

# Desulfurisasi Batubara dengan Metode Leaching Menggunakan Pelarut Asam Klorida (HCl)

Syafril Maldi<sup>1\*</sup>, Yunasril<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang

[\\*syafriImaldi55@gmail.com](mailto:*syafriImaldi55@gmail.com)

[\\*\\*inos83@yahoo.co.id](mailto:**inos83@yahoo.co.id)

**Abstract.** Combustion of coal has high sulphur content causes environmental pollution, damage (corrosive) and shortens the life of industrial plant equipment. Combustion of has high sulphur content produces Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) which can disrupt humanlife, such as causing tightness in the respiratory tract, causing acid rain and corrosion on plant equipment. So that coal can be used as fuel then desulfurization process is carried out first. Desulfurization of coal is needed not only to minimize environmental pollution caused by emissions of Sulphur dioxide during combustion, but also to improve the quality of coal. Desulfurization of coal is a process of reducing sulphur content from coal. The desulfurization process in this research uses a chemical method with Hydrochloric acid (HCl) solvent. Coal that will be desulfurized is coal from flemming seam produced by PT. Nusa Alam Lestari Site Sinamar, Dharmasraya Regency, West Sumatera Province. Flemming seam has a thickness of up to 1,2 meters. This layer has calorific values between 5100 – 5500 kcal/kg. This coal is lignite with an average sulphur content of 1,5 – 2,2%. This coal is treated by modifying the concentration of Hydrochoric acid (HCl), which is 0,4 M, 0,6 M, 0,8 M, 1 M, and 1,2 M. After leaching the coal, the next process is to test sulphur content with sulfur analyzer. Of all variations in the concentration of Hydrochloric acid (HCl), the optimum concentration is obtained, HCl 0,8 M which can reduce sulphur levels to 0,59%.

**Keywords:** desulfurization, coal, sulphur, Hydrochloric acid, combustion.

## 1 Pendahuluan

Berdasarkan observasi di lapangan ditemukan batubara *flemming seam* yang memiliki nilai kalori 5100 kkal/kg – 5500 kkal/kg dengan kadar sulfur 1,5% - 2,2% yang menumpuk di *stockpile*. Setelah dipakai untuk dijual maupun untuk *blending*, dari bulan Agustus 2016 sampai bulan Februari 2017 jumlah batubara yang masih ada pada tumpukan *flemming seam* di *stockpile* sebanyak total 10.422 ton dan jumlah ini akan terus bertambah karena masih di produksinya batubara *flemming seam*.

Dari sini ditemukan juga terganggunya proses bongkar muat pada area *stockpile*. Ini terjadi karena pada jalan masuk ke *stockpile* terdapat tumpukan *flemming seam* yang mengakibatkan terjadinya antrian pada jalur masuk tersebut. Antrian bongkar muat tersebut mengakibatkan susahya dilakukan *blending* pada batubara tersebut. Pemakaian batubara untuk industri-industri tertentu diperlukan persyaratan kandungan sulfur

yang relatif rendah sekali, dimana standar maksimal kadar sulfur yang terkandung dalam batubara adalah di bawah 1%<sup>[1]</sup>. Hal tersebut membuat semakin banyak batubara yang tidak sesuai dengan standar pabrik menjadi menumpuk di *stockpile*.

Berdasarkan baku mutu udara ambien (PP Republik Indonesia Nomor 41 tahun 1999), salah satu parameter pencemaran udara adalah sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>)<sup>[2]</sup>. Sulfur dioksida terutama dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara atau minyak bumi. Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) di udara mempunyai pengaruh langsung terhadap manusia terutama karena sifat iritasi dari gas itu sendiri.

Pembakaran batubara berkadar sulfur tinggi menghasilkan gas sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) yang secara langsung maupun tidak langsung dapat mengganggu kehidupan manusia, seperti menyebabkan sesak pada saluran pernapasan, serta menyebabkan hujan asam dan korosi pada peralatan pabrik<sup>[3]</sup>. Sulfur pada hasil bahan

bakar bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), yang merupakan polutan udara. Untuk mengurangi gas  $\text{SO}_2$  dapat dilakukan dengan mengurangi kandungan sulfur sebelum batubara dibakar (desulfurisasi)<sup>[4]</sup>.

Metode pemisahan oksida sulfur yang lebih dikenal dengan istilah desulfurisasi ini dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan metode basah (*wet method*) dan metode kering (*dry method*)<sup>[4]</sup>. Penelitian ini menggunakan metode basah, yaitu dengan cara metode *leaching*, dimana sulfur yang ada pada batubara akan terlarut oleh *reagents* kimia dalam temperatur operasi pencampuran/pengadukan tertentu. Proses *leaching* ini menggunakan pelarut kimia yang dapat mengkonversi pirit sulfur ( $\text{FeS}_2$ ) kedalam bentuk zat terlarut.

## 2 Lokasi Penelitian

Batubara yang dijadikan sebagai sampel desulfurisasi berasal dari PT. Nusa Alam Lestari Site Sinamar Kabupaten Dharmasraya Provinsi Sumatera Barat. Lokasi penambangan yang terletak pada  $101^{\circ}43'3''$ -  $101^{\circ}43'58''$  BT dan  $01^{\circ}24'15''$ -  $01^{\circ}25'15''$  LS dapat ditempuh dengan jalur darat yang memerlukan waktu lebih kurang tujuh jam perjalanan dari kota Padang.

Penambangan yang dikelola oleh PT. Nusa Alam Lestari merupakan milik wilayah IUP KUD Sinamar Sakato. Untuk menempuh lokasi penambangan PT. Nusa Alam Lestari dapat ditempuh dari:

1. Padang – Sungai Rumbai berjarak 220 km di bagian ruas jalan lintas Sumatera. Dapat ditempuh dengan berbagai jenis kendaraan bermotor dengan lama waktu tempuh dari kota Padang berkisar 5 – 6 jam.
2. Dari Sungai Rumbai – Jorong Sinamar Nagari Sungai Limau dapat ditempuh dengan berbagai jenis kendaraan bermotor (lama waktu tempuh berkisar 1 jam). Akan tetapi, karena permukaan jalan masih berupa tanah dan perkerasan, maka kendaraan yang paling baik digunakan adalah jenis penggerak 4 roda (4 *wheel drive*).

Selanjutnya proses desulfurisasi (*leaching*) dilakukan di Laboratorium Kimia Fakultas MIPA Universitas Negeri Padang dan uji kadar sulfur dilakukan di Laboratorium Balai Diklat Tambang Bawah Tanah Kota Sawahlunto.

## 3 Kajian Teori

### 3.1 Teori Pembentukan Batubara

Batubara adalah berupa sedimen organik bahan bakar hidrokarbon padat yang terbentuk dari tumbuh-tumbuhan yang telah mengalami pelapukan secara biokimia, kimia dan fisika dalam kondisi bebas oksigen yang berlangsung pada tekanan serta temperatur tertentu pada kurun waktu yang sangat lama<sup>[5]</sup>. Bahan organik utamanya yaitu tumbuhan yang dapat berupa jejak kulit pohon, daun, akar, struktur kayu, spora, polen, damar, dan lain-lain. Selanjutnya bahan organik tersebut mengalami pelapukan sehingga menyebabkan perubahan sifat-sifat fisik maupun kimia baik sebelum ataupun sesudah tertutup oleh

endapan lainnya. Ada dua teori pembentukan batubara, yaitu<sup>[6]</sup>:

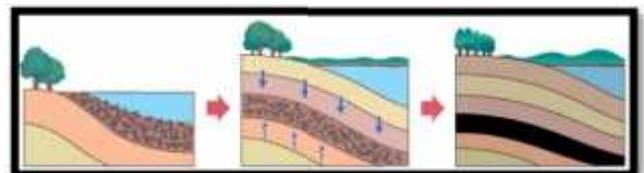
#### 3.1.1 Teori Insitu

Teori ini mengatakan bahwa batubara terbentuk secara sedimentasi tepat dimana tumbuhan pembentuknya berada. Tumbuhan purba tersebut mati dan tertimbun oleh lapisan sedimen sebelum tertransportasi ke tempat lain dan mengalami proses pembentukan batubara (*coalification*). Lapisan batubara berdasarkan teori ini tersebar luas dan merata, serta memiliki kualitas baik karena kadar abu lebih kecil.

#### 3.1.2 Teori Drift

Teori ini menjelaskan bahwa tempat tumbuhnya tumbuhan purba pembentuk lapisan batubara berbeda dengan tempat pembentukan batubara tersebut. Tumbuhan purba yang mati pada suatu tempat mengalami perpindahan atau tertransportasi ke tempat lain kemudian di tempat lain tersebut tumbuhan purba terakumulasi dan tertimbun oleh sedimen. Dengan waktu berjuta tahun akan mengalami proses pembentukan batubara (*coalification*). Jenis batubara berdasarkan teori *drift* mempunyai penyebaran lapisan yang tidak luas tetapi dijumpai di beberapa tempat. Kualitas batubara ini kurang baik karena terdapat pengotor yang terangkut saat proses transportasi dari tempat asal ke tempat sedimentasi.

Pembentukan batubara diawali dengan tahap diagenesis atau penguraian tumbuhan asal menjadi gambut yang dipengaruhi oleh kemampuan penguraian material asal oleh bakteri dalam tahap penguraian serta adanya keberadaan air bersamaan dengan akumulasi material asal pada proses tersebut. Tahap selanjutnya adalah tahap geokimia dan metamorfisme yaitu salah satu tahapan *coalification* dimana terjadi perubahan fisika dan kimia gambut menjadi level lignit, subbituminus, bituminous, hingga antrasit. Adapun tahapan-tahapan yang terjadi adalah pembusukan, pengendapan (sedimentasi), dekomposisi, geotektonik (pegaruh tektonik bumi yang menimpakan tekanan dan suhu pada endapan batubara), dan erosi (proses erosi suatu lapisan batuan memungkinkan terjadi singkapan batuan tidak terkecuali batubara). Gambaran proses pembentukan batubara dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Proses Pembentukan Batubara<sup>[5]</sup>

Pada batubara terdapat tiga unsur bahan organik yaitu *maceral*. *Maceral* batubara terbagi tiga yaitu *vitrinite*, *ekstrinite*, dan *inertinite*. *Vitrinite* berasal dari serat kayu tumbuhan. *Ekstrinit* berasal dari unsur-unsur yang mengandung lilin atau resin tumbuhan seperti spora,

kutikula, getah, dan alga. *Inertinite* berasal dari bahan yang sama dengan bahan pembentuk *vitrinite* tetapi telah mengalami proses oksidasi<sup>[6]</sup>.

Para ahli telah melakukan penelitian tentang batubara yang berperan penting dalam indikator keberadaan minyak bumi atau sebagai batuan induk hidrokarbon. Indikasi yang menunjukkan bahwa batubara berperan aktif dalam pembentukan hidrokarbon dengan ditemukan *veins* dari unsur bitumen dalam batubara dan *maceral-maceral* yang menunjukkan adanya bahan yang sama dengan unsur bitumen.

Pembentukan batubara dan minyak bumi juga dipengaruhi oleh kematangan bahan organik/*maceral* itu sendiri. Kematangan *maceral* adalah suatu perwujudan dari derajat pembatubaraan (*level of coalification*) yang telah dicapai oleh pembatubaraan dan dapat didefinisikan sebagai proses perubahan lebih tinggi seperti batubara muda, subbituminus, antrasit, dan meta antrasit. Proses perubahan disebabkan oleh faktor geologi, waktu, suhu, dan tekanan<sup>[6]</sup>.

### 3.1 Tingkatan dan Struktur Kimia Batubara

Fakta geologi tentang terbentuknya batubara berasal dari sisa-sisa tumbuhan. Hal tersebut dibuktikan dengan komposisi kimia tumbuhan dan batubara hampir sama. Kesamaannya adalah adanya proporsi unsur karbon, hidrogen, dan oksigen. Komposisi tumbuhan adalah selulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ), lignin ( $C_{12}H_{18}O_9$ ), dan komponen lainnya seperti protein, minyak asiri, asam organik, tannin dan lainnya. Struktur lignin adalah aromatik. Pada saat proses dekomposisi, lignin tahan terhadap perlakuan mikroorganisme, tetapi selulosa dapat didekomposisi oleh mikroorganisme menjadi karbon dioksida, metana dan asam alifatik. Selulosa juga dapat membentuk struktur aromatik selama proses pembentukan batubara.

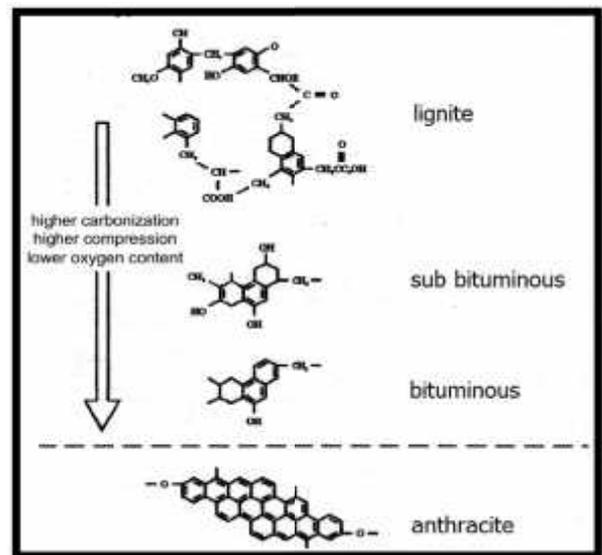
Kandungan unsur batubara lainnya seperti nitrogen pada batubara disebabkan karena aktifitas bakteri perombak nitrogen yang terkandung pada protein tumbuhan serta kandungan oksigen yang terdapat pada gugus hidroksi, karboksil dan metoksil pada batubara. Keberadaan gugus tersebut akan berkurang seiring dengan mengikatnya *grade* batubara. Komposisi kimia batubara berdasarkan tingkatannya dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komposisi Rata- Rata Bahan Bakar Batubara<sup>[5]</sup>

Bahan bakar	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
Kayu	49,65	6,23	0,92	43,20
Gambut	55,44	6,28	1,72	36,56
Lignit	72,95	5,24	1,31	20,50
Bituminus	84,24	5,55	1,52	8,69
Antrasit	93,50	2,81	0,97	2,72

Batubara memiliki struktur yang sangat kompleks, tersusun dari struktur aromatik dan struktur alifatik. Struktur aromatik batubara terdiri dari cincin benzena yang saling berikatan, sedangkan struktur alifatik berbentuk struktur rantai terbuka. Studi yang dilakukan oleh para ahli tentang peningkatan struktur aromatik

pada batubara beriringan dengan peningkatan *grade* batubara hingga tingkat grafit. Perubahan struktur aromatik batubara diringi dengan peningkatan *grade* batubara dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2 .** Struktur Dasar Batubara Dari Beberapa Peringkat<sup>[5]</sup>

Batubara memiliki tingkatan atau *grade* berdasarkan umur, kualitas, struktur dan komposisi kimia. Adapun tingkatan batubara adalah sebagai berikut<sup>[4]</sup>.

#### 3.1.1 Gambut

Gambut adalah batuan sedimen organik yang dapat terbakar, bersal dari tumpukan hancuran, atau bagian dari tumbuhan yang terhumidifikasi dalam kondisi tertutup udara, tidak padat, kandungan air lebih dari 75%, dan kandungan mineral lebih kecil dari 50% dalam kondisi kering.

#### 3.1.2 Lignit

Batubara lignit dikenal dengan *brown coal*. Jenis batubara ini memiliki umur diperkirakan *cretaceous* hingga tersier. Batubara lignit bercirikan memiliki warna hitam kecoklatan, rapuh, kalori rendah, kandungan karbon sedikit sedangkan kandungan air, sulfur, dan abu banyak. Kandungan air sekitar 35% hingga 75%.

#### 3.1.3 Subbituminus

Batubara subbituminus merupakan peralihan antara lignit hingga bituminus mempunyai warna hitam kabur, nilai kalori relatif rendah.

#### 3.1.4 Bituminus

Batubara bituminous memiliki warna hitam mengkilat, kurang kompak, nilai kalori tinggi, kandungan karbon relatif tinggi sekitar 68% -86%, kandungan abu, air 8-

10%, dan sulfur sedikit. Kandungan volatil bervariasi dari sedang hingga tinggi.

### 3.1.5 Antrasit

Karakteristik batuabara antrasit adalah warna hitam mengkilat, kompak, nilai kalori tinggi, kandungan karbon sangat tinggi yang berkisar 86%-98%, kandungan air kecil 8%, abu, dan sulfur sangat sedikit. Antrasit terbentuk dari transformasi bituminus dimana lapisan mengalami proses geotektonik, penipaan suhu dan tekanan yang lebih tinggi.

## 3.2 Parameter Kualitas Batubara

Adapun parameter kualitas batubara adalah sebagai berikut<sup>[6]</sup>.

### 3.2.1 Nilai Kalori

Nilai kalori merupakan nilai panas batubara yang diperoleh dari pembakaran sempurna. Kalori batubara biasanya dalam (kkal/kg). Semakin tinggi kalori batubara maka semakin baik kualitas batubara. Nilai kalori terbagi atas dua yaitu *gross calorific value* yaitu nilai kalori total yang diperoleh dari hasil analisis. Sedangkan *net calorific value* adalah nilai kalori murniyang telah dikurangi dengan nilai kalor latennya.

### 3.2.2 Total Moisture

*Total moisture* merupakan kandungan air dalam batubara. Semakin rendah persentasenya maka semakin baik kualitas batubara. *Total moisture* ditentukan pada batubara mulai dari tahap eksploitasi hingga tahap pengangkutan. Kandungan air total sangat di pengaruhi oleh faktor keadaan seperti ukuran butir dan faktor iklim.

### 3.2.3 Inherent Moisture

*Inherent moisture* merupakan kadar air bawaan yang terkandung dalam batubara dan tidak dapat menguap dengan pengeringan udara pada suhu lingkungan walaupun batubara telah dihancurkan hingga ukuran 200 mikron. *Inherent moisture* hampir menyatu dengan struktur molekul batubara. Kandungan air bawaan berhubungan erat dengan nilai kalori, dimana bila kandungan air bawaan kecil maka nilai kalori meningkat.

### 3.2.4 Total Sulphur

Kandungan sulfur mempengaruhi kualitas batubara. Pembakaran belerang pada batubara menghasilkan polusi udara serta korosi. Jadi semakin kecil persentase belerang dalam batubara maka semakin baik kualitas batubara.

### 3.2.5 Ash Content

Abu dapat dihasilkan dari pengotor bawaan serta pengotor dari proses penambangan. Semakin besar kadar

abu semakin buruk kualitas batubara. *Ash* adalah parameter yang menunjukkan ada atau tidaknya abu pada sisa pembakaran. Faktor yang mempengaruhi adanya abu pada hasil pembakaran adalah *mineral matter*, *inherent ash*, dan *extraneous ash*. Kandungan abu dapat dihasilkan dari pengotor bawaan dalam proses pembentukan batubara maupun dari proses penambangan.

### 3.2.6 Fixed Carbon

*Fixed carbon* menunjukkan persentase kandungan karbon pada batubara. Semakin besar persentase karbon dalam batubara maka semakin baik kualitas batubara. *Fixed carbon* merupakan selisih 100% total berat batubara dengan kadar *moisture*, *ash*, dan *volatile matter* pada ketetapan *volatile matter* tidak menguap.

### 3.2.7 Volatile Matter

*Volatile matter* adalah kandungan zat terbang. Kandungan zat terbang pada batubara mempercepat pembakaran sehingga waktu pembakaran semakin singkat. Semakin tinggi zat terbang maka semakin buruk kualitas batubara. zat yang biasanya terkandung dalam *volatile matter* biasanya gas hidrokarbon terutama gas metana. *Volatile matter* berasal dari pemecahan struktur molekul batubara rantai alipatik pada temperatur tertentu.

## 3.3 Pengertian Desulfurisasi

Desulfurisasi batubara merupakan suatu proses penurunan kadar sulfur dari batubara. Batubara merupakan bahan bakar alternatif dengan cadangan melimpah di Indonesia. Kandungan sulfur tersebut dapat menyebabkan pencemaran lingkungan, menyebabkan kerusakan (korosif) dan memperpendek umur alat pabrik industri. Agar batubara tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar maka terlebih dahulu dilakukan proses desulfurisasi. Desulfurisasi batubara dibutuhkan tidak hanya untuk meminimalkan pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh emisi dari sulfur dioksida selama pembakaran, tetapi juga untuk meningkatkan kualitas batubara<sup>[7]</sup>.

## 3.4 Metode Desulfurisasi

Metode fisika terbatas hanya dapat memisahkan jenis sulfur anorganik dalam batubara, sedangkan sulfur organik tidak dapat dipisahkan. Sedangkan metode kimia dan biologi dapat memisahkan sulfur anorganik maupun sulfur organik dalam batubara, hanya saja metode biologi menggunakan bantuan mikroba yang bekerja pada suhu rendah sehingga waktunya relatif lama dari metode kimia. Berdasarkan prosesnya, desulfurisasi batubara dapat dilakukan dengan metode kimia, fisika dan biologi<sup>[8]</sup>.

### 3.4.1 Desulfurisasi Secara Fisika

Beberapa teknologi desulfurisasi secara fisika antara lain sebagai berikut:

1. Pemisahan magnet  
Dalam proses pemisahan magnet (*magnetic separation*) dilakukan atas perbedaan muatan listrik (paramagnetik) bahan dalam campuran. Sulfur dalam bentuk pirit ( $\text{FeS}_2$ ) memiliki sifat paramagnetik, dapat melekat pada magnet sehingga dapat dipisahkan dari campuran batubara. Metode ini sangat sederhana, sebab tidak memerlukan bahan-bahan aditif dan pereaksi kimia, hanya membutuhkan power untuk menggerakkan magnet dan mengalirkan bahan batubara. Namun metode ini agak sulit mereduksi abu batubara khususnya jenis abu yang mengandung logam-logam diamagnetik sehingga *fixed carbon* dan nilai kalor sulit dipertahankan.
2. Kolom flotasi  
Metode ini sudah banyak digunakan secara komersial oleh industri batubara. Devisi riset empire coal company di Ohio Amerika Serikat telah merancang kolom flotasi dengan skala pilot plant, diameter 8 inci dan tinggi 30ft atau perbandingan  $L/D=45$ . Penelitian ini menyimpulkan bahwa kolom flotasi mampu memisahkan sampai 70% sulfur pirit dan 80% abu batu bara.
3. Flokasi selektif  
Metode ini dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pengurangan kadar sulfur dari batubara dengan kolom flotasi konvensional. Prinsip pemisahan adalah dengan penambahan reagent flokulan kedalam kolom flotasi yang secara selektif mampu membentuk flok batubara sehingga meningkatkan efisiensi pemisahan.

### 3.4.2 Desulfurisasi Secara Kimia

Beberapa metode desulfurisasi batubara secara kimia antara lain sebagai berikut:

1. Desulfurisasi menggunakan etanol.  
Metode ini efektif untuk mengurangi sulfur anorganik dan sulfur organik dalam batubara, telah dikembangkan sampai tahap *pilot plant* dengan proses alir. Jenis reaktor yang digunakan berupa *fluidized bed* dan *moving bed*.
2. Desulfurisasi dengan proses oksidasi selektif.  
Proses desulfurisasi dilakukan dalam reaktor fluidisasi pada suhu antara 650-800°F dengan menggunakan uap dan udara. Proses yang dikembangkan oleh Battle Columbus Division mampu mengurangi kadar sulfur total sebesar 95% dengan kehilangan panas rata-rata sebesar 15%. Gas  $\text{SO}_2$  yang dihasilkan proses ini kemudian di proses lebih lanjut dalam unit  $\text{DeSO}_x$ . Oleh Palmer et al (1994) melakukan desulfurisasi batubara menggunakan oksidasi selektif dengan campuran pereaksi hidrogen peroksida dan asam asetat yang akan membentuk asam peroksi asetat secara in situ. Kelebihan pereaksi ini mampu mereduksi semua kandungan sulfur anorganik dan sebagian sulfur organik dalam batubara.
3. Desulfurisasi Menggunakan Asam Sulfonat Triflorometan (TFMS).  
Metode ini menggunakan pelarut organik (toluena) dan asam sulfonat triflorometan sebagai katalis.

Metode ini dikembangkan hanya untuk mengurangi kadar sulfur organik yang sulit dipisahkan dengan metode konvensional. Proses desulfurisasi dilakukan dalam reaktor slurry pada suhu sekitar 200°C. Pada konsentrasi TFMS 45,2 % mmol/g batubara diperoleh tingkat desulfurisasi 48,7%.

4. Desulfurisasi menggunakan larutan barium klorida.  
Metode ini umumnya hanya efektif untuk menghilangkan sulfur anorganik terutama pirit. Reduksi sulfur organik tidak efektif dengan pereaksi ini karena  $\text{BaCl}_2$  merupakan oksidator lemah. Disamping itu, sulitnya pemisahan endapan  $\text{BaSO}_4$  yang terbentuk diproses ini menjadi problem lain sehingga metode ini kurang dikembangkan.
5. Desulfurisasi menggunakan oksidator besi sulfat atau besi klorida.  
Metode ini cukup efektif untuk mengurangi kadar sulfur khususnya sulfur anorganik (pirit) dalam batubara. Prinsip utama desulfurisasi ini adalah dengan menggunakan reaksi oksidasi reduksi. Keuntungan proses ini adalah larutan  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , memungkinkan direcovery untuk di reuse sehingga bisa menghemat biaya produksi, tetapi laju reaksinya relatif lambat pada suhu kamar.

Berikut adalah tahapan proses desulfurisasi secara kimia.

1. Oksidative (temperatur penguraian batubara dibawah 400°C)
  - a. Zat pengoksidasi  
Pada proses oksidasi untuk menghilangkan sulfur yang terkandung dalam batubara menggunakan zat pengoksidasi sebagai berikut:
    - 1) Metal ions ( $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Hg}^{+2}$ ,  $\text{Ag}^{+}$ )
    - 2) Strong acids ( $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ )
    - 3)  $\text{O}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  dan udara.
  - b. Meyers proses  
Metode yang digunakan dalam proses oksidasi ini yaitu Metode Meyer yang telah dikembangkan. Proses tersebut berdasarkan oksidasi kandungan sulfur bentuk pirit dalam batubara dengan menggunakan larutan Ferric sulfate panas, tanpa menghilangkan asam organik.
    - 1) Batu bara : Berukuran 1,4 mm
    - 2) Pereaksi :  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
    - 3) Temperatur : 100-130°C
    - 4) Waktu : 5-6 jam
    - 5) Tekanan : 3-6 atm
    - 6) Pirit dioksidasikan menjadi ferrous sulfate,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , unsur S.
    - 7) Penghilangan Pyritic-S : 83-99 %
    - 8) As, Cd, Mn, Pb dan Zn juga dihilangkan.
  - c. Reaksi oksida desulfurisasi sebagai berikut:  

$$5\text{FeS}_2 + 23\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 24\text{H}_2\text{O} \rightarrow 51\text{FeSO}_4 + 4\text{S};$$

$$\text{O}_2 \text{ ditambahkan untuk mengoksidasi } \text{FeSO}_4 \text{ agar kembali menjadi};$$

$$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 4\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O};$$
 Netralisasi batu kapur untuk menghilangkan kelebihan sulfat;
 
$$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{CaO} \rightarrow 3\text{CaSO}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeSO}_4 + \text{CaO} + \text{CaSO}_4 + \text{FeO}.$$

- d. Reaksi oksidasi sulfidasi secara umum:  
 $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$   
 $4\text{FeSO}_4 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O}$   
 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$
2. Caustic (temperatur penguraian batubara dibawah 400°C)
- a. Reaksi desulfurisasi menggunakan caustic:  
 $2\text{FeS}_2 + 6\text{NaOH} \rightarrow 2\text{NaFeO}_2 + \text{Na}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$   
 $\text{Coal-S} + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Coal-O} + \text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$
- b. Molten Caustic Leaching (MCL)  
 Proses MCL konvensional menggunakan campuran NaOH + KOH (1:1), atau NaOH + KOH + Ca(OH)<sub>2</sub> pada temperatur 370-390°C selama 2-3 jam.
3. Reduction (proses hidrosulfurisasi pada temperatur > 440°C).  
 Reaksi yang terjadi pada proses reduksi adalah sebagai berikut:  
 $\text{FeS}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{FeS(s)} + \text{H}_2\text{S (g)}$   
 $\text{FeS} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{S (g)}$

Kekurangan proses desulfurisasi secara kimia:

1. Biaya proses yang tinggi
2. *Severe leaching conditions* (100-400°C).
3. *Energy intensive*.
4. Penambahan material ke dalam batubara selain dapat mengurangi kandungan ash dan sulfur dapat juga berpotensi menjadi polutan.
5. Banyak di temukan permasalahan pengendalian polusi, korosi dan pembuangannya.

### 3.4.3 Desulfurisasi Secara Biologi

Prinsip dari proses biodesulfurisasi batubara adalah dengan mengoksidasi sulfur dalam bentuk organik atau anorganik yang terdapat pada batubara dengan bakteri tertentu yang digunakan. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi biodesulfurisasi batubara, yaitu suhu, kemasaman, konsentrasi sel, konsentrasi batubara, ukuran partikel, komposisi medium, penambahan partikulat dan surfaktan dan interaksi suatu bakteri dengan bakteri lain. Meningkatkan kecepatan reaksi desulfurisasi batubara juga dapat dilakukan untuk mempercepat kinerja dari bakteri tersebut.

Hidupnya bakteri pada permukaan mineral memainkan peranan yang sangat penting tidak hanya untuk hidupnya bakteri di alam. Namun juga dapat dimanfaatkan dalam industri penambangan. Salah satu bakteri yang dapat digunakan dalam industri pertambangan adalah bakteri pengoksidasi besi dan sulfur *T. ferroxidans*. Pengurangan kandungan sulfur dengan metode biologi disebut biodesulfurisasi yaitu metode yang dalam prosesnya memanfaatkan organisme, yaitu bakteri. Metode ini merupakan metode yang memiliki paling banyak keunggulan dibandingkan dengan metode lainnya, namun desulfurisasi dengan metode biologi memiliki beberapa kekurangannya yaitu bakteri hanya mampu mengoksidasi sulfur dalam bentuk-bentuk tertentu. Bakteri yang dapat digunakan dalam proses desulfurisasi antara lain:

1. *T. ferroxidans* (FeS<sub>2</sub>)
2. *T. thiooxidans* (FeS<sub>2</sub>)

3. *L. ferroxidans* (FeS<sub>2</sub>)
4. *S. acidocalderius* (FeS<sub>2</sub>)
5. *R. spheriodes* (S-organik)

*T. ferroxidans* merupakan bakteri yang paling penting dalam biodesulfurisasi batubara karena dapat mengoksidasi pirit (FeS<sub>2</sub>) secara langsung. Walaupun begitu proses desulfurisasi batubara hanya dengan memanfaatkan salah satu kinerja bakteri akan menghasilkan desulfurisasi yang kurang optimal. Biodesulfurisasi secara kultur gabungan dengan menggunakan berbagai bakteri dapat membuahkan hasil yang lebih baik.

Salah satu alternatif yang paling aman dan ramah lingkungan untuk desulfurisasi batubara adalah secara mikrobiologi menggunakan bakteri *T. Ferroxidans* dan *T. Thiooxidans*. Penggunaan kombinasi kedua bakteri ini ditujukan untuk lebih mengoptimalkan desulfurisasi sulfur. Desulfurisasi menggunakan kombinasi dari kedua bakteri tersebut memiliki beberapa kelebihan dibandingkan desulfurisasi kimiawi, yaitu lebih efisien, ekonomis dan ramah lingkungan.

## 4 Metode Penelitian

### 4.1 Jenis Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimen. Penelitian eksperimen merupakan penelitian yang dilakukan untuk mengetahui akibat yang ditimbulkan dari suatu perlakuan yang diberikan secara sengaja<sup>[9]</sup>. Penelitian eksperimen adalah metode inti dari model penelitian yang menggunakan pendekatan kuantitatif. Penelitian eksperimen sebagai suatu penelitian ilmiah dimana peneliti memanipulasi dan mengontrol satu atau lebih variabel bebas dan melakukan pengamatan terhadap variabel terikat untuk menemukan variasi yang muncul bersamaan dengan manipulasi terhadap variabel bebas tersebut. Adapun variabel bebasnya yaitu nilai konsentrasi asam klorida (HCl) dan variabel terikatnya yaitu nilai *total sulphur*.

### 4.2 Jenis Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah batubara lignit (5100 kkal/kg – 5500 kkal/kg) dengan kadar sulfur 1,5 % - 2,2 % pada *flemming seam* PT. Nusa Alam Lestari Site Sinamar dan data *total sulphur* batubara tersebut.

### 4.3 Teknik Pengumpulan Data

Teknik yang dilakukan dalam pengumpulan data adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Dilaksanakan dengan mencari bahan-bahan pustaka yang menunjang penelitian yang diperoleh dari buku, jurnal, mengenai desulfurisasi batubara, laporan-laporan terdahulu, informasi dari media lain seperti internet dan sebagainya.

## 2. Pengumpulan Data Primer

Pengumpulan data primer dilakukan dengan cara:

### a. Sampel batubara

Sampel batubara merupakan sampel yang di ambil di PT. Nusa Alam Lestari site Sinamar dengan jenis batubara *low rank* atau batubara lignit (5100 kkal/kg - 5500 kkal/kg) dengan kadar *total sulphur* 1,5 % - 2,2 %.

### b. Uji laboratorium

Uji laboratorium bertujuan untuk mendapatkan nilai *total sulphur* dari sampel batubara. Pengujian ini dapat dilakukan di laboratorium yang memiliki alat *sulfur analyzer* dengan tipe LECO S-144DR.

## 3. Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari dokumen atau data PT. NAL site Sinamar seperti jumlah cadangan batubara lignit (5100 kkal/kg - 5500 kkal/kg) yang ada di *stockpile* dan karakteristik batubara.

## 4.4 Teknik Analisis Data

Setelah conto dianalisis menggunakan *sulfur analyzer* dengan tipe LECO S-144DR maka akan didapat kandungan sulfur dari setiap conto yang sudah *dileaching*. Selanjutnya data kandungan sulfur ini akan dianalisis menggunakan analisis regresi yang bertujuan untuk meramalkan atau memperkirakan nilai dari variabel terikat dalam hubungannya dengan variabel bebas yang diketahui melalui persamaan garis regresinya. Hubungan antar variabel akan dianalisis menggunakan regresi nonlinear model kuadratik. Regresi nonlinear model kuadratik adalah model regresi yang parameternya adalah nonlinear, artinya apabila diturunkan terhadap parameternya sendiri maka hasil yang didapat masih mengandung parameter <sup>[10]</sup>. Adapun model regresi kuadratik adalah sebagai berikut.

$$= a + bX + cX^2 \quad (10)$$

Dengan: = variabel terikat

X = variabel bebas

a = konstanta

b, c = parameter/koeffisien

Hubungan antara dua variabel pada persamaan linear jika digambarkan secara grafis (*scatter diagram*) nilai Y dan X akan berada pada suatu garis yang disebut *garis regresi*. Karena antara Y dan X memiliki hubungan, maka nilai X dapat digunakan untuk menduga atau meramal nilai Y. Dalam hal ini, X disebut variabel bebas yaitu variabel yang nilai-nilainya tidak bergantung pada variabel lain dan Y disebut variabel terikat yaitu variabel yang nilai-nilainya bergantung pada variabel lain. Dalam penelitian ini konsentrasi HCl adalah sebagai variabel bebas dan *total sulphur* adalah variabel terikat.

## 4.5 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

### 1. Proses Preparasi Bongkahan Batubara

Proses preparasi bongkahan batubara dilakukan sebelum melakukan analisis *total sulphur* sampel batubara. Adapun bongkahan sampel batubara yang

ada di perkecil dan diseragamkan ukurannya menggunakan *jaw crusher*. Setelah itu diperkecil lagi menjadi 60 mesh dengan alat alu dan lumpang.

### 2. Analisis Sulfur Sampel

Tahapan awal dalam penanganan sampel batubara adalah melakukan analisis sulfur batubara menggunakan alat *sulfur analyzer* dengan tipe LECO S-144DR.

### 3. Proses Pencampuran

Proses pencampuran (*leaching*) ini dilakukan berdasarkan modifikasi dari penelitian terdahulu yang penulis jadikan rujukan, dimana penelitian terdahulu ini telah dijelaskan di penelitian relevan pada bab sebelumnya.

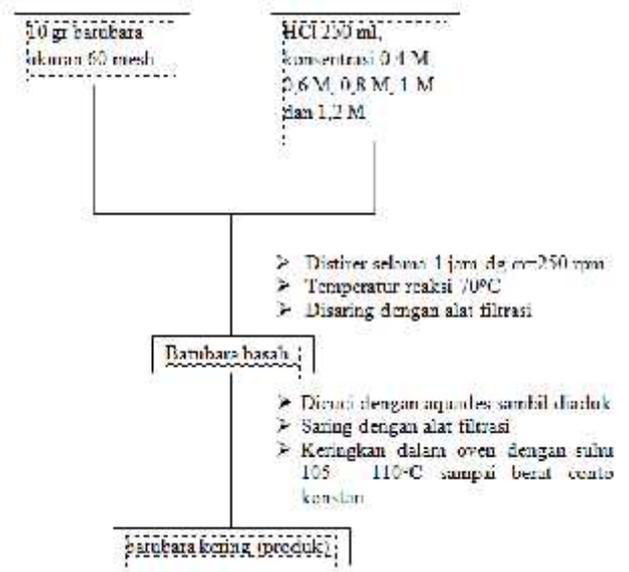
a. Proses pencampuran batubara dilakukan pada peralatan pencampur berupa reaktor tangki pengaduk. Bahan yang dicampur adalah batubara ukuran 60 mesh seberat 10 gram dengan asam klorida yang ditentukan konsentrasinya dengan perbandingan 10 gram batubara : 250 ml asam klorida selama 1 jam dengan kecepatan pengadukan 250 rpm dalam temperatur 70°C.

b. Kemudian padatan/produk disaring menggunakan alat filtrasi.

c. Selanjutnya padatan/produk dicuci dengan cara mencampurnya dengan aquades dalam suhu kamar sambil diaduk.

d. Saring kembali produk dengan menggunakan alat filtrasi (kertas saring), kemudian keringkan produk dengan temperatur 105 - 110°C sampai berat produk konstan

Proses pengadukan atau pencampuran (*leaching*) dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Proses *leaching*.

### 4. Pengujian Produk

Produk yang dihasilkan dari proses pencampuran akan dianalisis menggunakan *sulfur analyzer* dengan tipe LECO S-144DR. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui *total sulphur* pada produk akhir.

## 5 Hasil dan Pembahasan

### 5.1 Data

Adapun nilai kadar sulfur batubara yang telah didesulfurisasi dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Kadar sulfur batubara setelah didesulfurisasi

No.	Konsentrasi HCl	% sulfur (adb)
1	HCl 0,4 M	0,78
2	HCl 0,6 M	0,70
3	HCl 0,8 M	0,59
4	HCl 1 M	0,65
5	HCl 1,2 M	0,76

### 5.2 Pembahasan

Adapun nilai kadar sulfur dari batubara yang telah dileaching adalah sebagai berikut.

#### 1. Sampel awal

Proses menganalisa kadar sulfur sampel awal ini dilakukan sebanyak dua kali (*duplo*). Berikut hasil analisis dengan menggunakan *sulfur analyzer*.

**Tabel 3.** Kadar sulfur sampel awal

No.	Nomor Lab/Kode sampel	% sulfur (adb)	Rata-rata % sulfur (adb)
1	000-1	1,48	1,50
2	000-2	1,51	

#### 2. Batubara yang dileaching dengan HCl 0,4 M

**Tabel 4.** Kadar sulfur batubara yang sudah dileaching dengan HCl 0,4 M

No.	Nomor Lab/Kode sampel	% sulfur (adb)	Rata-rata % sulfur (adb)
1	004-1	0.80	0,78
2	004-2	0.77	
3	004-3	0,77	

Dari hasil tabel 4 dapat dilihat bahwa desulfurisasi batubara dengan menggunakan HCl 0,4 M dapat menurunkan kadar sulfur menjadi 0,78%.

#### 3. Batubara yang dileaching dengan HCl 0,6 M

**Tabel 5.** Kadar sulfur batubara yang sudah dileaching dengan HCl 0,6 M

No.	Nomor Lab/Kode sampel	% sulfur (adb)	Rata-rata % sulfur (adb)
1	006-1	0.70	0,70
2	006-2	0.71	
3	006-3	0,68	

Dari hasil tabel 5 dapat dilihat bahwa desulfurisasi batubara dengan menggunakan HCl 0,6 M dapat menurunkan kadar sulfur menjadi 0,70%.

#### 4. Batubara yang dileaching dengan HCl 0,8 M

**Tabel 6.** Kadar sulfur batubara yang sudah dileaching dengan HCl 0,8 M

No.	Nomor Lab/Kode sampel	% sulfur (adb)	Rata-rata % sulfur (adb)
1	008-1	0.62	0,59
2	008-2	0.57	
3	008-3	0,58	

Dari hasil tabel 6 dapat dilihat bahwa desulfurisasi batubara dengan menggunakan HCl 0,8 M dapat menurunkan kadar sulfur menjadi 0,59%.

#### 5. Batubara yang dileaching dengan HCl 1 M

**Tabel 7.** Kadar sulfur batubara yang sudah dileaching dengan HCl 1 M

No.	Nomor Lab/Kode sampel	% sulfur (adb)	Rata-rata % sulfur (adb)
1	010-1	0.65	0,65
2	010-2	0.62	
3	010-3	0,67	

Dari hasil tabel 7 dapat dilihat bahwa desulfurisasi batubara dengan menggunakan HCl 1 M dapat menurunkan kadar sulfur menjadi 0,65%.

#### 6. Batubara yang dileaching dengan HCl 1,2 M

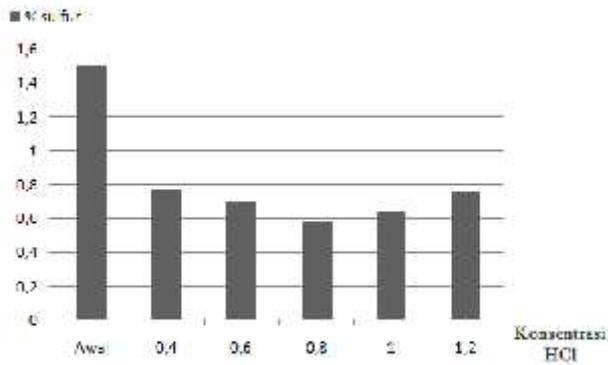
**Tabel 8.** Kadar sulfur batubara yang sudah dileaching dengan HCl 1,2 M

No.	Nomor Lab/Kode sampel	% sulfur (adb)	Rata-rata % sulfur (adb)
1	012-1	0,77	0,76
2	012-2	0.76	
3	012-3	0,74	

Dari hasil tabel 8 dapat dilihat bahwa desulfurisasi batubara dengan menggunakan HCl 1,2 M dapat menurunkan kadar sulfur menjadi 0,76%.

## 6 Analisis Hasil

Dari hasil penelitian ini dapat dilihat pada gambar 4, diperoleh kondisi optimum dalam proses desulfurisasi batubara dengan metode *leaching* menggunakan HCl dengan konsentrasi 0,8 M yang dapat menurunkan kadar sulfur batubara menjadi 0,59%.



**Gambar 4.** Grafik kadar sulfur batubara setelah didesulfurisasi.

Hasil penelitian ini selanjutnya akan dianalisis menggunakan regresi nonlinear model kuadratik. Analisis regresi kuadratik ini menggunakan SPSS versi 16, dan didapat hasil sebagai berikut.

**Tabel 9.** Model Summary and Parameter Estimates

Dependent Variable:y

Equation	Model Summary					Parameter Estimates		
	R Square	F	df	df2	Sig.	Constant	b1	b2
Quadratic	.914	10.660	2	2	.086	1.282	-1.616	.982

The independent variable is x.

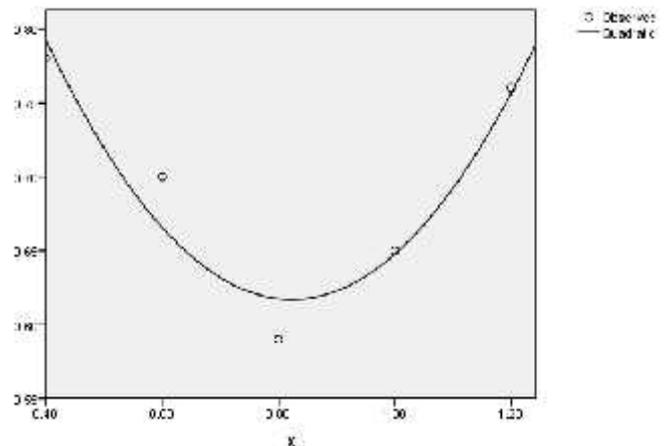
Berdasarkan Tabel 9 maka dapat disimpulkan persamaan regresinya, yaitu:

$$= 1,282 - 1,616X + 0,982X^2$$

Interpretasi berdasarkan persamaan di atas dapat diartikan sebagai berikut:

1. Konstanta positif sebesar 1,282, artinya dapat dinyatakan nilai Kadar Sulfur Batubara (Y) dengan asumsi konsentrasi HCl (X) diabaikan atau dengan kata lain batubara tidak diberi perlakuan *leaching* adalah 1,282 %.
2. Koefisien regresi negatif 1,616 dan positif 0,982, artinya apabila Konsentrasi HCl (X) ditingkatkan sebesar satu satuan maka Kadar Sulfur Batubara (Y) adalah sebesar  $= 1,282 - 1,616(1) + 0,982(1^2) = 0,648$  %.

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diimplikasikan bahwa pemberian HCl pada saat *leaching* dalam proses desulfurisasi dapat menurunkan kadar sulfur, dimana dari konsentrasi HCl 0,4 M, 0,6 M dan 0,8 M mampu menurunkan kadar sulfur dan berhasil mencapai titik optimum dalam penurunan kadar sulfur batubara paling rendah pada konsentrasi HCl 0,8 M. Untuk melihat pendistribusian data penelitian dapat dilihat pada gambar 27.



Ket : X = konsentrasi HCl (M)  
Y = kadar sulfur batubara (%)

**Gambar 5.** Plot pengaruh konsentrasi HCl terhadap kadar sulfur batubara

Berdasarkan gambar 27 dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Konsentrasi HCl 0,8 M menjadi titik paling optimum desulfurisasi yang bisa desulfurisasi batubara paling rendah menjadi 0,59 %.
2. Selanjutnya konsentrasi HCl 1 M hanya menurunkan kadar sulfur batubara menjadi 0,65 % namun tidak serendah hasil desulfurisasi dengan konsentrasi HCl 0,8 M, begitu juga dengan konsentrasi HCl 1,2 M yang hanya mampu desulfurisasi batubara menjadi 0,76 % yang mana lebih tinggi dari hasil desulfurisasi dengan konsentrasi 1 M.

Untuk melakukan proses desulfurisasi (*leaching*) ini dibutuhkan peralatan laboratorium dan bahan habis pakai. Dalam menghitung biaya desulfurisasi ini dibatasi hanya dengan menghitung biaya yang dikeluarkan untuk membeli bahan habis pakai yaitu Asam Klorida (HCl) dan aquades.

Dari penelitian yang dilakukan telah diperoleh kondisi optimum desulfurisasi pada konsentrasi HCl 0,8 M, maka perhitungan biaya ini berdasarkan kepada jumlah HCl yang dibutuhkan pada konsentrasi 0,8 M. Harga bahan habis pakai yang digunakan dapat dilihat pada tabel 10.

**Tabel 10.** Harga bahan habis pakai

No.	Bahan	Jumlah (liter)	Harga
1.	Asam klorida (HCl)	1	Rp. 800.000,-
2.	Aquades	1	Rp. 14.000,-

Diketahui untuk proses *leaching* batubara 10 gram dibutuhkan Asam klorida (HCl) sebanyak 19,67 ml dan aquades sebanyak 250 ml, maka biaya yang dikeluarkan untuk bahan habis pakai dapat dilihat pada tabel 11.

**Tabel 11.** Harga bahan habis pakai untuk proses satu kali leaching

No.	Bahan	Jumlah (ml)	Harga
1.	Asam klorida (HCl)	19,67	Rp. 15.736,-
2.	Aquadess	250	Rp. 3.500,-
Total			Rp. 19.236,-

Total biaya yang dikeluarkan untuk satu kali proses leaching 10 gram batubara adalah sebanyak Rp. 19.236. Maka biaya yang dikeluarkan untuk meleaching batubara sebanyak 1 ton sebanyak:

$$\frac{10 \text{ gram}}{1000000 \text{ gram}} = \frac{\text{Rp. } 19.236}{x}$$

$$10 x = \text{Rp. } 19.236.000.000$$

$$x = \text{Rp. } 1.923.600.000$$

Jadi biaya yang dikeluarkan satu kali proses desulfurisasi untuk 1 ton batubara adalah sebesar Rp. 1.923.600.000. Hal ini berarti jika diterapkan di perusahaan yang akan mencoba untuk menurunkan kadar sulfur batubara dengan cara desulfurisasi tidak ekonomis dari segi perbandingan *cost* yang dikeluarkan dengan harga jual 1 ton batubara. Maka perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang pemanfaatan batubara dengan kadar sulfur rendah.

## 7 Penutup

### 7.1 Kesimpulan

1. Pelarut yang digunakan untuk proses leaching batubara adalah asam klorida (HCl) dengan kepekatan 32% dalam variasi konsentrasi sebesar (0,4 M), (0,6 M), (0,8 M), (1 M) dan (1,2 M).
2. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari pengujian batubara pada sulfur analyzer, hasil desulfurisasi batubara adalah sebagai berikut.

**Tabel 12.** Hasil desulfurisasi batubara

No.	Konsentrasi HCl	% sulfur (adb)
1	0,4 M	0,78
2	0,6 M	0,70
3	0,8 M	0,59
4	1,0 M	0,65
5	1,2 M	0,76

3. Dari hasil penelitian ini diperoleh kondisi optimum desulfurisasi batubara pada konsentrasi HCl 0,8 M mampu menurunkan kadar sulfur menjadi 0,59%.
4. Biaya yang dikeluarkan untuk satu kali proses desulfurisasi batubara satu ton adalah sebesar Rp. 1.923.600.000.

### 7.2 Saran

1. Dalam proses *leaching* agar menggunakan pemanasan secara tidak langsung dengan memakai wadah minyak goreng atau sejenisnya supaya suhu selama *leaching* stabil dan tidak susah untuk mengatur suhu.

2. Sebaiknya dilakukan penelitian lanjutan tentang desulfurisasi dengan cara lain dan pemanfaatan batubara yang memiliki kadar sulfur rendah, karena tidak ekonomis antara *cost* yang dikeluarkan untuk proses desulfurisasi dengan harga jual batubara.

## Daftar Pustaka

- [1] Husein, Faisal, dkk. 2018. *Kajian Kualitas Batubara Berdasarkan Analisis Proksimat, Total Sulfur dan Nilai Kalor Untuk Pembakaran Bahan Baku Semen di PT. Semen Padang Kelurahan Batu Gadang Kecamatan Lubuk Kilangan Kota Padang Provinsi Sumatera Barat*. Bandung: Universitas Islam Bandung
- [2] Presiden Republik Indonesia. (1999). *Peraturan Pemerintah RI No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara*. Jakarta: Republik Indonesia.
- [3] Setiawan, Indra Budi. (2010). *Desulfurisasi Batubara Bayah dengan Metode Leaching Menggunakan Pelarut Kalsium Hipoklorit*. Cilegon: Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [4] Astra, I Made. (2010). *Energi dan Dampaknya Terhadap Lingkungan*. Jakarta: Universitas Negeri Jakarta.
- [5] Syahputra, Deni. (2017). *Analisis Karakteristik Coal Oil Mixture Sebagai Bahan Bakar Diesel Alternatif dari Batubara Peringkat Rendah di PT. Nusa Alam Lestari Site Sinamar Dharmasraya Sumatera Barat*. Padang: Universitas Negeri Padang.
- [6] Sukandarrumidi. (2014). *Batubara dan Gambut*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- [7] Marthen, Mery. 2014. *Desulfurisasi Batubara Secara Kimia dengan Solvent Leaching Method Menggunakan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Dalam Larutan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*. Makassar: Universitas Fajar.
- [8] Iskak, Taufil Maula, dkk. (2015). *Pencucian dan Desulfurisasi Batubara*. Yogyakarta. UPN Veteran.
- [9] Hidayat, Anwar. (2012). *Penelitian Eksperimen*.
- [10] Tarigan, Efrida Yanti. (2009). *Analisis Regresi Nonlinear dengan Model Kuadratik*. Medan: Universitas Sumatera Utara.