasilkan, yaitu konsentrat dan tailing. Pada proses konsentrasi menggunakan *magnetic separator*, konsentrat merupakan mineral berharga yang terpisah karena tertarik oleh gaya magnet. Sedangkan *tailing* merupakan unsur pengikat pada mineral berharga, biasanya disebut unsur pengotor yang tidak akan tertarik oleh gaya magnet. Untuk mencari nilai konsentrat dan *tailing* hasil pemisahan, maka digunakan rumus berikut (Pujangga et al., 2018):
$$F = C + T \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

F = Berat material umpan/*feed* (ton atau kg)

C = Berat konsentrat (ton atau kg)

T = Berat *tailing* (ton atau kg)

Lebih lanjut, kadar suatu mineral dalam umpan, konsentrat dan *tailing* adalah f, c, t maka kesetimbangan menjadi:

$$F.f = C.c + T.t \dots \dots \dots (2.6)$$

Setelah didapatkan data dari tiap fraksi yang terdapat pada konsentrat dan *tailing*, kemudian data tersebut digunakan untuk mencari nilai *recovery* nya.

Recovery adalah massa material berharga yang dihasilkan dari suatu proses.

Rumus dari *recovery* yaitu sebagai berikut:

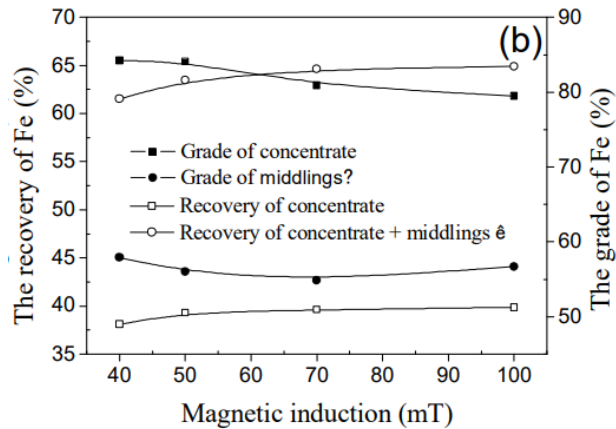
$$\% \text{ recovery} = \frac{C.c}{F.f} \times 100\% \dots \dots \dots (2.7)$$

2.5.4 Penelitian Pemisahan Fe dari Steel Slag

Recovery logam dari *slag* telah dipelajari dan digunakan selama beberapa tahun dengan berbagai jenis metode yang dilakukan. Metode *recovery slag* dikategorikan menjadi dua bagian yaitu metode fisik dan metode kimia. Metode fisik menggunakan perbedaan dalam satu atau beberapa sifat fisik *slag* dari logam/mineral yang diinginkan, misalnya densitas dan sifat magnetik. Pada metode kimia, terjadi reaksi kimia dalam proses sehingga menyebabkan perubahan senyawa pada *slag* (Yu, 2018). Kandungan Fe dapat di-*recovery* dengan *magnetic separation* atau *leaching*. Tetapi metode yang paling umum digunakan adalah *magnetic separation*, karena unit operasi yang sederhana (Das *et al.*, 2021).

Pada penelitian *recovery* Fe dari *steel slag* menggunakan *magnetic separator* dengan ukuran partikel sebesar 0,1; 0,5; 2; 3; dan 5 mm menggunakan intensitas medan magnet yaitu 400-2000 G pada mineral feromagnetik, mencapai kondisi optimum pada 1000 G dengan kadar Fe yang diperoleh adalah 37,45% dan *recovery* 60,23% (Bölükbaşı and Tufan, 2014). Penelitian tersebut tidak membahas tentang pemisahan mineral paramagnetik. Kemudian, penelitian tentang teknik pemisahan secara magnetik dengan intensitas rendah dan tinggi digunakan untuk *recovery* Fe yang bersifat paramagnetik dari BOF *slag*.

Pemisahan Fe menggunakan kombinasi *magnetic separator* tipe LIMS dan HIMS dengan ukuran partikel 0,063 mm dan variasi intensitas medan magnet dari 900 hingga 16200 G, didapatkan nilai *recovery* Fe optimum pada intensitas medan magnet sebesar 3600 G yaitu 65,7% dalam fraksi magnetik dan 34,3% dalam fraksi non-magnetik. Dari hasil tersebut, pada fraksi non-magnetik kandungan Fe menurun hingga menjadi sebesar 14,2%, sedangkan senyawa CaO dan SiO₂ meningkat menjadi sebesar 51.1% dan 17.2% (Menad et al., 2014) . Berikut merupakan tabel kadar dan *recovery* kandungan utama *steel slag* dengan kombinasi LIMS dan HIMS yang dapat dilihat pada tabel 2.4.

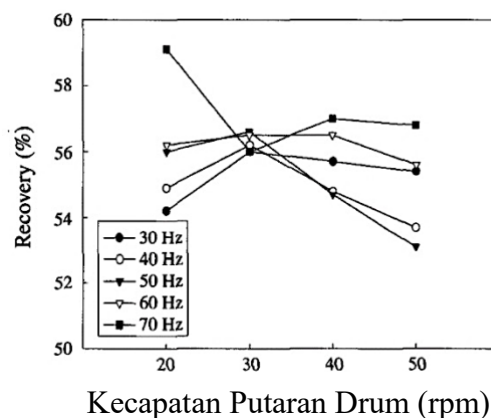


Tabel 2.4 Kadar dan Perolehan Senyawa Penting *Slag* Hasil Pemisahan kombinasi LIMS dan HIMS (Menad et al., 2014)

Produk	Wt.%	T.Fe	ρ T.Fe	CaO	ρ CaO	SiO ₂	ρ SiO ₂
Fraksi Magnetik	39,4	34,9	65,7	35,8	31	11,7	34,7
Fraksi Non Magnetik	50,4	14,2	34,3	51,1	56,5	17,2	65,3

Pada beberapa penelitian tersebut, dilakukan variasi intensitas medan magnet. Hubungan antara intensitas medan magnet dengan *recovery* dan kadar Fe yaitu semakin meningkat intensitas medan magnet maka *recovery* akan meningkat tetapi kadar menurun. Hal tersebut karena semakin banyak material yang akan menempel pada drum dan masuk ke dalam fraksi magnetik sehingga *recovery* meningkat, tetapi semakin banyak material pengotor yang masuk ke dalam fraksi magnetik sehingga kadarnya menurun (Chen et al., 2015). Berikut merupakan grafik hubungan antara intensitas medan magnetik dan *recovery* Fe pada gambar 2.4.

Selain intensitas medan magnet, kecepatan putaran drum serta frekuensi getaran *feed* juga menjadi faktor lain yang mempengaruhi pemisahan *slag* menggunakan *magnetic separator*. Pengaruh frekuensi getaran tersebut akan mempengaruhi *feed rate*, dimana bersama dengan kecepatan putaran drum akan menghasilkan pengaruh terhadap keefektifan pemisahan *slag*. Semakin tinggi kecepatan putaran drum, maka *recovery* menurun. Hal tersebut karena material magnetik akan sulit menempel pada drum sehingga masuk ke dalam fraksi non-magnetik. Gambar 2.5 menunjukkan hasil uji pemisahan magnetik *steel slag*. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa *recovery* paling tinggi dihasilkan pada frekuensi getaran *feed* 70 Hz dan kecepatan putaran drum 20 rpm (Ban et al., 2003).



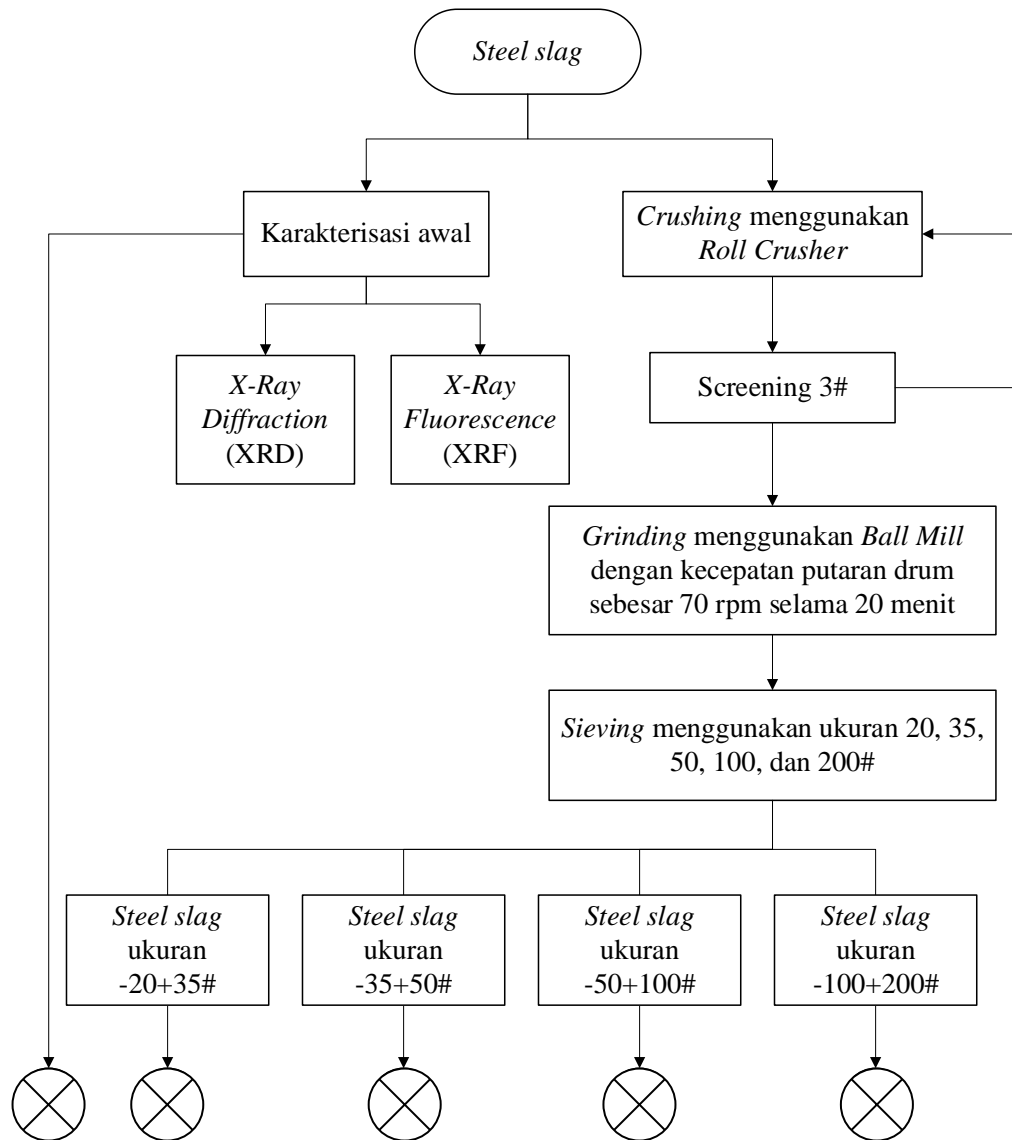
Gambar 2.6 Hubungan antara Kecepatan Putaran Drum terhadap *Recovery Fe* (Ban et al., 2003)

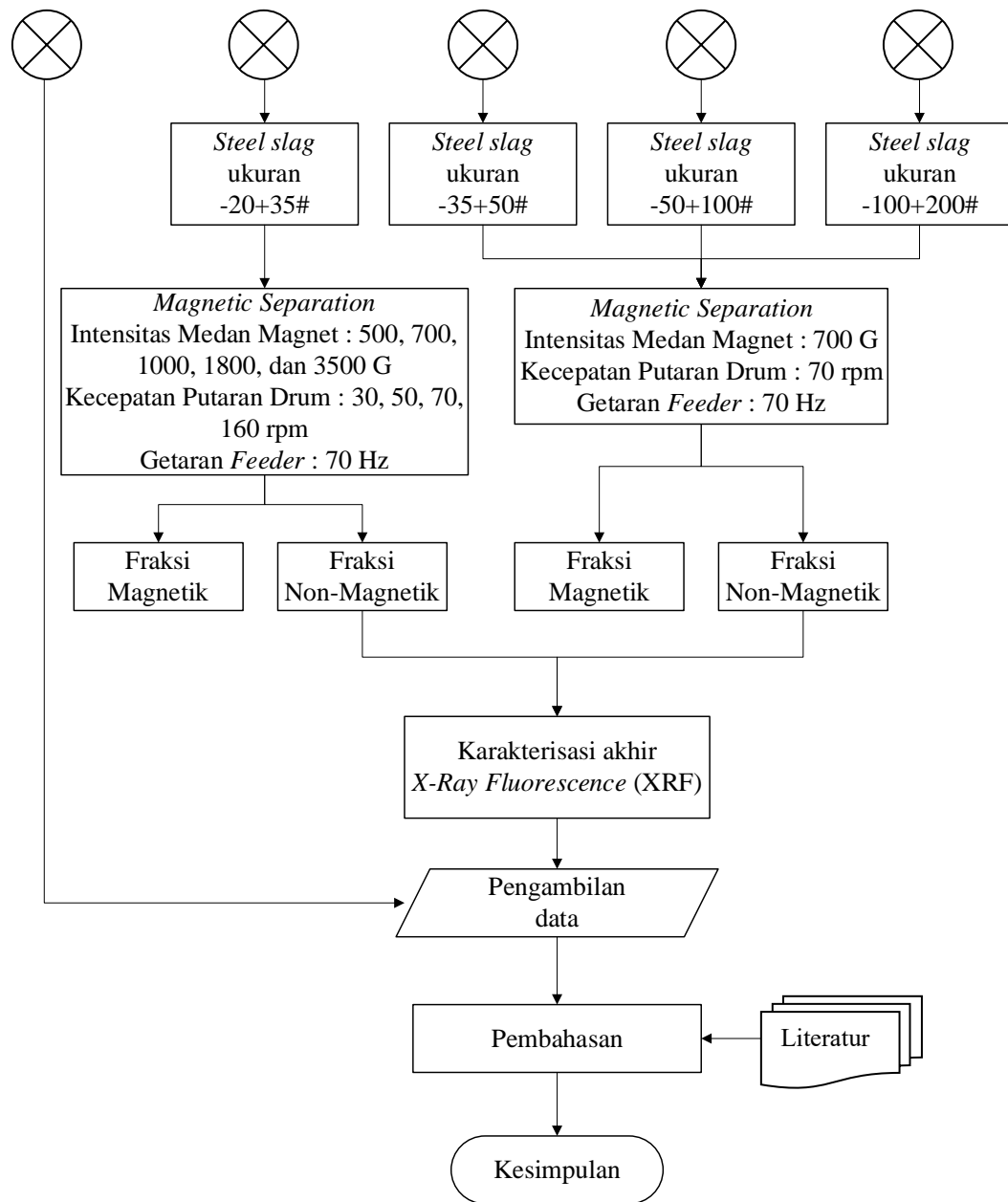
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan tahapan proses penelitian yang dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan bahan

3.2.1 Alat yang digunakan

Berikut adalah alat-alat yang digunakan pada penelitian ini:

1. Alat uji *X-ray Diffraction* (XRD)

- Merk : Rigaku

- Tipe : Miniflex 600
 - Standar kalibrasi : Si SRM-640D
2. *Alat uji X-ray Fluorescence (XRF)*
 - Merk : Rigaku
 - Tipe : Nex-DE
 - Standar kalibrasi : MCA calibration
 3. *Ball Mill*
 4. *Gauss Meter*
 - Merk : Lutron
 - Tipe : MG-3002
 5. *Roll Crusher*
 6. *Magnetic Separator*
 - Merk : Carpco DS-600-C
 - Tipe : *Lift Type Induced Dry Magnetic Separator*
 7. *Neraca Digital*
 8. *Sieve ukuran 20#, 35#, 100#, dan 200#*
 9. *Sieve machine*
 10. *Stopwatch*
 11. *Tachometer*
 - Merk : CEM
 - Tipe : AT-8

3.2.2 Bahan yang digunakan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. *Steel Slag* yang berasal dari *Basic Oxygen Furnace* berukuran $\pm 30-50$ mm.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pengolahan Bahan Galian Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan Institut Teknologi Bandung. Adapun karakterisasi awal sampel yaitu dilakukan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *X-Ray Fluorescence* (XRF) di Laboratorium Sistemika Indonesia. Prosedur percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi beberapa tahapan proses. Tahapan proses yang dilakukan antara lain, proses karakterisasi awal dengan dilakukan pengujian XRD dan XRF, kemudian proses kominusi yaitu peremukan (*crushing*) dan penggerusan (*grinding*) yang dilanjutkan dengan pengayakan (*sieving*), lalu proses konsentrasi magnetik (*magnetic separation*), dan analisis komposisi akhir.

3.3.1 Karakterisasi Awal

Proses karakterisasi awal sampel *steel slag* dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui senyawa yang terdapat pada *steel slag* berdasarkan standar JCPDS-ICDD. Pada pengujian ini, sampel disiapkan sebanyak 5 gram. Setelah itu sampel diletakkan pada *holder* pada kaca slide mikroskop, serta dilakukan pengukuran sebelum masuk ke dalam mesin

XRD, selanjutnya dilakukan pengujian dengan sudut 2θ yang digunakan sebesar 20° - 90° . Dihasilkan grafik hubungan antara intensitas dan 2θ (grafik difraktogram) dari hasil perekaman sampel. Selanjutnya grafik tersebut dianalisis menggunakan *software High Score Plus* (HSP). Berikut merupakan gambar 3.2 yang menunjukkan mesin XRD yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.2 Alat Uji *X-Ray Diffraction* (XRD) (Rigaku Corporation, 2023)

Selain pengujian XRD, dilakukan juga pengujian XRF untuk menganalisis komposisi unsur awal dalam sampel *steel slag* secara cepat. Pada pengujian ini, sampel disiapkan sebanyak 5 gram, selanjutnya sampel dipreparasi menjadi bentuk koin menggunakan alat press. Lalu *holder* disiapkan, kemudian bagian bawah *holder* ditutup menggunakan plastik transparan. Selanjutnya sampel dimasukkan ke dalam *holder*. Selanjutnya mesin XRF dioperasikan, lalu *software* yang akan digunakan dipilih untuk melakukan analisis. Pada pengujian XRF, *output* yang diperoleh berupa data komposisi unsur yang terkandung pada sampel dalam satuan persen. Berikut

merupakan gambar 3.3 yang menunjukkan mesin XRF yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.3 Alat Uji *X-Ray Fluorescence* (XRF) (Rigaku Corporation, 2023)

3.3.2 *Crushing*

Tahapan awal pada proses kominusi *steel slag* adalah melakukan proses *crushing* atau peremukkan. Pada penelitian ini proses *crushing* dilakukan menggunakan *roll crusher*. *Steel slag* dengan ukuran *feed* sebesar 30-50 mm diremukkan secara bertahap dengan cara mengatur *gap* kedua *roll* dari jarak yang besar yaitu 2,5 cm, hingga yang kecil yaitu 0,3 cm. Tahap pertama yaitu dengan memasukkan *feed* ke dalam *roll crusher* dengan ukuran *gap* sebesar 2,5 cm. Setelah melewati tahap pertama, lalu *gap* diatur sehingga menjadi sebesar 0,3 cm, kemudian dilakukan peremukkan ulang dengan ukuran *gap* tersebut. Setelah proses *crushing* selesai, maka dilakukan proses *sieving* dgn *sieve* berukuran 3#. Sampel hasil proses *crushing* dengan ukuran -3# akan masuk ke tahap *grinding*,

sedangkan yang berukuran +3# dilakukan *crushing* kembali. Berikut merupakan *steel slag* sebelum dan setelah dilakukan proses *crushing*, serta *roll crusher* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.4.

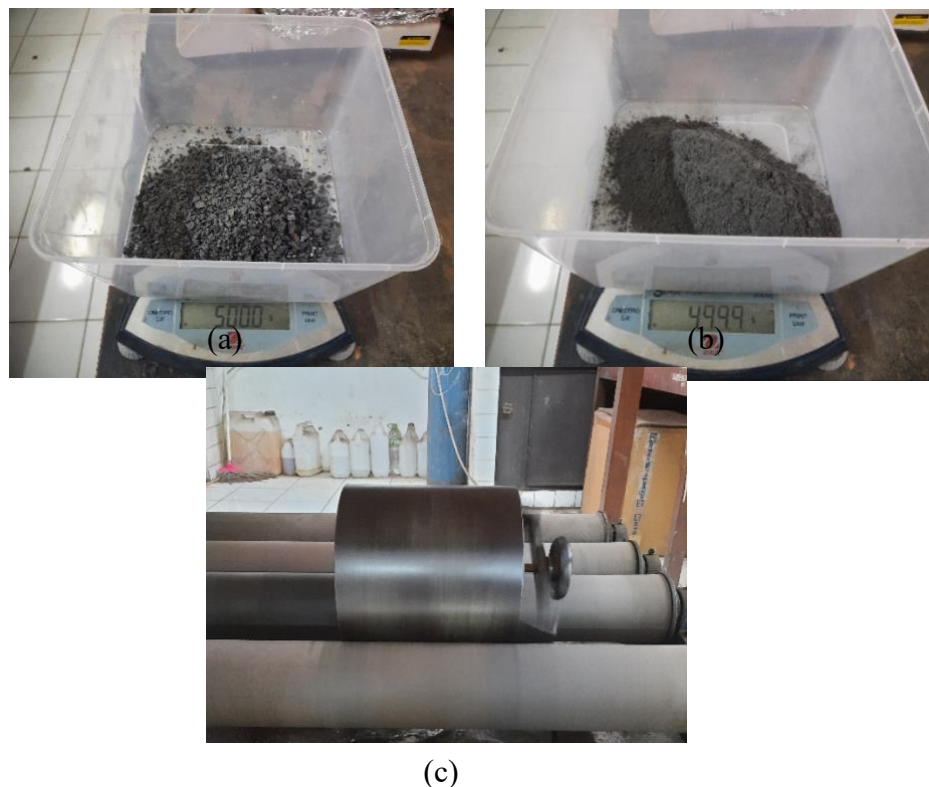


Gambar 3.4 Sampel *Steel slag* (a) sebelum proses *crushing* (b) setelah proses *crushing* (c) *Roll Crusher*

3.3.2 Grinding

Setelah dilakukan proses *crushing*, tahapan kominusi selanjutnya yaitu proses *grinding* (penggerusan). *Steel slag* dengan ukuran -3# digerus dengan metode *dry process* menggunakan *ball mill* dimana alat tersebut

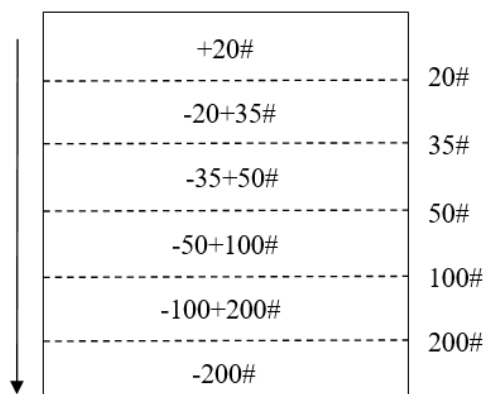
berbentuk *jar* yang diletakkan di antara dua silinder yang berputar. Adapun pada proses ini menggunakan media penggerus berupa bola baja dengan ukuran diameter 2 cm dan 2,5 cm. Sampel *steel slag* yang digunakan sebanyak 500 gram untuk sekali proses *grinding*. Kemudian rasio jumlah *feed* dan media bola baja yang diisikan ke dalam *jar* yaitu 10 : 1. Proses penggerusan dilakukan selama 20 menit dengan kecepatan putaran drum yaitu sebesar 70,8 rpm. Berikut merupakan *steel slag* sebelum dan setelah proses *grinding*, serta *ball mill* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Sampel *Steel slag* (a) sebelum proses *grinding* (b) setelah proses *grinding* (c) *Ball Mill*

3.3.3 Sieving

Setelah dilakukan proses *grinding* selanjutnya dilakukan proses *sieving* atau pengayakan. Proses ini bertujuan untuk mengelompokkan sampel hasil proses *grinding* berdasarkan ukurannya ke dalam beberapa fraksi ukuran sesuai *sieve* yang digunakan. Pada penelitian ini, ukuran *sieve* yang digunakan ditentukan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) ukuran partikel pada produk agregat dan pupuk yaitu 20, 35, 50, 100, dan 200#. Proses *sieving* dilakukan menggunakan *sieve shaker*. Proses *sieving* dilakukan selama 15 menit untuk setiap hasil dari satu kali proses *grinding*. Adapun pada penelitian pemisahan Fe dari *steel slag* ini, fraksi ukuran yang digunakan yaitu -20+35#, -35+50#, -50+100, dan -100+200#. Setelah proses *sieving* selesai, lalu dilakukan penimbangan massa pada tiap fraksi ukuran tersebut. Berikut merupakan skema proses *sieving* yang dilakukan yang dapat dilihat pada gambar 3.6, serta *sieve shaker* dan hasil proses *sieving* yang dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.6 Skema Proses *Sieving*



(a)



(b)

Gambar 3. 7 (a) *Sieve Shaker* yang digunakan (b) Sampel Hasil Proses *Sieving*

3.3.4 Proses Konsentrasi Magnetik

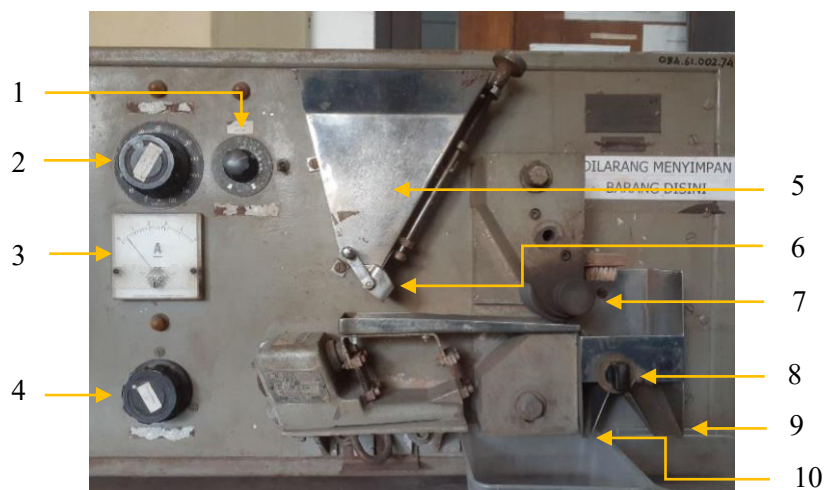
Proses konsentrasi bertujuan untuk memisahkan mineral berharga dengan pengotornya. Pada percobaan ini proses konsentrasi dilakukan menggunakan metode *magnetic concentration*. Metode tersebut dapat memisahkan tiap mineral berdasarkan sifat kemagnetannya (*magnetic susceptibility*). Alat yang digunakan pada proses magnetic separation ini yaitu *Dry Lift Type Induction Magnetic Separator*. Proses pemisahan secara magnetik ini menggunakan intensitas medan magnet (*magnetic field*) dan kecepatan putaran rol (*roll magnet speed*) yang berbeda-beda, tetapi getaran *feeder* yang sama.

Prosedur dalam mengoperasikan alat *magnetic separator* ini yaitu mengatur bukaan *feeder* dan *splitter*. Selanjutnya yaitu mengatur jumlah arus yang keluar dengan cara memutar tombol pengatur arus bersamaan dengan melihat jarum penunjuk arus yang tertera pada alat tersebut. Untuk

mengetahui besar intensitas medan magnet yang dihasilkan dari arus yang dikeluarkan maka dilakukan pengecekan menggunakan *gaussmeter*, dimana *gaussmeter* merupakan alat untuk mendeteksi intensitas medan magnet suatu benda. Setelah mengatur intensitas medan magnet, selanjutnya yaitu mengatur *roll magnet speed*. Untuk mengetahui ketepatan dari besar putaran rol, maka dilakukan pengecekan menggunakan *tachometer*, dimana *tachometer* merupakan alat untuk mendeteksi kecepatan putaran suatu benda. Variabel lain yang bisa diatur yaitu getaran *feeder*, mengaturnya yaitu dengan memutar tombol pengatur getaran feeder tersebut.

Ketika semua variabel sudah diatur selanjutnya membuka penutup *feeder* secara perlahan sehingga *feed* akan keluar dan bergerak menuju *magnetic roll*. Di bawah *magnetic roll* tersebut, kemudian terjadi proses pemisahan antara partikel *steel slag* yang bersifat magnetik dan non-magnetik. Partikel yang bersifat magnetik akan tertarik naik dan menempel ke *magnetic roll* lalu akan jatuh masuk ke tempat fraksi magnetik. Adapun partikel yang bersifat non-magnetik tidak menempel pada *magnetic roll* tetapi langsung jatuh ke tempat fraksi non-magnetik. Pada penelitian ini dilakukan dua percobaan pemisahan steel slag dengan metode *magnetic separation*, pertama yaitu untuk mengetahui variabel intensitas medan magnet dan kecepatan putaran rol magnet yang optimum pada salah satu fraksi ukuran. Setelah diketahui variabel yang optimum, kemudian dilakukan percobaan kedua yaitu pemisahan steel slag pada berbagai fraksi ukuran menggunakan variabel optimum yang telah diketahui.

- a. Percobaan 1, yaitu percobaan tersebut dilakukan dengan pemisahan secara magnetik pada variasi *magnetic field* sebesar 500, 700, 1000 dan 1800 Gauss serta variasi *roll magnet speed* sebesar 20, 30, dan 50 rpm. Kemudian variabel lain yang nilainya tetap yaitu frekuensi getaran pada feeder sebesar 70 Hz. Setelah dilakukan proses pemisahan magnet pada fraksi ukuran -20+35#, kemudian diperoleh variabel *magnetic field* dan *roll magnet speed* yang optimum.
- b. Percobaan 2, yaitu percobaan untuk melakukan proses *magnetic separation* pada fraksi ukuran -35+50#, -50+100#, dan -100+200# dengan variabel optimum yang didapatkan dari percobaan 1. Hal tersebut dilakukan agar dapat mengetahui komposisi akhir pada tiap fraksi ukuran yang nantinya akan diaplikasikan sebagai bahan baku agregat dan pupuk.



Gambar 3.8 *Dry Lift Type Induction Magnetic Separator*

Keterangan:

1. Pengatur getaran *feeder*
2. Pengatur *Roll Magnet Speed*
3. Indikator Arus
4. Pengatur Arus
5. *Feeder*
6. Bukaan *Feeder*
7. *Roll Magnet*
8. *Splitter*
9. *Magnetic Outlet*
10. *Non-Magnetic Outlet*

3.3.5 Analisis Komposisi Akhir

Proses analisis komposisi akhir dilakukan untuk mengetahui kadar Fe pada *steel slag* setelah dilakukan proses *magnetic separation*. Analisis akhir dilakukan dengan cara menganalisis produk hasil proses konsentrasi magnetik secara kimia, baik fraksi magnetik maupun non-magnetik untuk setiap variabel *magnetic field* dan *roll magnet speed* yang dilakukan menggunakan metode XRF (*X-Ray Fluoresence*). Analisis akhir tersebut bertujuan untuk membandingkan karakterisasi hasil dari tahapan proses yang dilakukan dengan karakteristik awal sampel. Data hasil perbandingan tersebut berfungsi untuk mengetahui variabel optimum yang akan digunakan pada proses pemisahan *steel slag*.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Awal *Steel Slag*

Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan *slag* hasil dari proses *steelmaking* menggunakan *Basic Oxygen Furnace* (BOF) pada suatu pabrik baja di Kota Cilegon. Sampel *slag* yang digunakan belum diketahui karakteristiknya, sehingga harus dilakukan proses karakterisasi awal. Proses karakterisasi awal dilakukan dengan menggunakan teknik XRD dan XRF, serta dilakukan analisa ayak. Hasil karakterisasi yang diperoleh dari XRD berupa difraktogram, dan dari XRF berupa komposisi kimia.

4.1.1 Analisis Komposisi *Steel Slag*

Analisa XRD dan XRF dilakukan untuk mengetahui senyawa dominan dan komposisi unsur kimia yang terkandung di dalam slag. Hasil analisa XRD steel slag dapat dilihat pada Gambar 4.1. Gambar 4.1 menunjukkan bahwa senyawa yang terdapat di dalam steel slag adalah Fe_3O_4 , CaCO_3 , SiO_2 , CaSiO_3 , dan MgO . Agar memperoleh informasi komposisi unsur kimia maka dilakukan karakterisasi menggunakan analisa XRF. Hasil analisa XRF dapat dilihat pada Tabel 4.1. Tabel 4.1 menunjukkan bahwa unsur yang dominan terkandung pada sampel steel slag ini adalah Ca, yaitu sebanyak 42.12%. Unsur Ca sudah memasuki kadar standar pupuk dolomit yaitu minimum 29%

Berdasarkan Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa komposisi utama limbah PCB sebelum dilakukan proses pemisahan yaitu Cu, Si, Br, Sn, Ca, dan Al. Unsur Cu pada PCB digunakan sebagai *base metal*. Unsur Si dan Ca yang termasuk non logam digunakan sebagai bahan baku pembuatan *fiberglass* pada bagian substrat PCB (Ruan *et al.*, 2018). Unsur Sn digunakan sebagai solder pada PCB (Hossain *et al.*, 2019). Unsur Br berfungsi sebagai isolator listrik dan juga penghambat panas untuk menurunkan *flammability* dari PCB. Unsur Al ditemukan pada bagian komponen seperti *Heat sinks, capacitors, cables, casings* (Kaya, 2019). Hasil tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan de oliveira, 2022 menyatakan bahwa unsur Cu

merupakan *base metal* dari PCB sehingga jumlahnya lebih dominan (de Oliveira *et al.*, 2022). Dan berdasarkan penelitian yang dilakukan (Ruan *et al.*, 2018) yang menyatakan bahwa unsur non logam pada PCB didominasi oleh unsur Si. Pada hasil karakterisasi XRF ditemukan kandungan unsur logam mulia yaitu perak (Ag) dengan kadar sebesar 0,1%. Unsur Ag pada PCB digunakan untuk bagian seperti *Batteries, solders, switches, relays, USPs, stabilizers, contacts, capacitors, RFID chips, PV cell*

4.1.2 Analisis Ayak Hasil Proses Penggerusan *Steel Slag*

Tabel 4. 1 Hasil Distribusi Ukuran Steel Slag

Lubang	Tertampung	Lolos Kumulatif
Ayakan		

Size (mm)	Mesh (#)	Massa (gr)	Persentase (%)	Tertahan (%)	Lolos (%)
0,841	20	212,8	42,7	285,7	57,3
0,5	35	18,4	3,7	267,3	53,6
0,297	50	30,7	6,2	236,6	42,74
0,149	100	29,6	5,9	207	37,08
0,074	200	90,2	18,1	116,8	20,86
-0,074	-200	116,8	23,4	0	0,00
Total		498,5	100		

Pada penelitian ini dilakukan proses analisa ayak yang bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran pada sampel yang digunakan. Sampel yang dilakukan analisis ayak merupakan hasil *ball mill* dengan *motor speed* 2.2 KW selama 20 menit. Proses analisa ayak dilakukan dengan menggunakan alat *sieve shaker* seperti pada Gambar 3.7. Pada proses tersebut ayakan disusun dari ukuran terkasar hingga terhalus yaitu 20#, 35#, 50#, 100#, dan 200# dilakukan dalam keadaan kering.

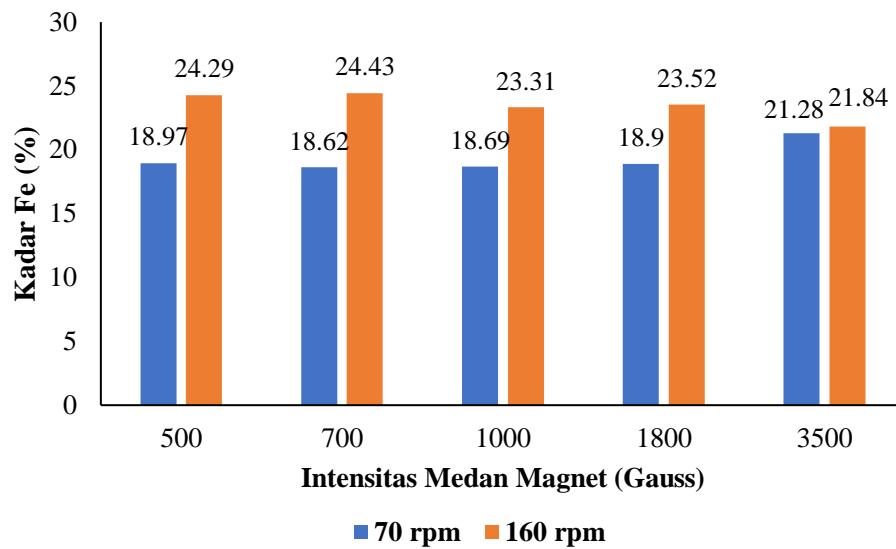
4.2 Hasil Proses Konsentrasi *Steel Slag* Menggunakan *Magnetic Separator*

Hasil proses pemisahan menggunakan *magnetic separator* pada penelitian yang dilakukan dipengaruhi oleh intensitas medan magnet dan kecepatan putaran rol yang digunakan. Intensitas medan magnet yang digunakan adalah 500, 700, 1000, 1800, dan 3500 Gauss, sedangkan untuk kecepatan rol yang digunakan sebesar 30, 50, 70, dan 160 rpm. Adapun getaran *feeder* dibuat tetap yaitu sebesar

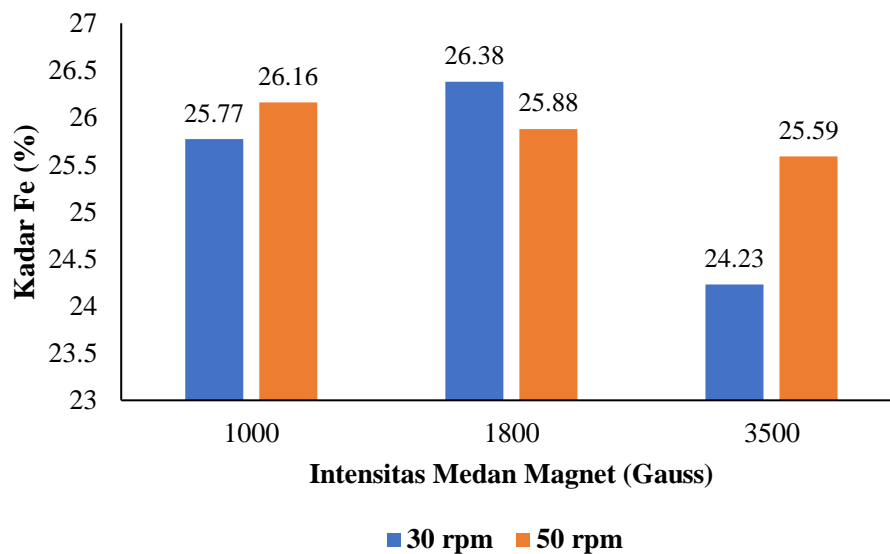
70 Hz. Berdasarkan percobaan magnetic separator didapatkan hasil data percobaan berupa data berat tertampung dan persentase berat hilang (tabel 3).

4.2.1 Pengaruh Intensitas Medan Magnet Terhadap Kadar Fe

Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan pengaruh intensitas medan magnet terhadap kadar Fe dalam fraksi non-magnetik.



Gambar 4. 3 Pengaruh intensitas Medan magnet terhadap kadar fe pada kecepatan putaran drum 70 dan 160 rpm



Gambar 4. 4 Pengaruh intensitas Medan magnet terhadap kadar fe pada kecepatan putaran drum 30 dan 50 rpm

Berdasarkan gambar 4.9 dan 4.10 didapatkan grafik yaitu ketika intensitas medan magnet meningkat, kadar Fe yang dihasilkan bersifat fluktuatif tetapi perbedaan nilai kadar tersebut tidak terlalu signifikan. Pada gambar 4.9 yaitu kecepatan putaran rol sebesar 70 rpm, kadar Fe yang dihasilkan pada intensitas medan magnet 500, 700, 1000, dan 1800 Gauss hampir sama yaitu sekitar 18%. Kemudian ketika intensitas medan magnet ditingkatkan menjadi sebesar 3500 Gauss, kadar Fe yang dihasilkan meningkat menjadi sebesar 21,28%. Pada kecepatan putaran rol sebesar 160 rpm, kadar Fe yang dihasilkan bersifat fluktuatif namun cenderung menurun, yaitu dari 24,29% hingga menjadi 21,84%.

Pada gambar 4.10 yaitu kecepatan putaran rol sebesar 30 dan 50 rpm, kadar Fe yang dihasilkan pada intensitas medan magnet 1000, 1800 dan 3500 Gauss bersifat fluktuatif tetapi tidak signifikan yaitu sekitar 25%. Kadar Fe terendah yang dihasilkan yaitu sebesar 24,23% pada intensitas medan magnet 3500 Gauss dan kecepatan putaran rol 30 rpm. Adapun kadar Fe tertinggi yang dihasilkan yaitu sebesar 26,38% pada intensitas medan magnet 1800 Gauss dan kecepatan putaran rol 30 rpm.

Lawver dan Hopstock menyatakan bahwa peningkatan kadar Fe pada konsentrat disebabkan pada intensitas magnet rendah, selektivitas magnet untuk menarik mineral akan semakin tinggi. Selektivitas tinggi tersebut menyebabkan hanya mineral konsentrat dengan nilai suseptibilitas tinggi (feromagnetik) saja yang dapat tertarik ke dalam medan magnet, sedangkan pengotor dari pasir besi akan jatuh ke dalam tailing. Sebaliknya apabila intensitas magnet yang digunakan

semakin tinggi maka selektivitas magnet semakin rendah, dan menyebabkan mineral-mineral dengan sifat paramagnetik akan ikut tertarik ke dalam konsentrat, untuk mineral dengan sifat diamagnetik akan cenderung terpisah karena memiliki suseptibilitas negatif. Pernyataan tersebut tidak sesuai dengan data hasil penelitian pada Gambar 4.3 dan 4.4 yang menunjukkan bahwa kadar Fe pada fraksi non-magnetik cenderung konstan pada kecepatan putaran rol yang sama ketika intensitas medan magnet meningkat. Hal tersebut karena gaya magnet yang bekerja pada saat pemisahan lebih kecil dari *competing force* yaitu gaya sentrifugal dan gaya gravitasi. Sehingga nilai *entrapment ratio* nya kurang dari 1. Hal tersebut dapat dibuktikan dari kadar Fe pada kecepatan putaran rol sebesar 70 rpm rata-rata sebesar 18%, dan pada kecepatan putaran rol sebesar 160 rpm rata-rata sebesar 23%. Gaya sentrifugal dipengaruhi oleh kecepatan putaran rol. Semakin cepat putaran rotor akan menyebabkan tingginya gaya sentrifugal dan hanya material yang memiliki kemagnetan yang tinggi yang tertarik menyebabkan tingginya kadar mineral. Namun banyaknya material yang terbuang menjadi tailing menyebabkan turunnya recovery. Material magnetik akan sulit menempel pada drum sehingga masuk ke dalam fraksi non-magnetik

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0}(\kappa_p - \kappa_f)V_p B \nabla B$$

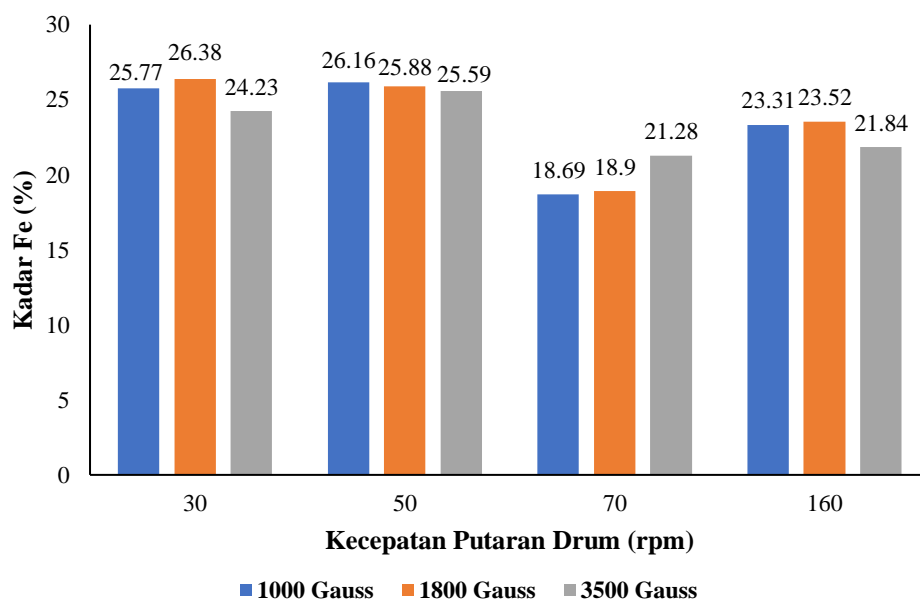
$$\vec{F}_c = (\rho_p - \rho_f)\omega V_p \vec{r}$$

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Liu, et.al pada tahun 2023, hasil XRD pada intensitas medan magnet sebesar 3000 Gauss menunjukkan Ca_2SiO_4 muncul pada

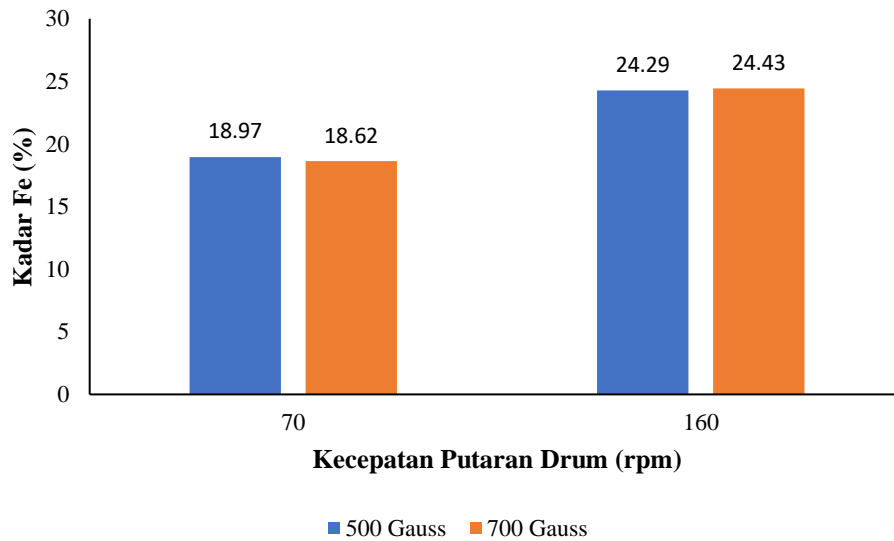
fraksi magnetik, yang mengindikasikan bahwa peningkatan intensitas medan magnet akan menurunkan kadar Fe pada fraksi magnetik.

Pengaruh kuat arus pada pemisahan magnetik yang dilakukan dengan mengubah kuat arus (Amper) ditemukan bahwa nilai kuat arus yang diterapkan akan menentukan nilai intensitas medan magnet (Gauss) yang diperoleh pada proses pemisahan (Boabdallah dkk., 2015). Hasil penurunan kadar besi dengan proses magnetik dapat dilihat pada Gambar 5 yang menunjukkan bahwa semakin tinggi arus listrik (nilai amper) yang diterapkan, terjadi peningkatan persen pengurangan kadar Fe total dan semakin rendahnya kadar besi pada produk konsentrat (non magnetik).

4.2.2 Pengaruh Kecepatan Putaran Rol Terhadap Kadar Fe



Gambar 4. 5 Pengaruh Kecepatan Putaran Rol terhadap kadar fe pada Intensitas Medan Magnet 1000, 1800, dan 3500 Gauss



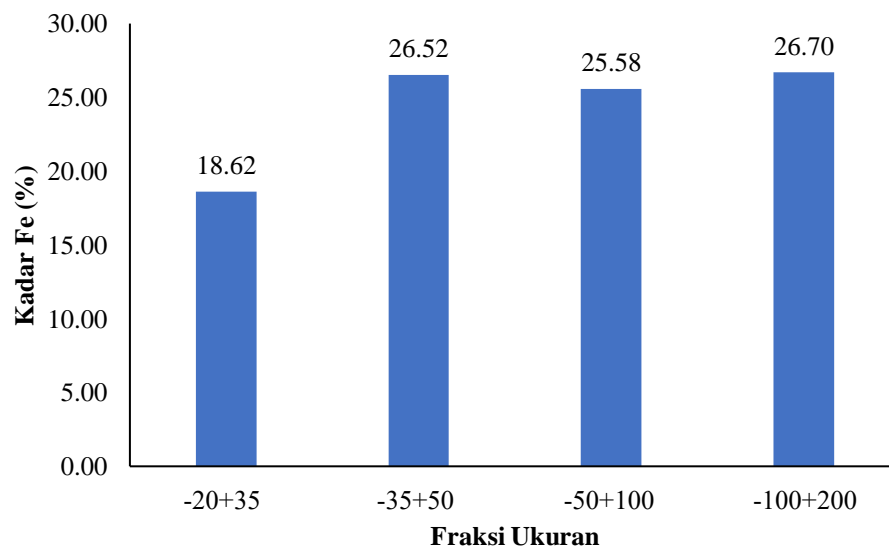
Gambar 4. 6 Pengaruh Kecepatan Putaran Rol terhadap kadar fe pada Intensitas Medan Magnet 500 dan 700 Gauss

Gambar 4.11 dan 4.12 merupakan diagram yang menunjukkan pengaruh kecepatan putaran rol terhadap kadar Fe yang berhasil dipisahkan. Dari diagram tersebut yaitu ketika kecepatan putaran rol meningkat, kadar Fe yang dihasilkan bersifat fluktuatif. Pada gambar 4.11 yaitu pada intensitas medan magnet sebesar 1000, 1800, dan 3500 Gauss, kadar Fe yang dihasilkan pada kecepatan putaran rol 30 rpm berturut-turut yaitu 25,77; 26,38; dan 24,23%. Kemudian pada kecepatan putaran rol sebesar 50 rpm meningkat menjadi sebesar 26,16; 25,88; dan 25,59%. Selanjutnya ketika kecepatan putaran rol sebesar 70 rpm menurun menjadi sebesar 18,69; 18,9; dan 2128%. Pada kecepatan putaran rol sebesar 160 rpm meningkat kembali menjadi sebesar 23,31; 23,52; dan 21,84%. Pada gambar 4.12 yaitu yaitu pada intensitas medan magnet sebesar 500 Gauss, kadar Fe yang dihasilkan pada kecepatan putaran rol sebesar 70 rpm yaitu sebesar 18,97%, kemudian mengalami peningkatan pada kecepatan putaran rol sebesar 160 rpm yaitu sebesar 24,29%. Kemudian hal yang sama juga terjadi pada intensitas medan magnet sebesar 700 Gauss, kadar Fe yang dihasilkan pada kecepatan putaran rol sebesar 70 rpm yaitu

sebesar 18,62%, kemudian mengalami peningkatan pada kecepatan putaran rol sebesar 160 rpm yaitu sebesar 24,43%.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ban et. al pada tahun 2003, Semakin tinggi kecepatan putaran drum, maka *recovery* menurun. Hal tersebut karena material magnetik akan sulit menempel pada drum sehingga masuk ke dalam fraksi non-magnetik (Ban et al., 2003).

4.2.3 Pengaruh *Magnetic Field* dan *Roll Magnet Speed* Terhadap berbagai ukuran partikel steel slag



Gambar 4.13 merupakan diagram yang menunjukkan kadar Fe yang berhasil dipisahkan menggunakan variabel intensitas medan magnet sebesar 700 Gauss dan kecepatan putaran rol sebesar 70 rpm pada beberapa fraksi ukuran *steel lag* yaitu -20+35, -35+50, -50+100, dan -100+200#. Dari diagram tersebut yaitu pada fraksi ukuran -20+35#, kadar Fe yang dihasilkan yaitu sebesar 18,62%. Kemudian pada fraksi ukuran -35+50, -50+100, dan -100+200# kadar Fe yang dihasilkan hampir sama yaitu sekitar 26%.

Ukuran butir umpan berpengaruh terhadap proses konsentrasi menggunakan alat magnetic separator cara kering, terutama pada nilai recovery proses yang dihasilkan. Nilai recovery yang dihasilkan menunjukkan efektifitas terliberasinya mineral berharga dengan pengotornya pada proses benefiasasi yang dilakukan. Semakin halus ukuran butir umpan maka liberasi antara mineral berharga dengan pengotornya semakin besar, sehingga magnetic separator akan lebih mudah melakukan proses pemisahan antara konsentrat dan tailing. Hal tersebut menyebabkan persentase kandungan logam berharga pada konsentrat cenderung naik. Nilai kandungan logam berharga dalam konsentrat yang berbanding lurus dengan nilai recovery menyebabkan nilai recovery proses yang dihasilkan juga cenderung naik terhadap kehalusan ukuran umpan yang digunakan.

Pada penelitian ini kadar yang dihasilkan pada fraksi yang paling kasar memiliki kadar yang paling rendah, kemudian tiga fraksi ukuran yang lebih halus kadarnya meningkat tetapi konstan pada tiga fraksi ukuran tersebut. Terak BOF terbentuk pada temperatur tinggi dan memiliki fluiditas yang baik saat dibuang, logam besi dalam ladle dapat mengendap dengan mudah dan membentuk bagian dari skull yang tidak akan menjadi terak halus. Sisa besi dalam terak BOF dan EAF sebagian besar muncul sebagai oksida besi yang merupakan bagian dari fase terak dan terdistribusi secara merata dalam terak. Oleh karena itu, pengurangan ukuran terak BOF dan terak EAF tidak secara signifikan membantu pembebasan besi dari terak.

