

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Kebutuhan akan mineral semakin berkembang dan berubah seiring kemajuan peradaban dan teknologi yang cepat. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) tentang material yang digunakan dalam produksi pertambangan mineral di Indonesia, terjadi peningkatan antara tahun 2019 hingga 2021. Pemanfaatan mineral sebagai bahan baku sumber energi (seperti baterai listrik) dan konversi energi merupakan sesuatu hal yang baru pada saat ini dalam pengembangan energi dan industri yang ramah lingkungan (sel surya, turbin angin, dll.). Produksi logam tanah jarang (LTJ), litium, kobalt, nikel, mangan, timah, grafit, kuarsit, dan mineral lainnya diperlukan untuk sektor pertahanan, kendaraan listrik, dan bisnis elektronik lainnya (industri 4.0) (Jonan, I. and Suhendar, 2013)

Logam tanah jarang (LTJ) lebih sering digunakan dalam produk berteknologi tinggi di berbagai industri, termasuk energi terbarukan, transportasi, dan peralatan listrik, sehingga menimbulkan kekhawatiran tentang ketersediaannya. Istilah logam tanah jarang digunakan pada logam ini karena penemuan unsur tersebut memakan waktu yang lama, hampir 160 tahun antara tahun 1788 dan 1941. Banyak penelitian tentang daur ulang LTJ dari sumber sekunder telah dilakukan sebagai akibat dari kebijakan nasional, kepedulian lingkungan dalam produksi bijih, dan keterbatasan sumber daya. Karena kandungan LTJ yang tinggi, magnet Neodymium Iron Boron (NdFeB) atau biasa disebut dengan magnet permanen dianggap sebagai sumber sekunder yang berharga untuk LTJ (Nd, Pr, Dy, dan Tb). Magnet permanen yang digunakan dalam berbagai produk berteknologi tinggi seperti perangkat elektronik, turbin angin, sepeda listrik, dan mesin industri, diproduksi menggunakan sekitar 25% dari LTJ yang diproduksi secara global (Kaya *et al.*, 2021). Perkembangan teknologi hijau juga diantisipasi untuk membuat magnet LTJ dan dysprosium menjadi bahan yang paling dicari (dalam ton), dengan tingkat pertumbuhan tahunan rata-rata 5,3% antara tahun 2010 dan 2035 (Yang *et al.*, 2017). Karena itu, memulihkan LTJ dari sisa magnet permanen merupakan pesaing potensial untuk mengatasi masalah pasokannya (Kaya *et al.*, 2021)

Untuk mendaur ulang LTJ dari magnet permanen, sebagian besar peneliti telah menyarankan prosedur hidrometalurgi, pirometalurgi, dan elektrometalurgi. Pada penelitian yang telah dilakukan (Kaya *et al.*, 2021) menggunakan metode pembakaran asam dengan pelarutan air dan proses pirolisis semprotan ultrasonik, kemudian penelitian yang telah dilakukan (Gergoric *et al.*, 2018) menggunakan metode pencucian dan ekstraksi pelarut dan pada penelitian yang telah dilakukan (Makarova *et al.*, 2020) menggunakan metode pencucian elektrokimia dengan asam sulfat dan oksalat. Dari penelitian beberapa peneliti tersebut belum adanya langkah pemurnian lebih lanjut untuk memisahkan unsur tanah jarang. Metode hidrometalurgi telah mendapat perhatian karena bahan baku sekunder kelas rendah dan aliran kompleks dapat diperoleh kembali dengan teknik ini. Selain itu, produk dengan kemurnian tinggi dapat diproduksi dengan metode hidrometalurgi. Proses hidrometalurgi memiliki kekurangan meskipun efektif, seperti banyaknya sampah yang dihasilkan selama prosedur, dan bahan kimia berbahaya sering digunakan. Bahan kimia yang lebih ramah lingkungan harus digunakan, dan jumlah air dan limbah organik yang dihasilkan harus dikurangi (Riaño dan Binnemans, 2015).

Meskipun memiliki sifat yang sangat baik untuk melepaskan LTJ dari magnet Permanen, asam mineral kuat seperti HCl dan HNO₃ risiko dampak buruk terhadap lingkungan karena masalah regenerasi asam bekas, sementara penanganannya juga dapat menimbulkan tantangan besar dalam beberapa situasi (Behera dan Parhi, 2016). Ketika kadar asam yang tinggi dilepaskan ke lingkungan, tanah dapat menjadi asam, sehingga diperlukan pengolahan tanah tambahan untuk mengembalikan keseimbangan pH tanah (Park *et al.*, 2013). Selain itu, pembentukan asap beracun sering menjadi masalah saat menggunakan asam mineral kuat. Menggunakan asam dan basa organik atau mineral yang jauh lebih encer dapat bermanfaat dalam aspek ini karena lebih mudah ditangani, menghasilkan lebih sedikit emisi gas berbahaya karena penurunan keasaman, dan jauh lebih mudah terdegradasi (Fujimoto *et al.*, 2016).

Pada penelitian ini mengusulkan alternatif yang berkelanjutan untuk metode pemurnian konvensional yang menghasilkan serbuk besi dan serbuk logam tanah jarang dari cairan PLS yang kaya LTJ dengan perbedaan larutan

yaitu menggunakan larutan asam dan basa organik maupun anaorganik. Pada penelitian ini juga menggunakan variasi pH yang bertujuan untuk menyelidiki kondisi optimal yang diperlukan untuk menghasilkan serbuk besi dan serbuk logam tanah jarang. Metode yang diusulkan memiliki keuntungan karena cepat diselesaikan, ramah lingkungan, mengkonsumsi lebih sedikit energi eksternal, dan memerlukan persiapan eksperimental yang mudah.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan variasi pH dan variasi jenis larutan yang tepat pada pemurnian PLS magnet NdFeB untuk mendapatkan serbuk besi (Fe) dan serbuk logam tanah jarang (Nd) dari PLS magnet NdFeB.
2. Memanfaatkan PLS dari limbah magnet NdFeB untuk mendapatkan serbuk besi (Fe) dan serbuk logam tanah jarang (Nd) yang lebih murni.
3. Menentukan karakteristik dari serbuk besi (Fe) dan serbuk logam tanah jarang (Nd) dengan menggunakan uji analisa SEM-EDS.

1.3 Kerangka Pemikiran

Logam Tanah Jarang (LTJ) merupakan 15 unsur lantanida yang dapat dibagi menjadi dua kategori utama berdasarkan jari-jari ioniknya: unsur tanah jarang ringan (LLTJ) dari La hingga Sm dan unsur tanah jarang berat (HLTJ) dari Eu hingga Lu. Semua logam ini berasal dari kumpulan mineral yang sama dan memiliki karakteristik fisiokimia yang sebanding. Sifat spektroskopi dan magnetik yang tepat dari REM memungkinkan untuk memainkan peran penting dari industri hingga ilmu material lanjutan, termasuk dalam produksi magnet intensitas tinggi, rakitan listrik, paduan logam, kendaraan hibrida dan listrik, lampu neon, dan aplikasi militer penting lainnya (Kim dan Osseo-Asare, 2012). Sejumlah besar LTJ telah ditambahkan ke dalam daftar logam penting sebagai akibat dari meningkatnya masalah permintaan dan pasokan. Sesuai dengan meningkatnya permintaan dalam aplikasi industri, penggunaan logam tanah jarang dari bahan limbah adalah cara terbaik untuk mengatasi masalah lingkungan dan

menjamin keberlanjutan produksi bahan baku LTJ di masa depan. 95% LTJ diimpor ke negara maju dari Cina; selain fakta ini, penerapan kuota ekspor LTJ oleh China telah meningkatkan biaya ekspor LTJ (Mancheri *et al.*, 2019).

Pilihan baru untuk produksi logam tanah jarang ini adalah pemulihan logam tanah jarang dari bahan sekunder. Karena efisiensi dan selektivitas energinya, daur ulang memberikan sejumlah keuntungan dibandingkan pemrosesan bijih mentah dan konsentrat (Ayres *et al.*, 2013). Sumber daya LTJ sekunder yang paling berharga adalah magnet permanen yang mengandung LTJ tingkat tinggi (sekitar 20%), Neodymium (Nd), Dysprosium (Dy), dan sejumlah kecil LTJ lainnya seperti Praseodymium (Pr). Menggunakan sulfasi, pemanggangan selektif, dan pencucian air, para peneliti telah memeriksa daur ulang magnet permanen untuk menghasilkan cairan yang setidaknya 98% murni dalam unsur tanah jarang. Selain itu, dengan menggunakan asam nitrat dalam teknik pembakaran asam, 98% LTJ berhasil diekstraksi dari magnet permanen (Gergoric *et al.*, 2018).

Berbeda dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan, pada penelitian ini mengusulkan alternatif yang berkelanjutan untuk metode pemurnian konvensional yang menghasilkan serbuk besi dan serbuk logam tanah jarang dari cairan PLS yang kaya LTJ dengan perbedaan jenis larutan. Pada penelitian ini juga menggunakan variasi pH yang bertujuan untuk menyelidiki kondisi optimal yang diperlukan untuk menghasilkan serbuk besi dan serbuk logam tanah jarang. Metode yang diusulkan memiliki keuntungan karena cepat diselesaikan, ramah lingkungan mengkonsumsi lebih sedikit energi eksternal, dan memerlukan penyiapan eksperimental yang mudah. Metode pemurnian dengan menggunakan variasi larutan asam dan basa organik maupun anorganik serta dengan adanya variasi pH ini belum pernah dilakukan pada penelitian sebelumnya

1.4 Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran yang telah diambil dari berbagai sumber penelitian, maka dapat ditarik suatu hipotesis yaitu sebagai berikut :

1. Adanya pengaruh pH optimal terhadap proses pemurnian larutan PLS magnet NdFeB dalam mendapatkan kemurnian yang tinggi pada hasil serbuk besi (Fe) dan serbuk logam tanah jarang (Nd).

2. Terdapat jenis larutan yang tepat pada proses pemurnian larutan PLS magnet NdFeB menjadi serbuk besi (Fe) dan serbuk logam tanah jarang (Nd).

1.5 Kontribusi

Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dan dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang dan dapat menjadi solusi dari masalah lingkungan yang terjadi akibat kurangnya pemanfaatan dari magnet permanen. Manfaat lain dari penelitian ini antara lain :

1. Bagi lingkungan diharapkan dapat menjadi solusi dalam masalah pencemaran lingkungan dan inovasi dalam pengolahan limbah dan terwujudnya prinsip *zero waste* dalam industri.
2. Bagi pendidikan diharapkan dapat menjadi sumber referensi, sumber informasi, ilmu pengetahuan dan bahan bacaan dalam pengolahan limbah.
3. Bagi masyarakat bangsa dan negara diharapkan dapat menjadi informasi untuk inovasi dalam bidang lingkungan dan industri dalam penyediaan logam tanah jarang ramah lingkungan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Magnet NdFeB

Magnet NdFeB juga biasa dikenal dengan magnet permanen neodymium atau magnet neo termasuk jenis magnet permanen yang terbuat dari perpaduan neodymium, besi dan boron. Magnet Permanen dianggap yang terbaik yang tersedia sejak diperkenalkan ke pasar pada tahun 1984, jenis magnet ini biasanya sering digunakan dalam dunia industri. Karena memiliki ketahanan yang sangat tinggi untuk kehilangan sifat magnetnya, magnet neodymium adalah sejenis magnet kuat yang tersedia secara komersial di dunia teknologi, jika dibandingkan dengan jenis magnet permanen lainnya, magnet NdFeB ini lebih kuat. Level atau grade berfungsi untuk membedakan magnet jenis ini. Kelas magnet N35 dan N52 adalah yang paling sering ditemui. Medan magnet kuat yang dihasilkan membedakan dua kelas magnet. Magnet kelas N35 lebih murah daripada magnet kelas N52 meskipun memiliki nilai kekuatan medan magnet yang lebih rendah (Prasetyo dan Mulud, 2019).

Neodymium merupakan salah satu kelompok unsur tanah jarang yang disimbolkan dengan Nd dengan nomor atom 60 dan nomor massa 144,24 g/mol. Neodymium ditemukan oleh kimiawan Jerman yang bernama Carl Auer Von Welsbach pada tahun 1885 dengan memisahkan ammonium nitrat didymium dari didyma (campuran logam tanah jarang oksida) menjadi fraksi neodymium dan praseodymium melalui proses kristalisasi berulang. Neodymium ditemukan berwarna perak, mempunyai titik didih 3400,15 K dan titik lebur 1283,15 K. Dibandingkan dengan logam tanah jarang yang lain, neodymium merupakan unsur yang paling umum bahkan tidak jarang dari cobalt, nikel, dan tembaga. (Sipahatur, 2015)

Besi adalah unsur kimia yang disimbolkan dengan Fe. Besi merupakan logam kedua yang paling banyak membentuk kerak bumi yaitu sekitar 5%. Pada tabel periodik, besi terdapat dalam golongan transisi deret pertama dengan nomor atom 26 dan nomor massa 55,845g/mol. Besi berwarna perak keabu-abuan dengan titik

didih 3134 K dan titik lebur 1811 K. Umumnya besi ditemukan dalam berbagai jenis senyawa oksida seperti besi oksida magnetit, limonit, dan hematit. Magnetit merupakan mineral dengan kandungan besi yang paling tinggi, tetapi mineral ini dijumpai dalam jumlah yang kecil. Sementara itu hematite merupakan mineral bijih utama yang dibutuhkan dalam industri besi (Yang *et al.*, 2017).

Boron merupakan unsur yang sangat keras, memiliki sifat superkonduktor, dan tahan terhadap panas yang disimbolkan dengan B dengan nomor atom 5 dan nomor massa 10,811 g/mol. Unsur ini dijumpai dalam bentuk kristal yang sangat reaktif, berwarna hitam yang mengkilap dengan titik didih 2400 K dan titik lebur 2349 K. Boron merupakan unsur metalloid yang banyak ditemukan dalam bijih borax. Pada suhu kamar, boron merupakan konduktor yang buruk, namun akan menjadi konduktor yang baik pada suhu tinggi (Yang *et al.*, 2017).

2.1.1 Pemanfaatan Magnet Permanen (NdFeB)

Pembuatan *hard disk*, mobil, motor, speaker, AC, perangkat elektronik, sepeda listrik, dan turbin angin di masa mendatang akan menggunakan magnet permanen dalam jumlah yang lebih besar, menciptakan insentif yang kuat untuk mengembangkan metode inovatif daur ulang magnet permanen. Bergantung pada aplikasinya, magnet permanen dapat bertahan mulai dari 2-3 tahun pada elektronik konsumen hingga 20-30 tahun pada turbin angin. Ukuran magnet dapat sebesar 1000–2000 kg pada generator turbin angin kontemporer dan dapat berkisar dari kurang dari 1 g pada elektronik konsumen kecil hingga lebih dari 1 kg pada EV dan HEV. Sekitar 31–32% berat LTJ dalam magnet NdFeB adalah LTJ berat yang kecil namun mahal (HLTJ), terutama Nd dan Pr serta Dy, Tb, dan Gd. Jenis magnet dari produk EoL ini mengandung LTJ daur ulang, yang akan memainkan fungsi yang signifikan dan saling melengkapi untuk pasokan utama LTJ di masa mendatang (Honaker *et al.*, 2018) Selain itu, belum ada barang pengganti yang dapat menandingi magnet NdFeB dalam hal kinerja dan harga dalam teknologi saat ini. Pendekatan yang paling efektif dan menjanjikan untuk masalah pasokan Nd, Dy, dan Pr adalah daur ulang magnet NdFeB yang dibuang (Kaya *et al.*, 2021).

2.2 Logam Tanah Jarang

Logam tanah jarang, sering dikenal sebagai REE (*Rare Earth Element*), adalah kelas unsur berat yang mencakup Sc, Y, dan 15 anggota kelompok lantanida. Unsur tanah jarang disebutkan, tetapi prevalensinya di kerak bumi tidak diindikasikan. Cerium (Ce), unsur ke-27 yang paling lazim di kerak bumi, merupakan unsur tanah jarang yang paling umum, memiliki kelimpahan 60 ppm. Bahkan unsur tanah jarang yang paling tidak lazim, lutetium (0,5 ppm), memiliki kelimpahan 200 kali lipat lebih besar daripada emas, yang memiliki kelimpahan 0,0031 ppm. Hanya saja seluruh unsur kelompok ini cenderung terisolasi dari material pembawanya karena penemuan unsur tersebut memakan waktu yang lama, hampir 160 tahun antara tahun 1788 dan 1941 sehingga istilah unsur tanah jarang digunakan. Saat ini telah diketahui lebih dari 100 jenis mineral pembawa unsur tanah jarang. Namun, hanya 3 mineral utama yang menjadi pembawa unsur ini dan dapat ditambang serta diekstrak kandungan logam tanah jarangnya. Mineral tersebut adalah *Basnasite* [(Y,Ce)(CO₃)F], *Monazite* [(Ce, La, Y, Th)PO₄] dan *Xenotime* [YPO₄]. Meskipun begitu, unsur tanah jarang juga dapat diperoleh dari apatit dan zircon (Marc, 2014).



Basnasite



Monazite



Xenotime

Gambar 1. Mineral Utama Pembawa LTJ
(Sumber : Wikipedia 2023)

2.2.1 Kegunaan Logam Tanah Jarang

Elemen tanah jarang telah menjadi komoditas penting dan penting dalam ekonomi modern. Unsur tanah jarang digunakan di berbagai industri, mulai dari sektor elektronik hingga sektor transportasi modern. Penggunaan LTJ dalam aplikasi berteknologi rendah seperti lampu dan pelapis kaca serta aplikasi

berteknologi tinggi seperti fosfor, laser, magnet, baterai, dan teknologi baru seperti superkonduktor dan pembawa hidrogen (Jonan, I. and Suhendar, 2013).

Berikut ini adalah tabel yang menunjukkan pemanfaatan unsur-unsur tanah jarang dalam berbagai macam industri.

Tabel 1. Pemanfaatan LTJ dalam Industri

Unsur Tanah Jarang Ringan	Pemanfaatan
<i>Lanthanum</i>	Baterai, campuran logam, <i>hybird engines</i>
<i>Cerium</i>	Katalis, <i>petroleum refining</i> , campuran logam
<i>Praseodymium</i>	Magnet
<i>Neodymium</i>	Katalis, <i>hard drive</i> pada laptop dan <i>handphone</i> , <i>hybird engines</i>
<i>Samarium</i>	Magnet
<i>Europium</i>	Warna merah pada layar TV dan komputer
<i>Terbium</i>	<i>Phosporus</i> , <i>magnet permanent</i>
<i>Dysporium</i>	<i>Magnet permanent</i> , <i>hybird engines</i>
<i>Erbium</i>	<i>Phosporus</i>
<i>Ytrium</i>	Pewarna merah, lampu <i>fluorescent</i> , keramik, agen pencampur logam
<i>Holmium</i>	Pewarna gelas, laser
<i>Thullum</i>	Komponen alat X-ray
<i>Lutetium</i>	Katalis pada <i>petroleum refining</i>
<i>Yterbium</i>	Laser, campuran baja
<i>Gadolinium</i>	<i>Neomagnet</i>

Sumber : (Humphries, 2011)

Karena potensi LTJ untuk pengembangan kendaraan listrik jarak jauh, kendaraan hybrid mulai terbentuk. Komoditas LTJ memiliki peran strategis yang krusial dalam pengembangan kendaraan hybrid. Misalnya, gugus logam La, Nd, dan Ce merupakan bahan penting dalam produksi baterai mobil hibrida NiMH, sedangkan gugus logam Nd, Pr, Dy, dan Tb adalah bahan penting dalam produksi motor listrik dan generator kendaraan hibrida. Di bidang metalurgi, penambahan LTJ juga dimanfaatkan untuk memproduksi baja tahan karat, baja karbon tinggi, superalloy, dan baja *High Strength Low Alloy* (HSLA). Hal ini dikarenakan LTJ memiliki kualitas yang dapat meningkatkan kekuatan material, kekerasan, dan ketahanan panas yang lebih besar. Sebagai contoh pada penambahan LTJ dalam

bentuk aditif atau *alloy* pada paduan magnesium dan aluminium, maka kekuatan dan kekerasan material paduan tersebut akan meningkat (Jonan, I. and Suhendar, 2013).

2.2.2 Pengembangan dan Pengolahan Logam Tanah Jarang

Tambang mineral tanah jarang sampai saat ini hanya menggunakan penambangan terbuka. Untuk endapan primer (bastnaesit), mineral tanah jarang diekstraksi menggunakan penambangan terbuka; untuk endapan aluvial, mereka diekstraksi melalui kusen dan kapal keruk (monasit, zirkon, dan xenotime). Mineral-mineral ini biasanya merupakan bahan limbah.

- a. Bastnaesit, tambang Lintas Gunung di Amerika Serikat menggunakan bastnaesit sebagai produk utamanya, yang merupakan sumber utama LTJ. Operasi ini telah menambang, mengolah, dan memurnikan mineral selama 40 tahun. Kapasitas tambang untuk menghasilkan oksida tanah jarang telah meningkat selama lima tahun terakhir menjadi 10–18 ribu ton per tahun. Bastnaesite merupakan produk sampingan dari proses penambangan bijih besi di Bayan Obo. Di Mountain Pass, bijih bastnaesit memiliki kandungan oksida tanah jarang sebesar 7–10%, dibandingkan dengan 3–6% di Bayan Obo. Konsentrat Bastnaesit dengan konsentrasi oksida tanah jarang 60% diperoleh melalui pengolahan mineral, khususnya pengapungan. Dengan PLS, kandungannya dapat dinaikkan menjadi 70% oksida tanah jarang, dan dengan menggabungkan PLS dan kalsinasi, dapat dinaikkan menjadi 85%.
- b. Monasit, merupakan sumber utama LTJ sebagai produk sampingan dari penambangan dan pengolahan mineral berat termasuk ilmenit, rutil, dan zirkon (ditemukan di Australia, Brasil, Cina, dan India), serta kasiterit, ilmenit, dan zirkon, (Malaysia, Thailand dan Indonesia). Pemrosesan mineral konsentrasi gravitasi, elektrostatik, dan magnetik adalah metode utama yang digunakan untuk membuat konsentrat monasit. Konsentrasi monasit yang sering dihasilkan dari pengolahan mineral berat ini memiliki kadar oksida tanah jarang antara 55 dan 65%. Monasit diproduksi di wilayah Bangka Tengah dengan menggunakan meja goyang untuk memisahkan pasir timah.

- c. Xenotim, biasanya diproduksi sebagai produk sampingan dari penambangan dan pengolahan mineral berat seperti cassiterite, ilmenite, zircon, dan monazite di Asia Tenggara, serta penambangan dan pengolahan PLS bijih uranium di Kanada. Sumber utama LTJ berat, khususnya yttrium, adalah xenotime. 60% Y_2O_3 hadir dalam konsentrat xenotime yang diproduksi di Malaysia dan Thailand.
- d. Zirkon, dibuat di Indonesia melalui penambangan dan pengolahan kembali tailing tambang emas aluvial, terutama di bekas lokasi penambangan rakyat di mana tailing sering masih terlihat di permukaan. Hasil lain dari penambangan timah aluvial adalah zirkon (Suprpto, 2009).

2.3 Proses *Recycling* Magnet NdFeB

Untuk daur ulang magnet NdFeB dapat dilakukan dengan menggunakan metode pirometalurgi dan hidrometalurgi. Metode yang paling populer adalah metode hidrometalurgi, yang menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan metode pirometalurgi pada umumnya.

2.3.1 Hidrometalurgi

Metode hidrometalurgi untuk mengekstraksi logam tanah jarang melibatkan beberapa proses, termasuk pencucian magnetik, pemisahan unsur logam tanah jarang (Nd, Pr, dan Dy) menggunakan ekstraksi pelarut melalui proses leaching, dan perubahan ex-ion menggunakan teknik ekstraksi cairan ionik. Jenis-jenis proses hidrometalurgi antara lain :

1. Pencucian Asam

Logam tanah jarang terlebih dahulu harus dilarutkan menggunakan prosedur pencucian magnetik sebagai bagian dari proses hidrometalurgi. Ada tiga teknik untuk menguraikan limbah magnetik, yaitu:

- 1) Dengan atau tanpa pembakaran
- 2) Pembakaran logam tanah jarang dengan dicuci
- 3) Dengan menggunakan fase padat baru, ubah magnet yang mengandung logam tanah jarang menjadi magnet.

2. Ekstraksi Pelarut

Proses pemisahan ion ekstraksi pelarut dari larutan melibatkan pemindahan bahan kimia kompleks ke fase yang tidak bercampur dengan membentuk kompleks antara molekul ligan terlarut dalam fase organik dan molekul ionik yang ada dalam fase air. Kesetimbangan kimiawi antara bentuk logam dalam dua fase mempengaruhi distribusi logam, dan perubahan energi bebas terjadi ketika spesimen yang mengandung logam dipindahkan dari satu tahap ke tahap lainnya. Karakteristik kimiawi, pemisahan ion, ligan, pelarut, pH fase air, suhu, dll merupakan faktor yang mempengaruhi proses ini.

3. Cairan ionik

Dalam proses hidrometalurgi, pemanfaatan bahan organik dalam ekstraksi pelarut adalah hal yang baru. Cairan terionisasi adalah cairan yang mengandung ion. Karena karakteristiknya yang tidak mudah menguap dan tidak mudah terbakar, cairan ionik cair dianggap lebih aman bila digunakan sebagai pengganti larutan organik molekuler dalam prosedur ekstraksi logam tanah jarang. Cairan ionik dengan konsentrasi ekstrak yang sangat tinggi dapat meningkatkan proses dengan bertindak sebagai ekstrak dasar untuk menggantikan logam dalam fase cair (Bahfie *et al.*, 2021).

2.3.2 Pirometalurgi

Tujuan utama dari proses pirometalurgi adalah menggunakan suhu tinggi untuk mengekstraksi unsur logam tanah jarang yang diklasifikasikan berdasarkan fase berbeda dari magnet logam tanah jarang. Logam tanah jarang dibagi menjadi fase tambahan yang dapat dibuat dengan elektrolisis garam cair karena sangat terkonsentrasi. Metode pirometalurgi dibagi menjadi beberapa langkah yaitu :

1. Pemanasan

Suhu tinggi digunakan dalam pemangangan untuk mengubah bentuk magnet. Diharapkan sektor metalurgi akan mendapatkan prosedur pemisahan yang lebih efektif setelah proses pemangangan. Misalnya, dalam pemangangan sulfat, logam akan disulfasi untuk menghasilkan sulfat yang larut dalam air selama proses pemangangan sulfida. Metode dua langkah dimulai dengan pemecahan bahan magnetik menjadi sulfat bentuk padat pada suhu sekitar. Campuran yang

dihasilkan kemudian dipanaskan untuk mendapatkan logam tanah jarang dan sulfat tetap mempertahankan stabilitas termalnya (Bahfie *et al.*, 2021).

2. Filtrasi elektrokimia langsung

Logam magnetik dapat diproses secara elektrokimia menggunakan teknik pemurnian garam cair. Logam tanah jarang dapat dipisahkan secara selektif dilarutkan dalam klorida cair atau fluorida dan lebih disukai untuk katoda dalam sel elektrolisis, yang menggunakan potongan magnet yang tidak murni sebagai anoda (Firdaus *et al.*, 2016).

2.4 Teknologi Pemisahan Logam Tanah Jarang dari Magnet NdFeB.

Untuk memisahkan LJT secara selektif dari cairannya, cairan PLS yang diperoleh dari berbagai prosedur PLS harus ditangani dengan berbagai teknik pemurnian, seperti presipitasi, ekstraksi pelarut, dan ekstraksi cairan ionik.

Tabel 2. Perbandingan Teknologi Pemisahan LTJ yang berbeda dari Magnet NdFeB

Metode	Keuntungan	Kekurangan
Pengendapan (<i>Precipitation</i>)	Biaya rendah Prosesnya sederhana	Pemulihan Rendah Produk adalah ketidakmurnian Sulit untuk mendapatkan LTJ tunggal
Ekstraksi Pelarut	Pemulihan tinggi Dapat memperoleh kemurnian tinggi LTJ tunggal	Harga Tinggi Prosesnya rumit Menghasilkan limbah dalam jumlah besar
Ekstraksi cairan ionik	Pemulihan tinggi Dapat memperoleh kemurnian LTJ tunggal Efisien Ramah lingkungan	Harga tinggi Sulit untuk menyiapkan sistem cairan ionik

Sumber : Zhang *et al.*, 2020

Pada Penelitian ini penulis memilih pemurnian dengan metode presipitasi. Proses presipitasi merupakan salah satu metode untuk memisahkan logam berat dari cairan. Dalam metode presipitasi kimia dilakukan penambahan suatu zat

kimia tertentu untuk mengubah senyawa yang mudah larut ke bentuk padatan yang tidak larut.

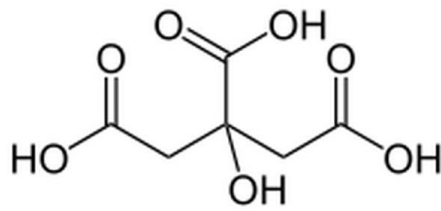
2.5 Purifikasi

Proses purifikasi adalah metode untuk mendapatkan komponen bahan alam murni bebas dari komponen kimia lain yang tidak dibutuhkan. Untuk tingkatan kemurnian (purity) suatu struktur senyawa tertentu, kemurnian bahan harus 95-100%. Sedangkan ekstrak terpurifikasi harus dijelaskan bahwa ekstrak terpurifikasi dari komponen apa sehingga tidak menimbulkan multipersepsi (Malik *et al.*, 2017).

Purifikasi adalah bagian penting dari proses pemisahan dan menghubungkan pelindian ke proses peminangan logam akhir (Sadri *et al.*, 2021). Teknik pemurnian meliputi presipitasi, pertukaran ion, ekstraksi pelarut, dan pemisahan membran. Teknik presipitasi merupakan metode konvensional yang digunakan dalam pemurnian larutan, dapat digunakan untuk pengendapan hidroksida logam, sulfida, dan garam basa. Co-presipitasi ion logam lainnya adalah umum selama pengendapan, yang dapat mempengaruhi hilangnya logam berharga, kemurnian larutan, dan secara keseluruhan, ekonomi proses pengendapan.

2.6 Asam Sitrat (C₆H₈O₇)

Asam sitrat merupakan asam organik lemah yang terdapat pada daun dan buah tumbuhan tertentu. Senyawa ini merupakan bahan pengawet alami yang baik dan dapat juga dipakai untuk mengatur tingkat kemasaman pada berbagai pengolahan makanan dan minuman (Ovelando *et al.*, 2013). Rumus kimia asam sitrat adalah C₆H₈O₇ atau CH₂(COOH)-COH(COOH)-CH₂(COOH), struktur asam ini tercermin pada nama IUPAC-nya, asam 2-hidroksi- 1,2,3-propanetricarboxylic acid. Keasaman asam sitrat didapatkan dari tiga gugus karboksil COOH yang dapat melepas proton dalam larutan. Jika hal ini terjadi, ion yang dihasilkan adalah ion sitrat (Effendi, 2013). Kristal putih dari asam sitrat yang tidak berwarna, tidak berbau, dan berasa asam, kristal tersebut larut dengan cepat dalam air panas. Selain itu, asam sitrat sudah tersedia di pasaran dan tidak mahal.

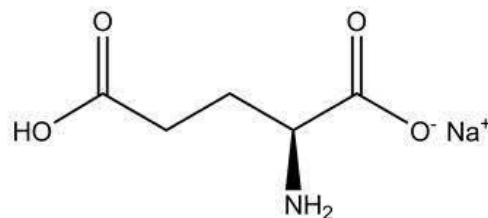


Gambar 2. Struktur Molekul Asam Sitrat
Sumber : Effendi, 2013

Pada industri makanan asam sitrat yang digunakan sebanyak 60%, sedangkan 30% digunakan dalam industri fermentasi dan sisanya pada industri lainnya (Wicaksana, 2016). Asam sitrat adalah pengawet sekaligus pemelihara warna dan aroma, pemelihara kekeruhan, penghambat oksidasi, inverter sukrosa, penghasil warna permen, penghasil warna jelly, dan pengatur pH (Sasmitaloka, 2017).

2.7 *Monosodium Glutamate*(MSG)

Monosodium glutamate (MSG) merupakan garam natrium /sodium yang berasal dari asam glutamate yang merupakan asam amino non-esensial dengan jumlah yang berlimpah di alam (Lioe *et al.*, 2010). Berbagai makanan sering dibumbui dengan monosodium glutamat (MSG), yang berfungsi sebagai penambah rasa. Terdapat tiga komposisi dalam senyawa MSG yaitu glutamate 78%, natrium 12% dan air 10% (Yonata dan Indah, 2016). MSG diproduksi ketika bakteri *Brevibacterium lactofermentum* memfermentasi tetes tebu. Monosodium glutamat (MSG) adalah salah satu penyedap makanan yang dibuat oleh perusahaan Jepang Ajinomoto Co (Lölinger, 2000).



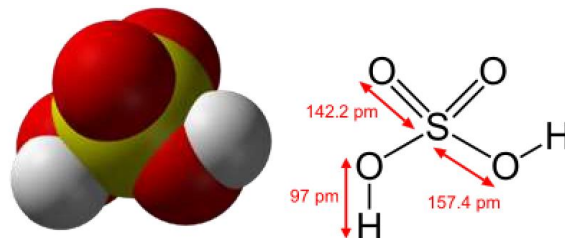
Gambar 3. Struktur Molekul Monosodium Glutamate
Sumber : (Hermiyanty, Wandira Ayu Bertin, Wandira Ayu, 2017)

Monosodium glutamat memiliki titik leleh 232 atau 505K sesuai dengan rumus kimianya. Karena monosodium glutamat memiliki afinitas yang besar

terhadap ion logam dan dapat memperkaya unsur yang tidak diinginkan seperti Fe, Al, Mg, dan Ca dalam padatan residu, digunakan sebagai reagen pelindian dalam keadaan basa (Prasetyo *et al.*, n.d.).

2.8 Asam Sulfat (H₂SO₄)

H₂SO₄ atau asam sulfat adalah asam mineral anorganik yang kuat. Dalam rasio apa pun, bahan ini larut dalam air. Asam sulfat merupakan salah satu produk utama industri kimia dan memiliki berbagai kegunaan. Karena sifat higroskopisnya, asam sulfat murni yang tidak diencerkan tidak dapat ditemukan secara alami di Bumi (Suarez, 2015). Oksidasi adalah proses alami yang menghasilkan asam sulfat (Hardeli *et al.*, 2016). Mineral yang mengandung belerang, seperti belerang besi. Logam-logam dalam bijih sulfida dapat dilarutkan oleh air asam teroksidasi ini, yang menghasilkan uap beracun berwarna cerah (Gilson, 2020).

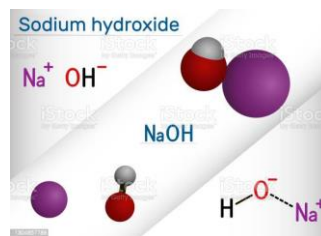


Gambar 4. Struktur Molekul Asam Sulfat
Sumber : (Gilson, 2020).

Asam sulfat merupakan zat pengering yang baik. asam sulfat digunakan dalam pengolahan kebanyakan buah-buah kering. di atmosfer, asam sulfat merupakan salah satu bahan kimia yang menyebabkan hujan asam (Yun *et al.*, 2019). Asam sulfat 100% dapat dibuat namun ia akan melepaskan SO₃ pada titik didihnya dan menghasilkan asam 98,3%. Asam sulfat 98% umumnya disebut sebagai asam sulfat pekat. Asam sulfat murni berupa cairan bening seperti minyak dan karena itu dinamakan pada dahulu kala sebagai minyak vitriol (Gilson, 2020).

2.9 Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium hidroksida (NaOH), juga dikenal sebagai soda kaustik, soda api, atau sodium hidroksida, adalah sejenis basa logam kaustik. Ia digunakan di berbagai macam bidang industri, kebanyakan digunakan sebagai basa dalam proses produksi bubur kayu dan kertas, tekstil, air minum, sabun dan deterjen (Ashla, 2019). Dalam bentuk kristal memiliki warna putih terang agak transparan, dibuat dalam bentuk flake, pellet, atau granular. Untuk bentuk cairnya tak memiliki warna (bening). Soda api larut dalam air, ethanol, dan methanol. Soda api mudah mencair pada udara terbuka, karena memiliki sifat yang higroskopis, dan mampu menurunkan kelembaban udara (Mathematics, 2016).



Gambar 5. Struktur Molekul *Natrium Hidroksida*
Sumber :istock photo, 2023

Pada industri, NaOH digunakan sebagai bahan kimia basa untuk kebutuhan pembuatan kertas, tekstil, air minum, proses pembuatan air aquadest, sabun, deterjen, industri pembuatan kaca, industri metalurgi dan pengolahan hasil tambang mineral logam, industri pengolahan rumput laut, dan sebagainya.

2.10 ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry*)

Dalam menentukan kadar logam berat yaitu salah satunya dapat dilakukan dengan instrumen *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES). Instrumen ini menggunakan plasma yang digabungkan secara induktif untuk membuat ion dan atom tereksitasi yang memancarkan radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang yang spesifik untuk elemen tertentu, menggunakan argon sebagai gas pembawa. Intensitas pancaran ini digunakan untuk menunjukkan konsentrasi unsur-unsur dalam sampel (Indrawijaya *et al.*, 2019). Salah satu keuntungan metode Inductively Coupled Plasma-Optical

Emission Spectroscopy (ICP-OES) yaitu dapat melakukan analisis multielemen dengan cukup cepat. ICP-OES dapat menganalisis 70 unsur dengan konsentrasi di bawah 1 mg/l serta dapat menganalisis secara kualitatif dan kuantitatif .



Gambar 6. Alat Analisa ICP-OES
Sumber : Dokumentasi penulis

Untuk memperoleh informasi kualitatif, yaitu untuk mengetahui unsur yang terkandung pada sampel, melibatkan identifikasi emisi panjang gelombang khas dari unsur yang dituju. Secara umum, paling sedikit akan ada tiga garis spektrum dari unsur yang diperiksa untuk memastikan kebenaran emisi yang diamati sesuai dengan unsur yang dituju. Sedangkan untuk informasi kuantitatif, yaitu untuk menentukan banyak unsur yang terkandung dalam sampel dapat dicapai dengan menggunakan plot intensitas emisi terhadap konsentrasi yang disebut kurva kalibrasi. Larutan standar dimasukkan ke dalam ICP dan intensitas emisi setiap unsur diukur. Ketika intensitas emisi unsur diukur, intensitas diperiksa terhadap kurva kalibrasi untuk menentukan konsentrasi yang sesuai dengan intensitasnya (Life dan Sciences, 2004).

2.11 SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah sebuah mikroskop yang melakukan pemfokusan pancaran tinggi elektron (*electron beam*) pada sebuah permukaan untuk melakukan pemindaian (*scanning*) terhadap permukaan material. SEM bekerja menggunakan berinteraksi dengan atom-atom pada sampel. Dari hasil interaksi akan dihasilkan elektron pantulan yang menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang topografi, morfologi, dan komposisi permukaan material. Hasil pemindaian SEM berupa gambar 3 dimensi dari permukaan sampel yang dipindai. Scanning dilakukan melalui *secondary electron* dan

Backscattered Electron (BSE). Scanning dapat dilakukan melalui scanning point dan mapping. Set peralatan SEM dilengkapi dengan *Energy Dispersive Spectrometer* (EDX), sehingga dapat mendeteksi komponen/ unsur yang terdapat pada sampel. Penggunaan SEM banyak digunakan diberbagai bidang mulai dari biologi hingga teknik material, dengan resolusi hingga 1 nm dan perbesaran 1.000.000x. Adapun fungsi dari instrumen SEM, antara lain untuk memperoleh informasi tentang :

a. Topografi

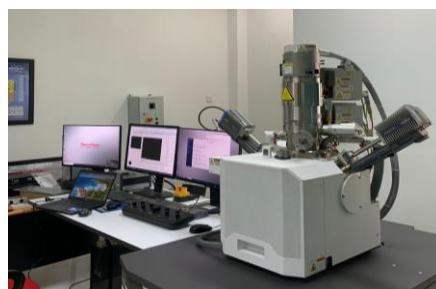
Topografi adalah sebuah studi yang mempelajari relief permukaan berupa image tiga dimensi. Objek dari topografi adalah koordinat suatu bagian permukaan. Topografi material yang menjadi sampel pemindaian SEM dapat berupa bentuk permukaan dan teksturnya (kekerasan, sifat memantulkan cahaya, keberadaan crack). Dari informasi mengenai topografi ini, SEM dapat digunakan di berbagai terapan keilmuan, mulai dari mengamati permukaan sel hingga nanomaterial (dalam bentuk keramik ,logam dan komposit), mengukur ketebalan dan celah (crack) specimen skala nano.

b. Morfologi

Instrumen SEM memindai morfologi permukaan sampel, yaitu bentuk dan ukuran dari komponen penyusun objek (misalnya grain, grain boundary, pori dan defect)

c. Komposisi

Instrumen SEM dapat menganalisis komposisi spot atau keseluruhan sampel yang dipindai, yaitu data kuantitatif unsur dan senyawa yang terkandung dalam objek (Masta, 2020).



Gambar 7. Alat Analisa SEM-EDS
Sumber : Dokumentasi penulis

2.12 Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya adalah penelitian yang telah dilakukan dan dapat diperoleh dari berbagai sumber akademik, termasuk tesis, tesis, disertasi, atau jurnal penelitian. Studi sebelumnya yang tercantum di bawah ini berfungsi sebagai panduan bagi para peneliti yang melakukan penelitian.

Tabel 3. Peneliti Terdahulu

Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil
Elif Emil, Ozan Kaya, Srecko Stopic, Sebahattin Gürmen, and Bernd Friedrich. Tahun 2021	<i>NdFeB Magnets Recycling Process: An Alternative Method to Produce Mixed Rare Earth Oxide from Scrap NdFeB Magnets</i>	Pemulihan campuran LTJ-oksida dari magnet NdFeB melalui metode pirolisis semprot ultrasonik antara 700°C dan 1000°C adalah langkah inovatif baru dibandingkan dengan kombinasi presipitasi tradisional dengan natrium karbonat dan dekomposisi termal karbonat tanah jarang pada 850°C. Partikel yang diperoleh berbentuk bulat dengan ukuran antara 362 dan 540 nm.
Irina Makarova, Jacek Ryl, Zhicun, Irina Kurilo, Karolina Gornicka, Markku Laatikainen dan Eveliina Repo. Tahun 2020	<i>One-step recovery of LTJ oxalates in electro-PLS of spent NdFeB magnets</i>	dihasilkan lapisan murni LTJ oksalat hingga 93%, dengan besi tetap berada dalam larutan dan sebagai residu padat untuk pemulihan di masa mendatang.
Marino Gergoric, Christian Ekberg, Britt-Marie Steenari, Teodora Retegan. Tahun 2018	<i>Separation of Heavy Rare-Earth Elements from Light Rare-Earth Elements Via Solvent Extraction from a Neodymium Magnet Leachate and the Effects of Diluents</i>	Konsentrasi D2EHPA yang digunakan pada pengencer adalah 0,3, 0,6, 0,9 dan 1,2 M. Dengan menggunakan D2EHPA 0,3 M per heksana, faktor pemurnian antara LTJ berat dan ringan tercapai, namun tidak ada ekstraksi B atau Co dapat dimanipulasi. Secara keseluruhan, LTJ dilacak sebagai grup menggunakan 0,9 M atau 1,2

Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil
		M D2EHPA baik dalam oktan dan heksana, serta tanpa menggunakan B atau Co. Dibandingkan dengan pengencer aromatik dan polar, pengencer nonpolar alifatik mengungkapkan sifat yang lebih menguntungkan. Asam klorida pada konsentrasi 2 M atau lebih tinggi terbukti efektif untuk menghilangkan LTJ sepenuhnya dari fase organik yang dimuat.