

Penelitian
Pengaruh Laju Alir Gas Karbondioksida dan
Lama Pembakaran dalam Pemurnian Alumina
dari *Spent Catalyst*

Oleh :

Tony Handoko, ST
Henky Muljana, ST, MEng



Jurusan Teknik Kimia
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Katolik Parahyangan

2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas hikmat dan bimbingan-Nya dalam penyusunan laporan penelitian berjudul ” Pengaruh Laju Alir Gas Karbondioksida dan Lama Pembakaran dalam Pemurnian Alumina dari *Spent Catalyst* ”. Dalam kesempatan ini penulis juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu selama penyusunan laporan ini, yaitu : .

1. PT. Agung Kencana Jaya, atas bantuan bahan baku penelitian.
2. Arawinda dan Sherly Octavia, atas bantuan dalam pengoperasian alat dan pelaksanaan serta analisis penelitian.
3. Jurusan Teknik Kimia, atas waktu dan semangat yang diberikan kepada penulis.
4. LPPM UNPAR, atas bantuan dana selama penelitian.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna, karena itu penulis akan menerima saran dan kritik yang membangun dari pembaca. Akhirnya penulis berharap bahwa laporan ini dapat bermanfaat pembaca dan dapat dikembangkan ke arah yang lebih sempurna.

Bandung, Desember 2009

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| Halaman Judul | i |
| Kata Pengantar | ii |
| Daftar Isi | iii |
| Daftar Gambar | iv |
| Daftar Tabel | v |
| Intisari | vi |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tema Sentral Masalah | 2 |
| 1.3 Ruang Lingkup Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 4 |
| 2.1 Alumina | 4 |
| 2.2 Proses Ekstraksi Alumina | 6 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 14 |
| 3.1 Bahan dan Alat | 14 |
| 3.2 Tahap-tahap Penelitian | 14 |
| 3.3 Jadwal Kerja Penelitian | 15 |
| BAB IV HASIL PENELITIAN | 17 |
| BAB V PEMBAHASAN | 19 |
| 5.1 Tahap ekstraksi reaktif dengan pelarut NaOH 25 % | 19 |
| 5.2 Tahap presipitasi larutan natrium aluminat dengan gas CO ₂ | 20 |
| 5.3 Tahap pembentukan alumina | 21 |
| BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN | 23 |
| DAFTAR PUSTAKA | 24 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Struktur sel <i>corundum</i> | 4 |
| Gambar 2.2 Diagram alir proses Bayer | 6 |
| Gambar 5.1 Hasil presipitasi | 21 |
| Gambar 5.2 Hasil pembakaran | 22 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 Spesifikasi produk alumina | 3 |
| Tabel 2.2 Data Fisik Alumina | 5 |
| Tabel 3.1 Jadwal Kerja Penelitian | 16 |

INTISARI

Aluminium merupakan salah satu bahan logam yang banyak digunakan dalam industri dengan berbagai macam bentuk. Aluminium tersebut tidak diperoleh secara langsung tapi melalui pemurnian dari oksidanya, yang dikenal dengan nama alumina, dengan rumus molekul Al_2O_3 . Proses pemurnian dari aluminium tersebut dilakukan dengan elektrolisis. Namun sebelum proses pemurnian, ada beberapa tahapan yang harus dilakukan untuk mendapatkan alumina. Hal ini dikarenakan alumina tidak berada dalam bentuk murninya. Alumina merupakan bahan alam dan paling banyak terdapat di dalam bauksit, bersama dengan silika. Selain bauksit, alumina juga terdapat di dalam kaolin, tanah liat, dan *spent catalyst*.

Spent catalyst adalah katalis yang dipergunakan dalam proses cracking dalam industri petroleum yang sudah jenuh dan tidak dapat dipergunakan lagi sehingga harus dibuang. Katalis ini masih mengandung senyawa-senyawa logam yang berharga seperti nikel, vanadium, rhodium, silika, alumina, dan lain-lain sehingga katalis tersebut masih berharga untuk di daur ulang. Proses daur ulang tersebut bertahap untuk masing-masing jenis senyawa logam.

Dari penelitian sebelumnya telah diperoleh bahwa metode Bayer cocok untuk pengolahan *spent catalyst*, konduktivitas dapat digunakan sebagai salah satu cara untuk melihat banyaknya ion-ion yang terendapkan secara kualitatif, kondisi ekstraksi yang baik adalah $80\text{ }^\circ\text{C}$, 3 jam, dan rasio 1 : 5 dengan pelarut NaOH, tahap ekstraksi adalah penentu dari banyaknya alumina yang dapat diendapkan. Tahap selanjutnya yang harus ditentukan adalah tahap karbonisasi, yang berupa perubahan laju alir gas dan tahap pembakaran, yaitu lama pembakaran.

Hasil yang diperoleh adalah laju alir gas karbondioksida 2 L/menit dengan waktu pembakaran 30 menit menghasilkan alumina terbaik. Presipitasi dapat dilakukan dengan reaktor silinder batch dan menghasilkan endapan yang banyak.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aluminium merupakan salah satu bahan logam yang banyak digunakan dalam industri dengan berbagai macam bentuk. Aluminium tersebut tidak diperoleh secara langsung tapi melalui pemurnian dari oksidanya, yang dikenal dengan nama alumina, dengan rumus molekul Al_2O_3 . Proses pemurnian dari aluminium tersebut dilakukan dengan elektrolisis. Namun sebelum proses pemurnian, ada beberapa tahapan yang harus dilakukan untuk mendapatkan alumina. Hal ini dikarenakan alumina tidak berada dalam bentuk murninya. Alumina merupakan bahan alam dan paling banyak terdapat di dalam bauksit, bersama dengan silika. Selain bauksit, alumina juga terdapat di dalam kaolin, tanah liat, dan *spent catalyst*.

Spent catalyst adalah katalis yang dipergunakan dalam proses cracking dalam industri petroleum yang sudah jenuh dan tidak dapat dipergunakan lagi sehingga harus dibuang. Katalis ini masih mengandung senyawa-senyawa logam yang berharga seperti nikel, vanadium, rhodium, silika, alumina, dan lain-lain sehingga katalis tersebut masih berharga untuk di daur ulang. Proses daur ulang tersebut bertahap untuk masing-masing jenis senyawa logam. *Spent catalyst* PT. Agung Kencana Jaya adalah jenis yang sudah didaur ulang senyawa nikel, vanadium, rhodium dan lain-lain sehingga masih tersisa alumina dan silika dalam jumlah yang besar. Kandungan silika dan alumina berturut-turut yang ada dalam *spent catalyst* tersebut adalah 47 % dan 45 %. Oleh karena itu jika alumina dapat diekstraksi akan menambah nilai dari katalis tersebut. Harga alumina di pasaran berkisar Rp 20.000,00 per kg.

Proses pengambilan alumina ada berbagai macam cara. Namun yang cukup terkenal adalah metode Bayer. Metode ini terdiri dari 3 tahapan utama yaitu : pembentukan larutan natrium-aluminat, pembentukan aluminium hidroksida, dan pembentukan alumina. Pembentukan larutan natrium-aluminat dilakukan dengan mengekstraksi *spent catalyst* dengan NaOH 25 %-b. NaOH tersebut akan bereaksi dengan alumina membentuk natrium-

aluminat. Setelah disaring, larutan tersebut dikontakkan dengan gas karbondioksida untuk membentuk endapan aluminium hidroksida. Endapan kemudian disaring untuk dikalsinasi pada suhu 1000 °C membentuk alumina. Metode Bayer tersebut telah diterapkan pada daur ulang alumina dari bauksit. Metode-metode lain untuk mendaur ulang alumina dari *spent catalyst* adalah dengan menggunakan asam encer pada pembentukan aluminium hidroksida dan dengan mengekstrak *spent catalyst* dengan asam sulfat sebelum menggunakan NaOH. Kemurnian alumina yang diperoleh dari metode-metode tersebut berkisar antara 92 – 95 %.

Pada tahap pembentukan larutan natrium-aluminat, ada beberapa faktor yang berpengaruh yaitu : konsentrasi NaOH, rasio *spent* : NaOH, waktu ekstraksi, temperatur ekstraksi, dan tekanan ekstraksi. Pada tahap pembentukan aluminium hidroksida ada beberapa faktor yang mempengaruhi yaitu : laju alir dan tekanan gas karbondioksida, lama waktu pengontakan. Sedangkan faktor yang mempengaruhi tahap pembentukan alumina adalah lama waktu kalsinasi, temperatur kalsinasi. Semua faktor tersebut akan mempengaruhi kemurnian alumina yang diperoleh. Jenis *spent catalyst* yg digunakan dalam penelitian ini memiliki komposisi bahan yang berbeda dengan bauksit sehingga harus dilakukan penentuan metode yang tepat dalam mengekstrak alumina yang terkandung di dalamnya. Dari penelitian sebelumnya telah diperoleh bahwa metode Bayer cocok untuk pengolahan *spent catalyst*, konduktivitas dapat digunakan sebagai salah satu cara untuk melihat banyaknya ion-ion yang terendapkan secara kualitatif, kondisi ekstraksi yang baik adalah 80 °C, 3 jam, dan rasio 1 : 5 dengan pelarut NaOH, tahap ekstraksi adalah penentu dari banyaknya alumina yang dapat diendapkan. Tahap selanjutnya yang harus ditentukan adalah tahap karbonisasi, yang berupa perubahan laju alir gas dan tahap pembakaran, yaitu lama pembakaran.

1.2 Tema Sentral Masalah

Tema sentral masalah adalah belum diperolehnya jumlah alumina yang memadai akibat belum teroptimasinya tahap karbonisasi dan tahap pembakaran. Tahap utama dalam metode Bayer, yaitu tahap ekstraksi, telah ditentukan kondisi optimumnya. Selanjutnya, kedua tahap terakhir adalah penentu dari banyaknya alumina yang dapat dimurnikan.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian adalah : penggunaan metode Bayer untuk daur ulang alumina. *Spent catalyst* yang digunakan adalah *spent catalyst* dari PT. Agung Kencana Jaya. Variabel yang diperhatikan adalah variabel pada tahap pembentukan alumina dan pemurnian, yaitu : tekanan dan laju alir gas karbondioksida, dan lama pembakaran.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian bertujuan untuk :

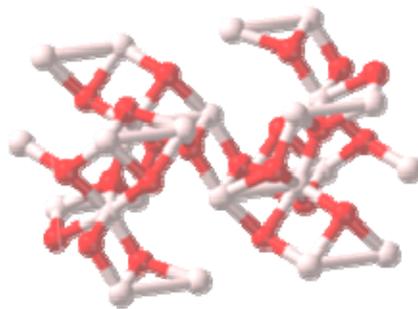
1. Penentuan kondisi operasi dalam tahap pembentukan alumina, yaitu laju alir,
2. Penentuan pengaruh variabel-variabel dalam tahap pemurnian alumina, yaitu lama pembakaran,
3. Mendapatkan alumina dengan kemurnian tinggi,
4. Mendapatkan alumina dengan yield yang tinggi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Alumina

Alumina adalah oksida amfoter dari aluminium dengan rumus kimia Al_2O_3 . Di alam alumina ditemukan dalam bentuk *corundum*, seperti *ruby* dan *sapphire*. Alumina memiliki banyak bentuk yaitu α , γ , δ , η , κ , ρ , χ , dan θ . Bentuk alumina yang paling stabil secara termodinamika adalah α – alumina. Struktur sel dari *corundum* dapat dilihat pada Gambar 2.1. Alumina yang dihasilkan dari pabrik ini berupa padatan berwarna putih. Alumina merupakan bahan baku dalam pembuatan aluminium. Spesifikasi produk alumina dapat dilihat pada Tabel 2.1. Data fisik alumina disajikan dalam Tabel 2.2.



Gambar 2.1 Struktur sel *corundum*

Tabel 2.1 Spesifikasi produk alumina

| Komponen | Komposisi (% berat) |
|-------------------------|---------------------|
| Al_2O_3 | 99,3 - 99,7 |
| Na_2O | 0,3 - 0,5 |
| SiO_2 | 0,005 - 0,025 |
| CaO | < 0,005 - 0,04 |
| Fe_2O_3 | 0,005 - 0,02 |
| TiO_2 | 0,001 - 0,008 |
| ZnO | < 0,001 - 0,01 |
| P_2O_5 | < 0,0001 - 0,0015 |
| Ga_2O_3 | < 0,005 - 0,015 |
| V_2O_5 | < 0,001 - 0,003 |
| SO_3 | < 0,05 - 0,2 |

[Sumber : Alcan]

Tabel 2.2 Data fisik alumina

| | |
|----------------------|---------------------------------|
| Sinonim | Aluminium oksida |
| Rumus Molekul | Al ₂ O ₃ |
| Berat Molekul | 101,96 |
| Deskripsi | Berbentuk serbuk berwarna putih |
| Densitas | 3,97 g /cm ³ |
| Kelarutan dalam air | Tidak larut dalam air |
| Titik didih | ~ 3000 °C |
| Titik leleh | 2054 °C |
| Kapasitas panas | 79,04 J / mol . K |
| ΔH_f^0 solid | - 1675,7 kJ / mol |

Produksi tahunan alumina mencapai 65 juta ton, dimana 90 % dari produksi ini digunakan dalam industri pembuatan aluminium dengan cara termal. Sedangkan 10 % dari produksi alumina digunakan dalam berbagai bidang seperti peralatan yang membutuhkan temperatur tinggi, bahan tahan korosi, alat pemotong logam, media penghancur untuk proses pengecilan ukuran partikel, komponen *microwave*, dan insulasi elektrik. Alumina mempunyai karakteristik sebagai berikut :

- memiliki ketahanan terhadap tekanan tinggi.
- memiliki tingkat kekerasan yang tinggi.
- memiliki ketahanan terhadap abrasi.
- memiliki ketahanan terhadap berbagai jenis bahan kimia, bahkan pada temperatur tinggi.
- memiliki konduktivitas termal yang tinggi.
- memiliki ketahanan terhadap perubahan temperatur yang tinggi.
- memiliki ketahanan terhadap listrik, bahkan pada temperatur tinggi.

Sebagian besar alumina dihasilkan dari kalsinasi aluminium hidroksida. Aluminium hidroksida hampir semua diperoleh melalui proses Bayer. Proses Bayer terdiri dari *digestion* bauksit dengan larutan natrium hidroksida dan diikuti oleh presipitasi aluminium hidroksida dengan penambahan kristal aluminium hidroksida.

Secara komersial, alumina dapat dibagi menjadi beberapa jenis yaitu *smelter grade alumina*, *calcined alumina*, *low soda alumina*, *reactive alumina*, *tabular alumina*, *high purity alumina* dan *fused alumina*.

2.2 Proses Ekstraksi Alumina

Dalam proses pembuatan alumina dari *spent catalyst* ada beberapa proses yang dapat digunakan yaitu proses Deville, proses Le Chatelier, proses Serpek, *sulphurous acid process*, proses *lime – soda* sintering dan proses *lime* sintering, proses *hybrid* bayer – sintering, proses pechiney H^+ (*acid leaching*), dan proses Bayer.

2.2.1 Proses Deville

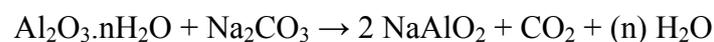
Proses Deville merupakan proses industri yang pertama kali ditemukan untuk memproduksi alumina dari bauksit. Proses ini ditemukan oleh Henri Sainte – Claire Deville yang berkebangsaan Perancis pada tahun 1859. Proses ini dapat disebut juga dengan proses Deville – Pechiney. Proses ini didasarkan pada ekstraksi alumina dengan natrium karbonat (Na_2CO_3).

Tahap pertama dari proses ini adalah kalsinasi bauksit pada temperatur 1200 °C dengan natrium karbonat dan *coke*. Hasil kalsinasi ini akan menjadi natrium aluminat. Oksida besi tidak mengalami perubahan, sedangkan silika membentuk polisilikat.

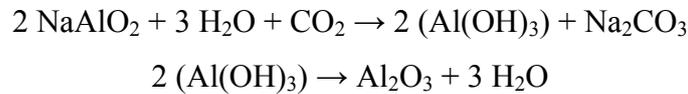
Pada tahap kedua larutan natrium hidroksida ditambahkan, natrium aluminat akan larut dan pengotor akan terpisah menjadi residu padat. Jumlah natrium hidroksida yang ditambahkan bergantung pada jumlah silika dalam bahan baku. Larutan natrium aluminat difiltrasi dan dilewatkan karbon dioksida sehingga aluminium hidroksida terpresipitasi. Larutan natrium karbonat yang tersisa dimanfaatkan kembali untuk proses tahap pertama. Aluminium hidroksida dikalsinasi untuk membentuk alumina.

2.2.2 Proses Le Chatelier

Proses Le Chatelier ditemukan oleh Henry Louis Le Chatelier di Perancis. Proses Le Chatelier merupakan metode pembuatan alumina dengan pemanasan bauksit dalam natrium karbonat (Na_2CO_3) pada temperatur 1200 °C sehingga membentuk natrium aluminat. Reaksi yang terjadi adalah :



Natrium aluminat (NaAlO_2) yang terbentuk diekstraksi dengan air membentuk aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Aluminium hidroksida yang terbentuk dipresipitasi dengan karbon dioksida (CO_2), difiltrasi, dan dikalsinasi membentuk alumina. Reaksi yang terjadi adalah :

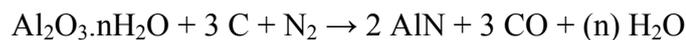


Proses ini tidak digunakan lagi setelah proses Bayer ditemukan. Hal ini dikarenakan proses ini memerlukan temperatur tinggi.

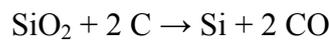
2.2.3 Proses Serpek

Proses Serpek digunakan untuk pemurnian bauksit jika di dalamnya mengandung silika. Proses Serpek terdiri dari :

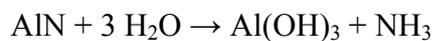
1. Bubuk bauksit dicampur dengan karbon dan dipanaskan hingga $1800\text{ }^\circ\text{C}$ dan dilewatkan nitrogen sehingga terbentuk aluminium nitrit. Reaksi yang terjadi adalah :



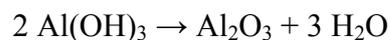
2. Silika diubah menjadi silikon. Reaksi yang terjadi adalah :



3. Aluminium nitrit dihidrolisis dengan air panas untuk presipitasi aluminium hidroksida. Reaksi yang terjadi adalah :



4. Aluminium hidroksida yang telah dihidrolisis dicuci dengan natrium karbonat, dikeringkan dan dipanaskan pada temperatur $1500\text{ }^\circ\text{C}$ untuk mendapatkan alumina murni. Reaksi yang terjadi adalah :



2.2.4 Sulphurous Acid Process

Proses ini merupakan proses pembuatan alumina dengan menggunakan asam sulfat. Prinsip dari proses ini adalah mengontakkan material yang mengandung alumina dengan asam sulfat, memanaskan campuran material dan asam supaya asam dapat bereaksi dengan material menghasilkan anhidrat, dan dekomposisi produk dengan pemanasan sehingga dihasilkan alumina yang dapat larut di dalam alkali.

Tahapan dalam proses ini adalah :

1. Material yang mengandung alumina dihancurkan

2. Pencampuran material dengan asam sulfat

Jumlah dan konsentrasi asam sulfat yang digunakan bergantung pada material yang akan diproses. Biasanya, jumlah asam sulfat yang digunakan lebih dari 50 % kandungan aluminanya.

3. Pemanasan campuran material dan asam sulfat.

Pemanasan campuran material dan asam sulfat dilakukan dengan 2 tahap. Pada tahap pertama asam sulfat bereaksi dengan material membentuk aluminium sulfat dan air. Temperatur pemanasan yang digunakan bergantung pada jenis material yang diproses. Sebagian besar material dapat dipanaskan pada temperatur 190 – 300 °C agar reaksi kimia dan penghilangan air dapat berlangsung sempurna.

Produk yang dihasilkan dari proses pemanasan pertama dipanaskan lagi pada temperatur tinggi supaya terjadi dekomposisi aluminium sulfat, besi sulfat, dan jenis sulfat lainnya yang terbentuk selama proses pemanasan pertama. Dekomposisi yang terjadi dalam *furnace* atau *kiln* yaitu sulfat akan terurai menjadi alumina yang siap diekstraksi dengan proses Bayer konvensional, gas sulfur trioksida (SO₃), dan gas sulfur dioksida (SO₂).

4. Produk yang keluar dari *furnace* atau *kiln* dicampur dengan natrium hidroksida untuk membentuk natrium aluminat. Natrium aluminat difiltrasi untuk memisahkan silika, besi hidroksida, dan pengotor lainnya. Setelah itu, diendapkan dan didekantasi. Aluminium trihidrat dipresipitasi dengan menambahkan kristal aluminium trihidrat dan dikalsinasi untuk membentuk alumina.

2.2.5 Proses *Lime – soda* Sintering dan Proses *Lime* Sintering

Proses *lime – soda* sintering dan proses *lime* sintering merupakan proses yang serupa. Kedua proses ini biasanya digunakan untuk memisahkan alumina dari bahan yang memiliki kandungan silika yang lebih tinggi dari alumina seperti *clay*. Pada proses *lime – soda* sintering, Na₂CO₃ (soda) ditambahkan pada tahap sintering, sedangkan pada proses *lime* sintering ditambahkan pada tahap *leaching*.

Proses *lime – soda* sintering terdiri dari tiga tahap yaitu sintering, ekstraksi, dan presipitasi. Pada tahap sintering, *clay*, Ca(OH)₂, dan Na₂CO₃ direaksikan dalam *kiln* pada temperatur 1280 °C – 1300 °C.

Reaksi ini membentuk campuran antara natrium aluminat dan dikalsium silikat. Reaksi fasa padat yang terjadi adalah :



Natrium aluminat kemudian diekstraksi dengan NaOH. Residu yang berupa dikalsium silikat hidrat dipisahkan dengan cara filtrasi. Filtrat kemudian dialiri dengan gas CO₂ untuk mempresipitasi Al(OH)₃. Al(OH)₃ kemudian dikalsinasi pada temperatur 1100 °C untuk menghasilkan alumina.

Proses *lime* sintering terdiri dari tiga tahap yaitu sintering, *leaching*, dan presipitasi. Pada tahap sintering, *clay* dan Ca(OH)₂ direaksikan dalam *kiln* pada temperatur 1280 °C – 1300 °C. Reaksi ini membentuk campuran antara kalsium aluminat dan dikalsium silikat. Kalsium aluminat kemudian diekstraksi dengan Na₂CO₃ atau NaOH untuk merubah kalsium aluminat menjadi natrium aluminat yang larut. Residu yang berupa dikalsium silikat hidrat dipisahkan dengan cara filtrasi. Filtrat kemudian dialiri dengan gas CO₂ untuk mempresipitasi Al(OH)₃. Al(OH)₃ kemudian dikalsinasi pada temperatur 1100 °C untuk menghasilkan alumina.

2.2.6 Proses Hybrid Bayer – Sintering

Proses *hybrid* Bayer – sintering merupakan aplikasi dari proses Bayer dan proses sintering. Proses ini digunakan untuk bauksit dengan kandungan alumina lebih tinggi dari silika. Namun, tidak cukup tinggi untuk diproses dengan proses Bayer. Pada proses ini, residu dari proses Bayer dicampur dengan bauksit yang memiliki kandungan silika lebih tinggi daripada alumina.

Campuran residu dan bauksit disintering untuk mengekstrak alumina yang tersisa. Campuran residu dan bauksit yang telah disintering dicampur dengan natrium hidroksida untuk membentuk natrium aluminat. Natrium aluminat difiltrasi untuk memisahkan silika, besi hidroksida, dan pengotor lainnya. Setelah itu, natrium aluminat diendapkan dan didekantasi. Aluminium trihidrat dipresipitasi dengan menambahkan kristal aluminium trihidrat. Setelah itu, aluminium trihidrat dikalsinasi untuk membentuk alumina.

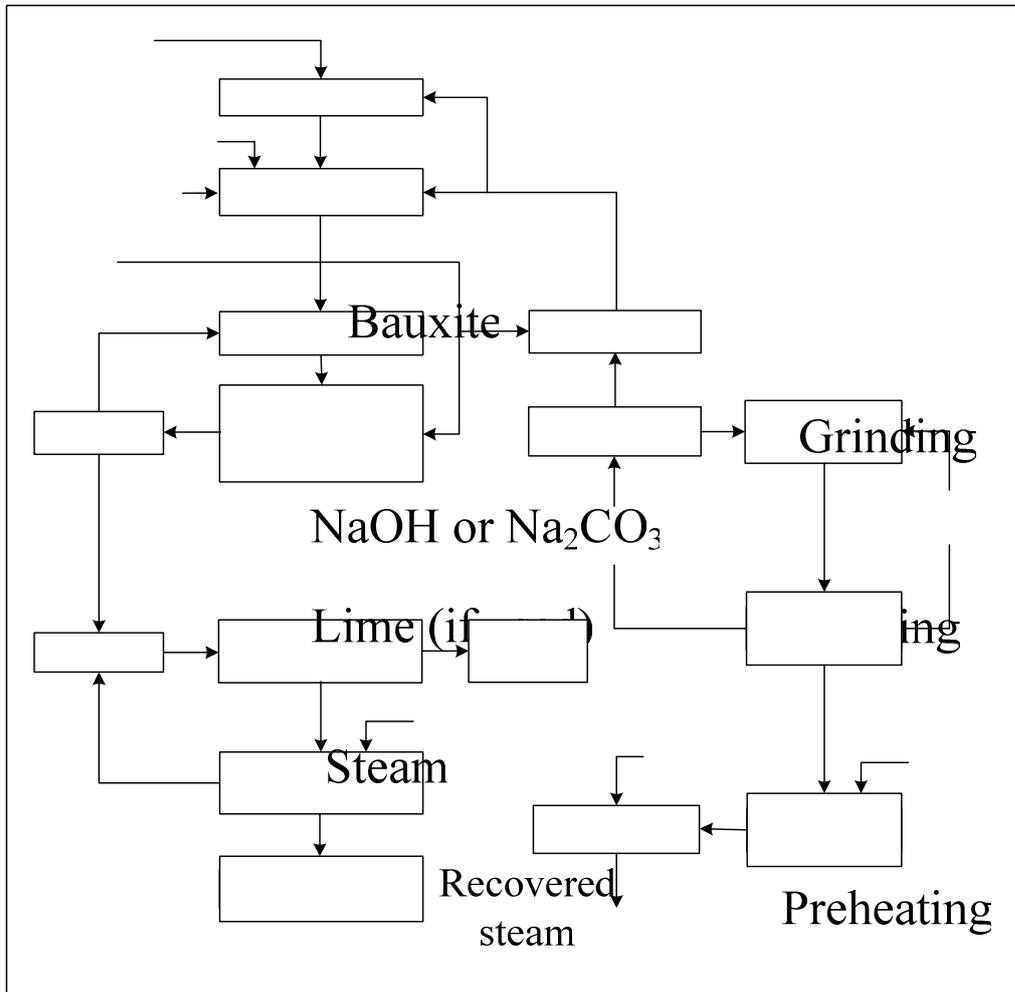
2.2.7 Proses Pechiney H⁺ (acid leaching)

Proses ini merupakan proses ekstraksi dengan menggunakan asam. *Clay* diekstraksi dengan asam sulfat 65 % pada temperatur 140 °C selama 1 – 4 jam. Kemudian, larutan dicuci untuk presipitasi sulfat yang akan dipisahkan dengan filtrasi. *Liquor* dilarutkan dalam gas asam klorida untuk presipitasi aluminium triklorida heksahidrat pada temperatur 40 °C.

Hasil presipitasi difiltrasi, dicuci dengan HCl, dipanaskan, dan dilarutkan dalam pelarut asam. Setelah itu aluminium triklorida difiltrasi kembali untuk menghilangkan zat – zat yang tidak larut, didinginkan, dan dipresipitasi dengan gas HCl. Aluminium triklorida yang dihasilkan dipanaskan pada temperatur 1100 °C untuk menghasilkan α – alumina dan asam hidroklorik.

2.2.8 Proses Bayer

Proses Bayer ditemukan oleh ahli kimia bernama Karl Bayer yang berasal dari Austria pada tahun 1888. Proses Bayer dikembangkan untuk mensuplai alumina dalam industri tekstil. Proses Bayer merupakan proses yang digunakan dalam *refining* bauksit untuk memproduksi alumina. Bauksit merupakan bijih aluminium yang mengandung 30 – 54 % alumina dan sisanya adalah campuran silika, oksida besi, dan titanium dioksida. Proses pemisahan alumina dengan proses Bayer dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram alir proses Bayer [Sumber: [Solution of alumina by attack under pressure](#)]

Expansion

alumina by attack

Proses Bayer terdiri dari 3 tahap yaitu ekstraksi, presipitasi, dan desikasi.

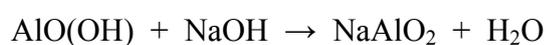
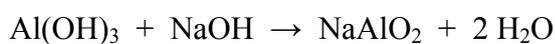
1. Tahap ekstraksi

Tahap ekstraksi atau tahap *digestion* merupakan tahap pertama dalam proses Bayer. Bauksit dan natrium hidroksida diumpankan secara terpisah ke dalam *autoclaves*, *tubular reactor*, dan *steel vessel*. Kondisi operasi tahap ini adalah pada temperatur 140 °C dan tekanan 34 atm. Alumina hidrat yang terdapat di dalam bauksit larut di dalam natrium hidroksida dan menghasilkan natrium aluminat (NaAlO₂).

Dilution

Separation of red muds

Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah :



Washing of red muds

Wash water

Aluminium hidroksida larut di dalam natrium hidroksida, sedangkan zat – zat lain seperti silika dan semua oksida logam lainnya tidak larut di dalam natrium hidroksida. Larutan natrium aluminat dan natrium hidroksida disebut dengan *green liquor*, sedangkan zat – zat yang tidak larut di dalam natrium hidroksida seperti silika, oksida besi, titanium oksida (TiO₂), kaolin (H₄Al₂Si₂O₉), dan oksida logam lain membentuk *red mud*. Natrium aluminat yang terbentuk didinginkan hingga 50 – 85 °C dalam *flash tank*. Ada dua macam reaksi lainnya yang terjadi pada proses ekstraksi yaitu :

a. *Desilication*

Desilication merupakan reaksi antara silika yang terdapat di dalam bauksit, seperti kaolin, dengan natrium hidroksida membentuk natrium silikat terlarut. Pada temperatur *digestion*, natrium silikat membentuk natrium aluminium silikat yang tidak larut.

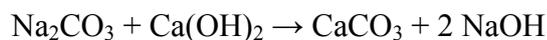
Reaksi yang terjadi adalah :



Desilication dipengaruhi oleh temperatur tinggi dan waktu tinggal untuk mendapatkan produk yang murni.

b. *Causticization of liquor*

Causticization of liquor merupakan reaksi antara kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) dengan natrium karbonat untuk meregenerasi natrium hidroksida dan presipitasi kalsium karbonat. Reaksi ini merupakan reaksi yang penting dalam proses Bayer. Reaksi yang terjadi adalah :

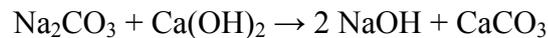


Natrium karbonat dihasilkan pada proses Bayer karena degradasi zat – zat organik oleh natrium hidroksida dan karena absorpsi CO₂ selama larutan terkena udara luar.

2. Tahap pemisahan

Tahap kedua dari proses Bayer adalah tahap pemisahan natrium aluminat dengan *red mud*. Larutan natrium aluminat difiltrasi untuk memisahkan *red mud*. *Red mud* ditambahkan flokulan untuk meningkatkan *settling rate*, kemudian dipindahkan dengan menggunakan *thickener* yang berdiameter besar. Partikel – partikel padat yang terkandung dalam *red mud* dipisahkan dengan *filter press*. Sedangkan, aluminium yang masih terdapat di dalam *red mud* didaur ulang dengan menggunakan *counter current*

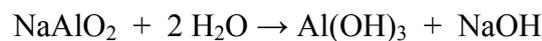
decantation. *Red mud* ditambah dengan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) untuk *causticization* supaya terbentuk natrium hidroksida dan kalsium karbonat. Reaksi yang terjadi yaitu :



Natrium hidroksida ini dapat digunakan kembali pada proses awal.

3. Tahap presipitasi

Presipitasi dilakukan untuk memisahkan aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah :

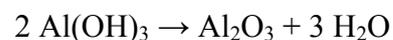


Presipitasi $\text{Al}(\text{OH})_3$ tidak terjadi dengan sendirinya, sehingga presipitasi dilakukan dengan cara menambahkan kristal aluminium hidroksida untuk menginisiasi presipitasi. Ada 6 macam *precipitating agents* yang dapat digunakan di dalam proses ini antara lain :

- Hidrogen peroksida (H_2O_2)
- Karbon dioksida (CO_2)
- Amonium karbonat ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$)
- Amonium hidrogen karbonat ($(\text{NH}_4)\text{HCO}_3$)
- Amonium aluminium sulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{Al}(\text{SO}_4)_2$)
- Kristal aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$)

4. Tahap kalsinasi

Aluminium hidroksida dikeringkan di dalam *rotary kiln* atau *fluid – bed calciners* pada temperatur 1100 – 1500 °C untuk melepaskan air. Hasil kalsinasi aluminium hidroksida adalah alumina. Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah :



Dari kedelapan proses pemisahan alumina dari *spent catalyst*, proses Bayer merupakan proses yang paling akhir ditemukan. Setelah ditemukan proses Bayer, proses – proses yang lain tidak digunakan lagi. Hal ini disebabkan :

- Proses Bayer merupakan proses yang paling ekonomis. Pada proses Bayer, tidak diperlukan temperatur yang tinggi dalam proses *digestion*.
- Proses Bayer tidak memerlukan banyak energi sehingga biaya produksi yang dibutuhkan tidak terlalu besar.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan dan alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian adalah :

1. *spent catalyst*,
2. Larutan natrium hidroksida (NaOH),
3. Gas karbondioksida,

Alat-alat utama yang digunakan adalah :

1. Water bath,
2. Oil bath,
3. Gelas kimia,
4. Magnetic stirrer,
5. Saringan buchner,
6. Furnace,

3.2 Tahap-tahap Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan terdiri dari :

1. Pencarian literatur,
2. Pelaksanaan tahap karbonisasi dengan variasi laju alir dan lama pembakaran,
3. Analisis hasil kemurnian,
4. Pembuatan laporan.

Variabel-variabel yang akan diteliti :

1. Laju alir gas : 1 L/menit dan 2 L/menit
2. Lama pembakaran : 30 menit dan 40 menit

Langkah-langkah Bayer :

1. Siapkan water bath, magnetic stirrer, heater. Atur suhu pemanasan pada 80 °C.
2. Siapkan larutan NaOH 25 %-b/b. Larutkan NaOH dalam gelas kimia 50 mL, diamkan sampai tidak terasa panas. Pindahkan hasil larutan ke labu 150 mL dan larutkan sesuai dengan jumlah yang dibutuhkan sambil dikocok.
3. Siapkan bubuk spent catalyst sebanyak 20 gram ke dalam labu erlenmeyer.
4. Masukkan erlenmeyer berisi bubuk spent catalyst ke dalam water bath yang sudah mencapai 80 °C dan 150 °C dan tuangkan NaOH ke dalam erlenmeyer tersebut.
5. Atur kecepatan magnetic stirrer dan diamkan selama 3 jam. Gunakan statif untuk menahan erlenmeyer.
6. Setelah 3 jam, angkat erlenmeyer dan pisahkan antara endapan dengan cairan yang diperoleh menggunakan saringan vakum yang dilengkapi kertas saring. Buat supaya semua cairan dapat melewati saringan, jika perlu tekan endapan supaya yakin cairan telah habis.
7. Timbang hasil endapan dan cairan.
8. Cairan yang diperoleh disiapkan untuk diisi dengan gas karbondioksida dengan laju alir 1 L/menit dan 2 L/menit. Akan terbentuk endapan yang berupa aluminium hidroksida. Catat nilai pH dan waktu kontak.
9. Saring endapan dan cairan tersebut menggunakan penyaring vakum yang dilengkapi dengan kertas saring.
10. Hasil endapan dan cairan ditimbang. Cairan kemudian diencerkan untuk dibuang, sedangkan endapan dimasukkan ke dalam cawan porselen untuk dibakar dengan bunsen selama 30 dan 40 menit.
11. Masukkan padatan kering yang diperoleh dari burner ke dalam plastik kecil untuk dianalisis kadar aluminanya

3.3 Jadwal Kerja Penelitian

Penelitian akan dilakukan di laboratorium penelitian Jurusan Teknik Kimia UNPAR, Bandung dan Jakarta. Tabel jadwal kerja disajikan dalam tabel 3.1.

Tabel 3.1. Jadwal kerja penelitian

| No | Kegiatan | Juli | Agustus | September | Oktober | November | Desember |
|----|---------------------|------|---------|-----------|---------|----------|----------|
| 1 | Pencarian literatur | ■ | | | | | |
| 2 | Tahap karbonisasi | | ■ | ■ | | | |
| 3 | Analisis | | ■ | ■ | | | |
| 4 | Tahap Pemurnian | | | | ■ | ■ | |
| 5 | Analisis | | | | ■ | ■ | |
| 6 | Pembuatan laporan | | | | | | ■ |

BAB IV

HASIL PENELITIAN

1. Pembentukan Na-Al

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|
| catalyst (g) | 20 | | | | 20 | | | |
| Rasio | 1 : 5 | | | | 1 : 5 | | | |
| NaOH (mL) | 100 | | | | 100 | | | |
| NaOH (%-b/b) | 25 | | | | 25 | | | |
| Larutan (g) | 100 | | | | 100 | | | |
| NaOH (g) | 25 | | | | 25 | | | |
| NaOH (mol) | 0,625 | | | | 0,625 | | | |
| konduktivitas NaOH | 215 | 229 | 238 | 243 | 199 | 223 | 227 | 238 |
| T (°C) | 80 | | | | 80 | | | |
| t (jam) | 3 | | | | 3 | | | |
| w (rpm) | skala 6 | | | | skala 6 | | | |
| endapan (g) | 35.1 | 36.5 | 34.2 | 32.7 | 29.5 | 33.1 | 31.1 | 37.6 |
| cairan (g) | 30.4 | 87 | 92.3 | 97.2 | 36.1 | 91.2 | 94.2 | 94.3 |
| Konduktivitas | 127 | 188 | 197 | 174 | 99 | 191 | 191 | 194 |

2. Pembentukan Al(OH)_3

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| pH awal | 12.5 | 12.64 | 12.75 | 12.74 | 12.45 | 12.67 | 12.6 | 12.57 |
| pH akhir | 9.68 | 9.47 | 9.47 | 9.4 | 10.28 | 9.59 | 9.44 | 9.4 |
| endapan (g) | 6 | 11,3 | 15,2 | 16,6 | 16,2 | 11,9 | 12,8 | 22 |
| cairan (g) | - | 74,7 | 70,8 | 79,4 | - | 78,2 | 74,5 | 68,6 |
| Laju alir (L/min) | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| tekanan CO_2 (bar) | 1 | | | | | | | |
| lama CO_2 | 80 | 210 | 90 | 100 | 80 | 180 | 100 | 100 |
| Konduktivitas | - | 58,5 | 57,6 | 57,8 | - | 58,5 | 57,8 | 57,6 |

3. Pembentukan Al₂O₃

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T (°C) | Bunsen | | | | | | | |
| t (menit) | 30 | | | | 40 | | | |
| padatan (g) | 2,4 | 3,4 | 5,9 | 4,8 | 7,2 | 4 | 3,7 | 5,3 |
| kemurnian (%) | 2,87 | 4,66 | 10,01 | 7,93 | 1,17 | 6,98 | 6,32 | 5,28 |
| alumina (g) | 0,069 | 0,158 | 0,591 | 0,381 | 0,084 | 0,279 | 0,234 | 0,28 |
| % recovery | 0,765 | 1,76 | 6,562 | 4,229 | 0,936 | 3,102 | 2,598 | 3,109 |

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Tahap ekstraksi reaktif dengan NaOH 25 %

Kondisi operasi tahap ekstraksi reaktif diperoleh berdasarkan penelitian-penelitian yang sudah dilaksanakan sebelumnya dan memperoleh bahwa konsentrasi NaOH 25 % dengan rasio 1 : 5 selama 3 jam pada 80 °C. Pengukuran reaksi yang terjadi pada tahap ini menggunakan konduktivitas karena sulitnya pengukuran secara kuantitatif terhadap konversi NaOH dan jumlah Na-aluminat yang diperoleh. Larutan NaOH merupakan larutan elektrolit yang mengandung ion-ion Na^+ dan OH^- , kedua ion tersebut akan memberikan daya hantar yang dapat terukur oleh konduktivitas. Larutan NaOH tersebut bereaksi dengan *spent catalyst* membentuk larutan Na-aluminat (ekstrak) yang diasumsikan merupakan larutan elektrolit sehingga dapat terukur pula konduktivitasnya. Asumsi ini didasarkan bahwa ion-ion Na akan membentuk senyawa kompleks dengan alumina dan akan tetap memiliki daya hantar karena masih mengandung sisa ion-ion Na^+ . Apabila ion-ion Na^+ dalam NaOH telah bereaksi maka jumlah ion-ion tersebut akan berkurang dan nilai konduktivitas dari larutan akan menurun dibandingkan dengan nilai konduktivitas larutan NaOH. Hal ini telah dibuktikan pada penelitian sebelumnya dan diperoleh hasil yang sama pada penelitian sekarang.

Konduktivitas rata-rata NaOH awal sebesar 226,5 TGS g/L. Setelah mengalami ekstraksi reaktif diperoleh rata-rata konduktivitas larutan sebesar 189,17 TGS g/L. Hal ini menunjukkan bahwa ion-ion dalam larutan NaOH telah mengalami reaksi sehingga jumlah ion-ion bebas menjadi berkurang dan membuat nilai konduktivitas menjadi turun. Penurunan rata-rata nilai konduktivitas yang diperoleh sebesar 43,83 TGS g/L. Namun demikian, pembentukan natrium aluminat tidak dapat dilihat dari semakin kecilnya konduktivitas hasil ekstraksi atau semakin besarnya hasil ekstraksi karena tidak adanya data-data yang mendukung tentang konduktivitas natrium aluminat.

Pada tempuhan 1 dan 5 diperoleh bahwa jumlah massa cairan sedikit dengan nilai konduktivitas yang kecil dibandingkan dengan yang lain. Hal ini dikarenakan tempuhan tersebut dilakukan tanpa menggunakan kondensor sehingga jumlah NaOH yang ada

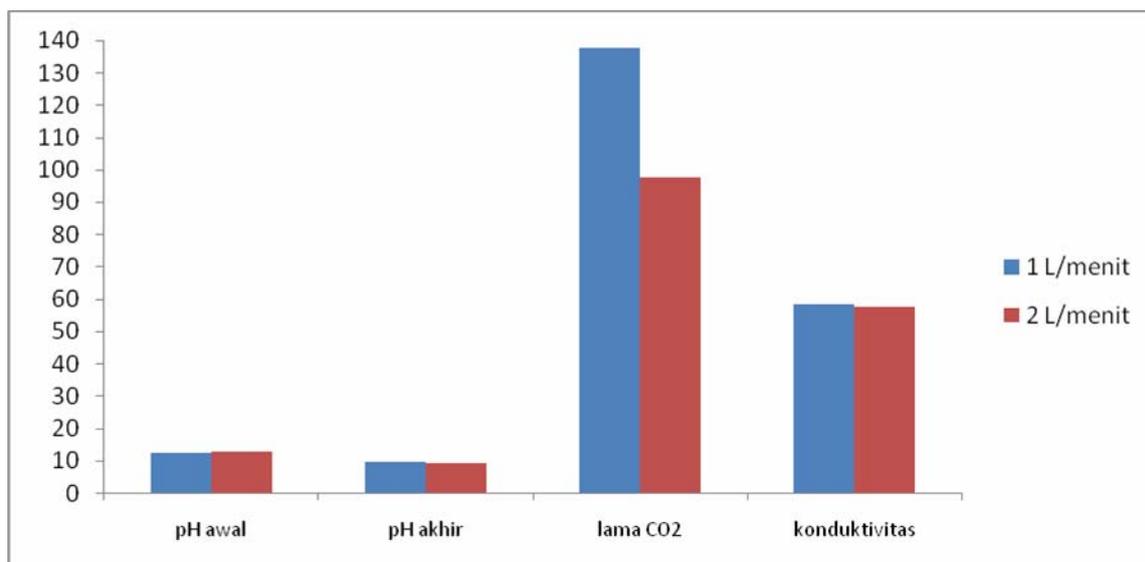
menguap dan hasil larutan ekstrak sedikit. Akibat penguapan, jumlah ion Na^+ juga hilang sehingga nilai konduktivitas yang diperoleh jauh lebih rendah dibandingkan dengan yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kondensor sangat diperlukan pada tahap ekstraksi reaktif. Perbedaan nilai konduktivitas tersebut akan dibuktikan pada tahap-tahap selanjutnya dalam penentuan jumlah alumina yang diperoleh. Rafinat berupa endapan yang diperoleh dicoba untuk diekstraksi kembali agar diperoleh penambahan larutan Na-aluminat. Namun hasil ekstraksi kedua menunjukkan perubahan konduktivitas yang sangat kecil dan tidak signifikan perubahannya sehingga dinyatakan bahwa ekstraksi cukup dilakukan satu kali.

5.2 Tahap presipitasi larutan natrium aluminat dengan gas karbondioksida

Larutan ekstrak yang diperoleh dari tahap pertama dipresipitasi dengan menggunakan gas karbondioksida untuk mengendapkan aluminium menjadi aluminium hidroksida. Presipitasi dilakukan dengan mengalirkan gas karbondioksida selama 30 menit pada tekanan 1 atm dengan laju alir 1 L/menit dan 2 L/menit. Hasil presipitasi berupa endapan putih yang akan dilanjutkan ke tahap pembakaran. Untuk lebih meyakinkan hasil presipitasi, larutan sisa tersebut diukur konduktivitasnya. Hasil yang diperoleh adalah terjadi penurunan konduktivitas yang besar, bahkan jauh di bawah konduktivitas larutan ekstrak. Hal ini menunjukkan bahwa larutan sudah mengalami penurunan jumlah ion-ion Na^+ . Hasil presipitasi disajikan pada gambar 5.1.

Secara keseluruhan, terjadi penurunan pH dan konduktivitas selama proses presipitasi dan perbedaan laju alir tidak memberikan perbedaan pH akhir dan konduktivitas yang signifikan. Penurunan pH menunjukkan bahwa Na-aluminat bereaksi menjadi aluminium hidroksida, ion-ion dalam larutan Na-aluminat bereaksi dan mengurangi ion-ion OH^- sehingga pH menjadi turun menuju ke netral. Penurunan konduktivitas pada larutan juga menunjukkan bahwa telah terjadi pengurangan ion-ion bebas dalam larutan dan masih ada sisa-sisa ion bebas yang tidak bereaksi. Namun hal ini berbeda untuk tempuhan 1 dan 5, akibat jumlah larutan sangat sedikit maka semua larutan ekstrak menjadi endapan. Penurunan pH tidak dapat mencapai netral karena diduga masih ada ion-ion bebas lain yang tidak dapat terpresipitasi menjadi aluminium hidroksida. Selain itu dugaan munculnya Na_2CO_3 juga memungkinkan pH tidak dapat menjadi netral. Hal ini diduga

jumlah NaOH yang berlebih membuat ion-ion Na^+ yang ada di larutan bereaksi terlebih dahulu dengan gas karbondioksida membentuk Na_2CO_3 , mengingat ion Na^+ bervalensi satu sehingga lebih aktif. Jumlah endapan yang sedikit dikarenakan sisa ion Na^+ yang ada tidak dapat bereaksi kembali karena kurangnya tumbukan antar molekul. Tumbukan antar molekul tersebut dapat diakselerasi dengan menggunakan pengadukan, namun dalam penelitian ini tidak dilakukan karena keterbatasan desain alat.

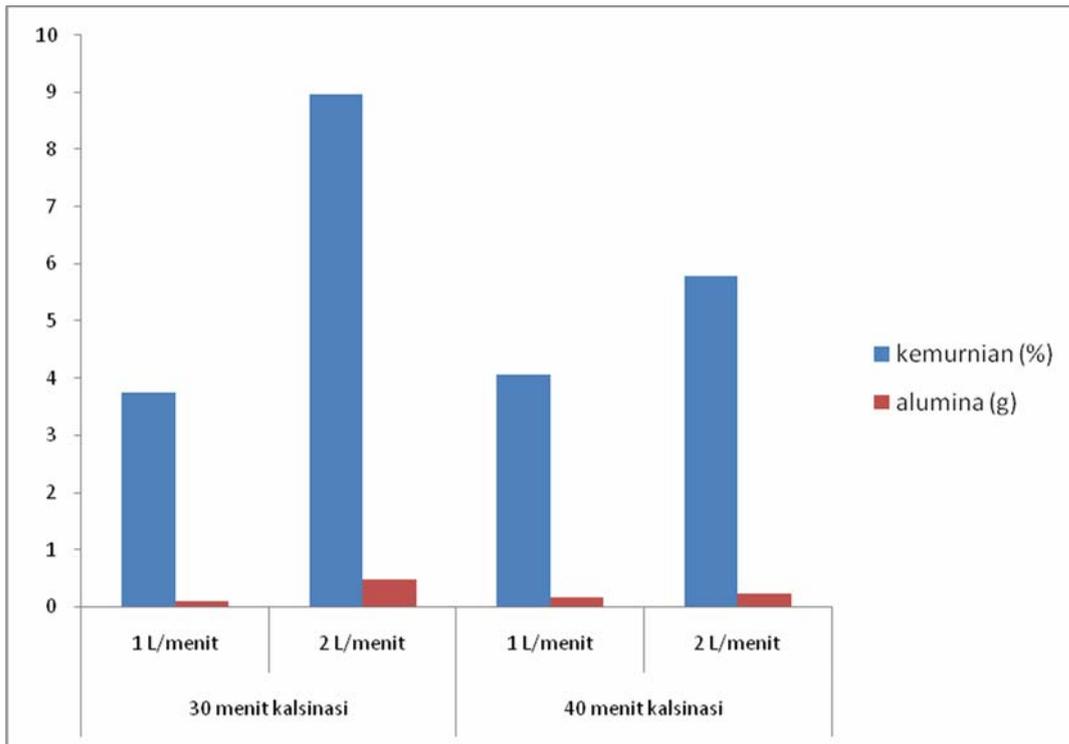


Gambar 5.1 Hasil presipitasi

Terlihat pula bahwa laju alir yang lebih kecil membutuhkan waktu presipitasi yang lama dibandingkan dengan laju alir yang besar untuk hasil akhir konduktivitas dan pH yang sama. Laju alir gas karbondioksida yang kecil akan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk melakukan reaksi dengan Na-aluminat karena jumlah molekul yang bertabrakan satu sama lain tidak banyak.

5.3 Tahap pembentukan alumina

Tahap terakhir dari proses pembuatan alumina adalah pembakaran endapan hasil presipitasi. Pembakaran dilakukan selama 30 menit menggunakan pembakar bunsen. Hasil pembakaran dianalisa menggunakan AAS di Dinas Pertambangan untuk mendapatkan kemurnian alumina. Hasil pembakaran dalam furnace disajikan dalam gambar 5.2.



Gambar 5.2 Hasil pembakaran

Kemurnian alumina tertinggi diperoleh pada 30 menit dengan laju alir gas karbondioksida 2 L/menit. Hal ini menunjukkan bahwa laju alir yang tinggi lebih banyak mengendapkan aluminium hidroksida karena membentuk aliran turbulen di dalam reaktor. Namun hal ini masih sedikit apabila dilihat dari jumlah alumina yang dapat diekstrak. Waktu 30 menit merupakan waktu yang optimum karena setelah 30 menit, alumina akan teroksidasi sehingga terjadi pembentukan senyawa baru. Selain itu, akan terbentuk senyawa SiO_2 apabila terlalu lama.

Melihat hasil kalsinasi, dapat disimpulkan bahwa ekstraksi merupakan tahap yang sangat utama dalam pembentukan alumina sehingga hasil larutan ekstraksi harus dapat dikuantifikasi secara pasti. Hal ini karena kalsinasi hanya berfungsi untuk pemurnian saja. Namun tidak menutup kemungkinan adanya temperatur kalsinasi yang kurang optimum sehingga alumina yang terbentuk masih sedikit.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Ekstraksi reaktif pada tahap awal metode Bayer untuk penelitian ini cukup dilakukan satu kali,
2. Turunnya nilai konduktivitas dan pH dari larutan ekstrak saat presipitasi menunjukkan adanya endapan yang terbentuk namun harus dilakukan analisis secara pasti untuk menunjukkan jumlah aluminium hidroksida,
3. Presipitasi dapat dilakukan pada reaktor batch yang berbentuk silinder panjang,
4. Penggunaan laju alir 2 L/menit selama 100 menit memberikan hasil yang baik untuk proses presipitasi dan perlu dilakukan pengadukan selama proses tersebut,
5. Hasil alumina terbanyak adalah pada laju presipitasi 2 L/menit dengan waktu kalsinasi 30 menit,
6. Tahap ekstraksi reaktif merupakan tahap utama dalam pembentukan alumina sehingga harus optimal dalam pelaksanaannya.

Saran untuk melanjutkan penelitian ini adalah :

1. Perlu dilakukan pembuatan kurva yang menghubungkan konsentrasi NaOH dan nilai konduktivitas untuk meyakinkan bahwa telah terjadi penurunan jumlah ion Na^+ ,
2. Perlu dilakukan pengulangan kembali terhadap penentuan lama waktu ekstraksi 2 jam dengan melihat perubahan konduktivitas NaOH dan pengecekan kembali terhadap variasi konsentrasi NaOH 20 % dan rasio 1 : 3, mengingat hasil presipitasi jauh lebih baik dari sebelumnya,
3. Perlu dicoba menggunakan jumlah NaOH yang sesuai dengan perhitungan stoikiometri,
4. Perlu dilakukan 2 kali presipitasi dengan gas karbondioksida,
5. Perlu dibuat desain alat presipitasi yang baik yang mampu menangani 3 fasa sekaligus.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Zahrani, A., dan Abdel-Majid, M.H., *Production of Liquid Alum Coagulant from Local Saudi Clays*, Journal of Engineering Science vol. 15 no. 1, 2004,
- Anonim, *Aluminum*, <http://scifun.chem.wisc.edu/CHEMWEEK/Aluminum.html>
- Anonim, *Alumina (Aluminium oxide) – The Different Types of Commercially Available Grades Chemical Formula*, <http://www.azom.com/details.asp>
- Anonim, *Alumina Trihydrate (ATH)*, <http://www.aluminachem.com>
- Anonim, *Alumina Process*, <http://www.energymanagertraining.com>
- Anonim, *Primary Aluminium production*, Kaiser Aluminium Plant in Gramercy, Louisiana.
- Anonim, *Bayer Process (Chemical Process)*, <http://www.chemical-universe.com>
- Anonim, *Electrolytic Processes of Metals*, <http://www.ualberta.ca.htm>
- Bridenbaugh, Peter R., dan J. T. Stanley, *Aluminium Processing*, Encyclopedia Britannica, Inc., 2007. <http://www.britannica.com>
- Dewey, John L. dan Scott, Charles E., *Alumina Production by Nitric Acid Extraction of Clay*, United States Patent 4246239, www.freepatentsonline.com,
- El-Katatny, Ezzat A., M. I. Zaki, S. A. Halawy, dan M. A. Mohamed, *Surface and Bulk Properties of Alumina Recovered Under Various Conditions from Aluminium Dross Tailings Chemical Waste Versus Bauxite Ore*, Materials Research Society, Mesir, 2002.
- Forte, Guy, dan R. Girard, *Bayer Process Alumina Production – Alcan Bayer Experimental Centre*, Alcan International Ltd., 2004.
- Garole, Dipak J., dan Sawant, A.D., *Simultaneous Recovery of Nickel and Aluminium from Spent Reformer Catalyst*, www.ecoweb, June 2005,
- *Isolation of Aluminium by Bayer Process*, www.wikipedia.com,
- Liang, David T., *Management of Spent Catalyst in Petroleum Refineries*, 2nd Asian Petroleum Technology Symposium Program,
- Mancl, Karen, *Wastewater Treatment Principles and Regulations*, <http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0768.html>
- Marcantonio, Paul J., *Process for Metals Recovery from Spent Catalyst*, United States Patent 20070025899, www.freepatentsonline.com

- Matjie, Ratale Henry; De Wet, Ewald Watermeyer, dan Mdleni, Masikana Millan, *Selective Recovery of Aluminium, Cobalt and Platinum Values from a Spent Catalyst Composition*, United States Patent 20040219082, www.freepatentsonline.com,