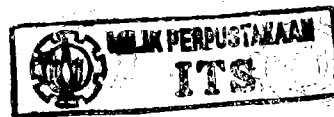


26.087/H/06



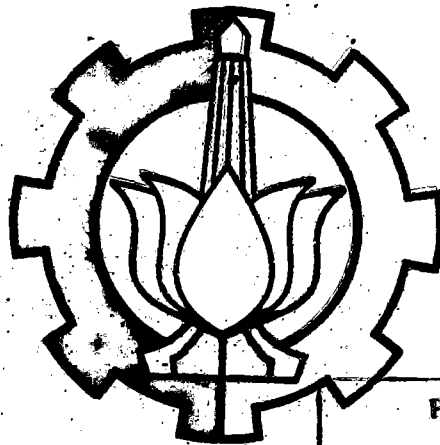
**DESULFURISASI BATUBARA ASAL SULAWESI
SECARA FLOTASI MENGGUNAKAN SURFAKTAN
CRUDE PALM OIL (CPO)**

ANDI ALADIN
NRP. 23 02 301 003

R-DK
662.623

Ala
d-1

2006



PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	27-2-06
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	224083

**PROGRAM STUDI DOKTOR
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2006**


**DESULFURISASI BATUBARA ASAL SULAWESI SECARA FLOTASI
MENGUNAKAN SURFAKTAN CRUDE PALM OIL (CPO)**

Disertasi disusun untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Doktor
di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

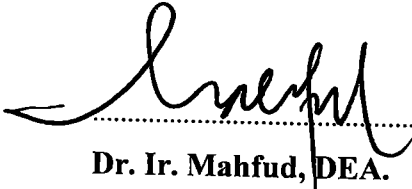
Oleh:
Andi Aladin
Nrp. 23 02 301 003

Disetujui Oleh Tim Penguji Disertasi :

Tanggal Ujian :
10 Februari 2006



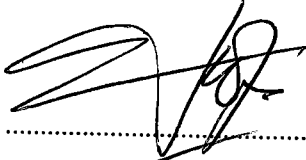
.....
Dr. Ir. Achmad Roesyadi, DEA.



.....
Dr. Ir. Mahfud, DEA.



.....
Prof Dr. Ir. H. M. Rachimoallah, Dipl. Est.



.....
Dr. Ir. Susianto, DEA



.....
Dr. Ir. Unggul Priyanto, MSc.



Direktur Program Pascasarjana

.....
Prof. Dr. Happy Ratna S., MSc, PhD.

Nip. 130 541 829



PRAKATA

Alhamdulillah, sungguh suatu kenikmatan amat besar yang penulis patut syukuri kepada Sang Pemilik Ilmu (Allah Rabbul Alamin) dengan terwujudnya disertasi riset S3 yang berjudul DESULFURISASI BATUBARA ASAL SULAWESI SECARA FLOTASI MENGGUNAKAN SURFAKTAN CRUDE PALM OIL (CPO). Disertasi yang merupakan salah satu syarat penyelesaian studi program DOKTOR di jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember ITS-Surabaya ini adalah sebuah kajian ilmiah dan sistematis yang berbasis riset laboratorium dengan tujuan mereduksi kandungan sulfur (dan abu) batubara asal Sulawesi sehingga dapat dikonsumsi sebagai bahan bakar bersih di industri.

Disertasi ini sebelumnya telah didiskusikan dan telah mendapat banyak masukan pada forum seminar akademik di hadapan tim Penguji disertasi dalam bentuk seminar proposal, seminar *progress report* dan seminar/ujian komprehensif serta ujian promosi DOKTOR. Demikian juga telah didiskusikan pada beberapa forum Seminar Nasional Teknik Kimia dan dipublikasikan pada prosiding Seminar Nasional tersebut, yaitu Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri yang diselenggarakan Jurusan Teknik Kimia UGM Yogyakarta (Mei 2004), Seminar Nasional Rekayasa Kimia & Proses (SRKP) yang diselenggarakan Jurusan Teknik Kimia UNDIP Semarang (Juli 2005), Seminar Nasional Fundamental & Aplikasi Teknik Kimia (SFATK) yang diselenggarakan Jurusan Teknik Kimia ITS Surabaya (Nopember 2005) dan Seminar Nasional Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo, yang diselenggarakan Jurusan Teknik Kimia ITB Bandung (Desember 2005). Disertasi ini juga telah dipublikasikan pada tiga Jurnal Nasional terakreditasi, yaitu Jurnal MEDIA TEKNIK yang diterbitkan oleh Fakultas Teknik UGM Yogyakarta (Februari 2005), jurnal ACADEMIA ISTA yang diterbitkan oleh Lembaga Penelitian Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta (Desember 2004) dan jurnal INDUSTRI yang diterbitkan oleh Fakultas Teknologi Industri ITS Surabaya (Februari 2006). Secara *online*, disertasi ini dapat diakses (*read only*) pada situs pribadi penulis, yaitu: www.dinmustamin.tk.

Pada prakata ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada :

1. Rektor UMI Makassar yang merekomendir dan membiayai Penulis selama studi S3
2. Rektor ITS Suarabaya yang mengijinkan penulis studi S3
3. Bapak Dr. Ir. Achmad Roesyadi, DEA., selaku Promotor, yang telah meluangkan waktu dan menyumbangkan pikiran untuk membimbing dan membantu memecahkan masalah yang ada selama studi, riset dan penyusunan disertasi.
4. Bapak Dr. Ir. Mahfud, DEA., selaku co-Promotor, yang juga telah meluangkan waktu dan menyumbangkan pikiran untuk membimbing dan membantu memecahkan masalah yang ada selama studi, riset dan penyusunan disertasi.

5. Bapak Prof. Dr. Ir. H. M. Rachimoellah, Dipl. Est., Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA., dan bapak Dr. Ir. Unggul Priyanto, MSc. selaku tim penguji ujian komprehensif, yang telah memberi saran-saran perbaikan dan penyempurnaan dalam pelaksanaan riset dan penyusunan disertasi.
6. Bapak Prof. Ir. Wahyudi Budi Sediawan, SU., Ph.D selaku Reviewer Jurnal Media Teknik UGM dan jurnal Academia Ista AKPRIND Yogyakarta dimana disertasi ini telah dipublikasikan, beliau telah memberikan saran dan arahan khususnya dalam pemodelan dan optimasi numerik disertasi ini. Demikian juga Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway selaku Reviewer Jurnal Industri FTI-ITS Surabaya dimana disertasi ini juga dipublikasikan, beliau juga telah memberikan saran-saran khususnya dalam penyelesaian optimasi analisis dalam disertasi ini.
7. Kepala Laboratorium Teknik Reaksi Kimia, Kepala Laboratorium Instrumen dan Kepala Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran Jurusan Teknik Kimia ITS Surabaya yang telah memberikan ijin dalam pelaksanaan riset disertasi.
8. Kepala Laboratorium Pertambangan, Departemen Pertambangan Propinsi Sulawesi Selatan yang telah memberikan ijin analisis batubara.
9. Bapak Al-Ust. Prof. Dr. H. Abdurahman A. Basalamah, SE (*Almarhum*), yang telah memberikan motivasi dan dukungan moril/materil serta do'a yang tulus.
10. Bapak Drs. Mappaselle (*Superintendent Smetter*, PT. INCO Sorowako) yang juga telah memberikan motivasi, dukungan moril/materil khususnya dalam pelaksanaan riset.
11. Bapak Drs. Baharuddin, guru kimia penulis di SMAN 372 Mare-Bone, beliau yang pertama kali mendoakan dan memotivasi penulis untuk meraih gelar DOKTOR kimia.
12. Bapak-Bapak/Ibu-Ibu Dosen Teknik Kimia FTI UMI Makassar yang telah memberikan pengertian, partisipasi dan do'a selama penulis menempuh studi S3.
13. Karyawan Laboratorium, teman-teman mahasiswa dan seluruh pihak yang telah memberikan dukungan langsung maupun tidak langsung atas terselenggaranya riset dan terwujudnya disertasi ini.

Secara khusus penulis menyampaikan rasa haru dan terima kasih kepada yang mulia orang tua, istri tercinta Ummu Zahra' dan anak-anak tersayang serta saudara-saudara penulis yang telah memberikan pengertian, dukungan dan do'a sehingga pelaksanaan riset disertasi dan penyelesaian studi DOKTOR berjalan sukses. Semoga jerih payah penulis menjadi amal jariyah dan bermanfaat bagi kemaslahatan ummat dan karenanya semoga Allah SWT membalas jaza kebaikan dan ketulusan kita semua, Amin ya Rabbal Alamin.

Surabaya; Februari 2006
Penulis :

Andi Aladin

DESULFURISASI BATUBARA ASAL SULAWESI SECARA FLOTASI MENGUNAKAN SURFAKTAN CRUDE PALM OIL (CPO)

Nama Mahasiswa : Andi Aladin
Nrp : 23 02 301 003
Promotor : Dr. Ir. Achmad Roesyadi, DEA.
Co-Promotor : Dr. Ir. Mahfud, DEA.

INTISARI

Batubara merupakan bahan bakar fosil yang dapat dijadikan sebagai sumber bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar minyak bumi dan gas alam yang sudah semakin menipis. Batubara Indonesia asal Sulawesi cukup potensi, namun hingga saat ini belum dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar mengingat kandungan sulfurnya relatif tinggi yang dapat menyebabkan kerusakan pada alat pembakaran, dan dapat menimbulkan pencemaran lingkungan. Demikian pula kadar abunya relatif tinggi, dimana jika kadar abu tersebut dapat direduksi maka nilai kalor batubara dapat meningkat. Sebagai usaha meminimalisasi kandungan sulfur (dan abu) batubara tersebut, maka dilakukan penelitian *Desulfurisasi Batubara Asal Sulawesi Secara Flotasi Menggunakan Surfaktan Crude Palm Oil (CPO)*.

Penelitian desulfurisasi batubara asal Mallawa (Sulawesi) skala laboratorium dilakukan dalam sebuah alat kolom flotasi busa dengan sistem *semi batch*, dilengkapi dengan sebuah kompressor, sparger dan rotameter. Karakterisasi, analisis proximate dan ultimate batubara dilakukan mengikuti prosedur ASTM Standar. Analisis sulfur total dilakukan dengan *metode esckha* yang dikombinasi dengan *spektrofotometer UV*, sedangkan nilai kalor batubara diukur dengan alat *bomb kalorimeter*. Dipelajari beberapa variabel yang berpengaruh dalam proses desulfurisasi batubara secara flotasi, yaitu waktu flotasi (t), dimensi kolom flotasi (L_pD), pH campuran slurry, laju alir udara masuk kolom flotasi (v), ukuran partikel batubara rata-rata (\bar{d}_p) dan rasio (berat) CPO terhadap batubara (R_i). Masing-masing variabel ditentukan nilai optimum (terbaik) yang memberikan recovery sulfur maksimum atau total sulfur sisa dalam batubara hasil flotasi minimum. Dilakukan pemodelan untuk mendapatkan korelasi empirik antara besaran recovery sulfur (R) dengan masing-masing variabel flotasi yang dinyatakan dalam bentuk kelompok tidak berdimensi. Berdasarkan model empirik ini dilakukan optimasi simultan multivariabel yang diselesaikan dengan metode analisis (*diferensial*).

Dari penelitian ini diperoleh hasil karakterisasi batubara Mallawa (sebelum flotasi) yaitu kadar sulfur total 3,28%, kadar abu 12,23%, zat terbang 35,15%, kadar air 7,21%, karbon tetap 45,41%, berat jenis 1,30 g/cm³ dan nilai kalor 5825 kal/g. Jenis sulfur terdiri atas sulfur anorganik 2,42% (berupa sulfur pirit 2,01% dan sulfur sulfat 0,41%) dan sisanya sulfur organik 0,86%. Karakteristik batubara ini menunjukkan kualitas yang tidak jauh beda

campuran batubara (komponen hidrofobik). Dalam kondisi basa, kehadiran anion OH^- tidak dapat meningkatkan kehidrofilikan pirit, bahkan sebaliknya anion OH^- cenderung tolak menolak dengan molekul pirit yang bermuatan negatif parsial, sehingga molekul pirit menjadi sulit ditarik (recovery) dari campuran batubara yang bersifat basa tersebut. Pada kondisi kritis yaitu pH 8 atau lebih, flotasi tidak terjadi.

Pengaruh laju alir udara masuk kolom flotasi menunjukkan bahwa terjadi peningkatan recovery sulfur dalam batubara dengan meningkatnya laju alir udara dari 0,57 hingga 1,86 liter/menit. Faktanya bahwa dengan meningkatnya laju alir udara maka jumlah gelembung udara sebagai media pembawa partikel hidrofobik (batubara) meningkat, partikel batubara tersebut terdistribusi menyebar sepanjang kolom, sehingga peluang recovery sulfur menjadi lebih besar. Meningkatnya laju alir udara bersama dengan partikel batubara di dalam kolom flotasi, maka gaya gesek F_D yang dialami partikel batubara (yang berlawanan gaya gravitasi) juga meningkat sebanding kuadrat laju partikel batubara tersebut. Peningkatan gaya gesek yang mendukung gaya *buoyant* dapat mengalahkan pengaruh gaya gravitasi sehingga akan mempermudah proses flotasi batubara. Peningkatan laju alir udara dari 1,86 liter/menit tidak lagi mengakibatkan peningkatan recovery sulfur, bahkan cenderung turun. Pada laju alir udara relatif besar cenderung membentuk gelembung udara relatif lebih besar akibatnya sudut kontak (θ) antara partikel batubara dengan gelembung udara menjadi lebih kecil. Sudut kontak yang lebih kecil akan menurunkan gaya *adhesi* antara partikel batubara dengan gelembung udara sehingga lebih sulit terflotasi. Sulitnya terjadi flotasi batubara pada laju alir udara tinggi (> 3 liter/menit) ditandai dengan relatif besarnya *batubara losses* yang mengendap di dasar kolom flotasi (15%).

Pengaruh ukuran partikel batubara menunjukkan bahwa terjadi peningkatan recovery sulfur dengan mengecilnya partikel batubara hingga 121 μm . Semakin kecil ukuran partikel batubara maka semakin tersingkap partikel-partikel sulfur anorganik (pirit) yang terperangkap dalam campuran batubara, maka sulfur pirit tersebut semakin mudah ditarik oleh komponen hidrofilik (air). Namun ukuran rata-rata partikel batubara yang lebih kecil dari 121 μm tidak lagi mengakibatkan peningkatan recovery sulfur bahkan cenderung turun. Ukuran yang sangat halus yaitu 66 μm (>200 mesh) cenderung partikel batubara mengapung sempurna sehingga tidak terjadi proses flotasi di sepanjang kolom, jadi walaupun partikel sulfur pirit sudah cukup tersingkap dalam campuran batubara halus tersebut, namun tidak pernah ada (kecil) kesempatan kontak dengan komponen hidrofilik (air) di sepanjang kolom flotasi. Akibatnya sulfur pirit tidak terpisah dan tetap bergabung dengan komponen batubara yang terlanjur mengapung di bagian puncak kolom flotasi.

Pengaruh rasio kolektor terhadap batubara menunjukkan bahwa terjadi peningkatan signifikan recovery sulfur dalam batubara dengan meningkatnya rasio pada rentang $C/B =$

0,0625 hingga $C/B = 0,25$. Peran kolektor CPO sebagai surfaktan dapat menurunkan tegangan permukaan antara partikel padat-udara dalam sistem campuran slury batubara. Penurunan tegangan menyebabkan peningkatan gaya adhesi antara partikel padat dengan permukaan gelembung udara, sehingga partikel padat tersebut lebih mudah terflotasi bersama dengan udara. Namun kenaikan rasio dari $C/B = 0,25$ hingga $C/B = 1$ tidak lagi memberikan efek kenaikan recovery sulfur batubara yang signifikan. Pada konsentrasi kolektor yang sudah demikian besar mengakibatkan kenaikan viskositas campuran slury yang menyebabkan kecepatan gerak partikel batubara menjadi kecil sehingga proses flotasi sulit terjadi.

Berdasarkan pengamatan pada masing-masing variabel flotasi, diperoleh kondisi optimum (terbaik) yaitu $t_{opt} = 40$ menit, $LpD_{opt} = 21$, $pH_{opt} 6\frac{1}{2}$, $v_{opt} = 1,86$ liter/menit, $\bar{d}_{p_{opt}} = 121 \mu m (=100/150 \text{ mesh})$ dan $Rt_{opt} = \frac{1}{4}$ yang dapat menurunkan sulfur batubara Mallawa menjadi 0,92% atau recovery sulfur maksimum $R_{max} 72\%$. Berdasarkan keenam variabel flotasi optimum tersebut juga sekaligus dapat mereduksi abu menjadi 8,46% atau recovery abu 31% sehingga nilai karbon tetap meningkat menjadi 50,08% dan dengan demikian nilai kalor batubara hasil flotasi dapat dipertahankan bahkan relatif meningkat menjadi 6105 kal/g. Batubara hasil flotasi ini telah mencapai kriteria yang dikehendaki oleh industri pemakai bahan bakar batubara (Industri semen dan PLTU), yaitu kandungan sulfur $< 1\%$, kandungan abu $< 10\%$ dan nilai kalor > 6000 kal/g.

Untuk menggeneralisasikan pengaruh variabel-variabel flotasi secara simultan, dilakukan pemodelan yang memberikan hubungan empirik recovery sulfur (R) sebagai fungsi variabel waktu, dimensi kolom flotasi, laju alir udara dan ukuran partikel batubara, diperoleh model matematik sebagai berikut :

$$R = 0,0153 \left\{ 20,05 \left(\frac{v.t}{V} \right) - 1,53 \left(\frac{v.t}{V} \right)^2 \right\} \left\{ 91084 \left(\frac{\bar{d}_p}{D} \right) - 3E7 \left(\frac{\bar{d}_p}{D} \right)^2 \right\}$$

dimana V adalah volume kolom $(= 1/4\pi \left(\frac{L}{D} \right) D^3)$ dan D diameter kolom flotasi.

Berdasarkan persamaan simulasi ini diperoleh hasil hitungan optimasi analisis, yaitu $(\bar{d}_p / D)_{opt} = 0,0015$ dan $(v.t / V)_{opt} = 6,5647$ yang memberikan sulfur sisa minimum 0,99 % atau recovery sulfur maksimum $R_{max} 70\%$ dengan ralat 2,78%. Persamaan simulasi ini berlaku untuk range nilai masing-masing KTD terbatas, yaitu $0 \leq [v.t / V] \leq 14$ dan $0 < [\bar{d}_p / D] \leq 3.10^{-3}$

Kata kunci: *Batubara, desulfurisasi, flotasi, surfaktan, CPO*

DESULPHURIZATION OF SULAWESI'S COAL BY FLOTATION USING CRUDE PALM OIL (CPO) AS A SURFACTANT

Name : Andi Aladin
Nrp : 23 02 301 003
Promotor : Dr. Ir. Achmad Roesyadi, DEA.
Co-Promotor : Dr. Ir. Mahfud, DEA.

EXTENDED ABSTRACT

Coal is a fossil fuel. It is utilized as an alternative fuel to replace refined fuel oil and natural gas which are decreased day by day. Indonesian's coal in Sulawesi is abundant. Until now, it isn't utilized because of its high sulphur and ash content. Sulphur content could create problem in combustion and result environment pollution. Reducing the ash content would be increase the caloric value of the coal. In the present investigation a research was conducted to minimize the sulphur (and ash) content or desulphurization of the Sulawesi's Coal (Mallawa) by flotation method with Crude Palm Oil (CPO) as surfactant.

Desulphurization process of Mallawa's coal was carried out in laboratory scale using semi batch flotation column equipped with compressor, sparger and rotameter. Characterization and coal analysis (proximate, ultimate analysis and caloric measurement) were determined according to ASTM Official Methods. Sulphur content was determined by *eschka method* combined with *UV spectrophotometer method*, where as caloric value was analyzed by *bomb calorimeter*. Variables affecting the flotation process were studied, i.e. flotation time (t), column dimension (LpD), pH of slurry, the air flow rate (v), average size of coal particle (dp) and ratio of CPO to coal (Rt). The optimum value of each variables were found by the maximum value of sulphur recovery. Modeling was also carried out in order to get mathematic correlation between sulphur recovery (R) and variables which are influenced flotation column in form non-dimensional correlation. The mathematic correlation used for simultaneous multivariable optimization by analytic method (differential methods).

The research was found that the characteristics of Mallawa's coal (before flotation process) are total sulphur content 3.28%, ash content 12.23%, fly ash 35.15%, water content 7.21%, fix carbon 45.41%, density 1.30 g/cm³ and caloric value 5825 cal/g. Type of sulphur is inorganic sulphur 2.42% (pyrite sulphur 2.01% and sulfate sulphur 0.41%) and organic sulphur 0.86%. Thus characteristics shown that Mallawa's

coal have same characteristics with the others coal from South Sulawesi. Beside that thus characteristics put the Mallawa's into subbituminous class of coal which is low in quality because of the sulphur and ash content were relative high. According to the type of sulphur content was a inorganic type (pyrite), physical desulphurization (and deashing) process was chosen to reduce the total ash and sulphur beyond <1%.

Coal flotation using *froth flotation* is impossible with out incorporating a collector which it's function as a surfactant and frother. Soap from crude palm oil's fatty acid could be a surfactant in coal desulphurization process using 1/8 minimum of effective ratio between CPO to coal. CPO saponification process was done by adding Na_2CO_3 in room temperature and completed in less than 10 minute under stirring.

Flotation time was influenced the sulphur recovery value. Sulphur recovery increased liniery with further increase in flotation time until 40 minutes. In constant volume condition, time needed was quantitatively linier with sulphur content until separation was maximum. For unlimited time (40 minutes), further increase in flotation time had not significant increase in the sulphur recovery value.

The influence of column dimension on sulphur recovery also studied simultaneously. Further increase in column dimensions will be increased the sulphur recovery, but only in lightly effect (shown by small slope) and tend to be linier on range LpD 11-21. This phenomena explained that increased the value of LpD is increased the column height (L) (with diameter column constant). Thus increased will be increasing the pressure column and make the sulphur particles (pyrite) easy to separate. The other reason is, the higher the column, the more path will be needed for coal particle to froth to the surface media along with air bubble or we could said, that retention time of pyrite particle to make contact with water will be more than usual. For the experiment, its found that the best dimension column is LpD = 21, which is not significant different with column dimension from Demirbas (LpD = 20.55) and Al-Faris (LpD = 23) results.

Experiment result shows that sulphur recovery only happen when the solution pH 4-6.5 and when the solution pH reach (pH >7), flotation process will not be happen. In acidic condition, sulphur will be in a pyrite form (FeS_2) and form a polar molecule ($\text{H}:\text{Fe}^+\text{S}_2$) which is has hydrophilic so that it tend to attract the other hydrophilic molecules (water) and because of it , thus particles will be easier to separate from the coal slurry (hydrophobic component). In base condition, the presentation of anion OH^- could not increased the hydrophilic pyrite. An the other hand, anion OH^- tend to repellend the pyrite molecule which is has negative partial charge, so the pyrite molecule difficult to attract from the slurry coal when the condition is base. In the critics condition, when the solution pH 8 or more the flotation will be not happen.

Sulphur recovery will be increased when the air flow rate increased in range 0.57-1.86 Litre/minute. Increasing the air flow rate will be adding the amount of air bubble as a hydrofobic particle (coal), thus coal particle will be distributed along the column in order to increase the possibility of the flotation process. Along the increasing the air flow rate, coal particle drag force (F_D) is increased equal with the quadratic value of velocity of the coal particle. The increasing drag force will also increased the bouyant force and thus will be gravitational force and because of it the flotation process of coal will be easier. Further increase the air flow rate beyond 1.86 Litre/minute has not significant increase in sulphur recovery. Thus possibility happens because of the angle contact between coal particle and air bubble become smaller. And the smaller the angle, the smaller adhesion force between coal particle and air bubble, thus fenomenas will make the flotation process difficult to happens. The difficulties flotation process will be happen when the air flow rate >3 Litre/minute, on thus condition the coal losses was maksimum (15%) and tend to collect in the bottom of the column.

Reducing the particle size to 121 μm will be increase the sulphur recovery. The smaller the size of coal particle, organic particle of sulphur will be cathed in the coal slurry. This is most probably make the pyrite of sulphur attracted to hydrophilic component (water). The smaller size particle ($<121 \mu\text{m}$) has not increase sulphur recovery value and tend to decrease. The finer size of particle 66 μm (>200 mesh) make the particle forth in the surface and the flotation process was impossible happen. Even though the particle small enough to be contact with the hydrophilic component (water) along the flotation column but the it me will not come. Because of that the pyrite sulphur will not be separate and still make a collusion with coal component in the up of the flotation column.

Collector ratio to coal was influenced the process. There was a significant increase in sulphur recovery by increasing the ratio in range C/B 0.0625-0.25. CPO as a surfactant could reduce the surface tension between solid-air particle in coal slurry. Thus, will be in creased adhesion force between solid particle with surface air bubble. Because of it, solid particle was easy to floated along the air. The results show that further increase in ratio value C/B 0,25-1 has not significantly influenced the sulphur recovery. When the collector reach maximum concentration, the viscosity of slurry will be increase and make the coal particle velocity small thus the process will be difficult to floated.

Research results in each variables was had an optimum values as follows: $t_{\text{opt}} = 40$ minute, $LpD_{\text{opt}} = 21$, $pH_{\text{opt}} 6\frac{1}{2}$, $v_{\text{opt}} = 1.86$ Litre/minute, $\bar{d}_{p_{\text{opt}}} = 121 \mu\text{m}$ ($=100/150$ mesh) and $Rt_{\text{opt}} = \frac{1}{4}$. Thus value will be reduce the sulphur content of Mallawa's coal to 0.92% or recovery sulfur maximum $R_{\text{max}} 72\%$. In other hand, thus results also reduce ash content to 8.46% or recovery ash 31% in the meanwhile the carbon value is increased to 50.08% and

caloric value increased to 6105 cal/g. Thus flotation coal was fulfill the requirement for coal industry (Cement Industry and Steam Power Plant), which is requested sulphur content < 1%, ash content <10% and caloric value > 6000 cal/g.

Generalization form for variables affecting the flotation process was done by computational modeling in order to get a empirics correlation between sulphur recovery (R) as a time function, dimension columns, air flow rate and coal particle size as follow:

$$R = 0.0153 \left\{ 20.05 \left(\frac{vt}{V} \right) - 1.53 \left(\frac{vt}{V} \right)^2 \right\} \left\{ 91084 \left(\frac{\bar{d}_p}{D} \right) - 3E7 \left(\frac{\bar{d}_p}{D} \right)^2 \right\}$$

Whereas V is column volume ($= 1/4\pi \left(\frac{L}{D} \right) D^3$) and D is column diameter. According thus results we had optimum value, thus are $(\bar{d}_p / D)_{opt} = 0,0015$ and $(vt / V)_{opt} = 6.5647$ with minimum retained sulphur 0.99 % or recovery sulphur maximum R_{max} 70% with correction factor 2,78%. Thus simulation formula could be applied in limited KTD range, $0 \leq [vt / V] \leq 14$ and $0 < [\bar{d}_p / D] \leq 3 \times 10^{-3}$

Keywords: coal, desulphurization, flotation, surfactant, CPO

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUTAN	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PRAKATA	iii
INTISARI	v
EXTENDED ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR SIMBOL	xviii
DAFTAR SINGKATAN	xx
I. PENDAHULUAN	1
1. Latar Belakang	1
2. Perumusan Masalah	4
3. Hipotesis	5
4. Tujuan Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Tinjauan Umum Batubara	6
1. Proses Pembentukan Batubara	6
a. Teori <i>in Situ</i>	7
b. Teori <i>Drift</i>	7
2. Kandungan Kimia Batubara	8
a. Senyawa Organik	8
b. Senyawa Anorganik	8
c. Senyawa Sulfur	8
3. Ikatan Sulfur Dalam Batubara	9
a. Ikatan Sulfur Organik	9
b. Ikatan Sulfur Anorganik	10
4. Kualitas dan Klasifikasi Batubara	12
a. Analisis Proximate	12
b. Analisis Ultimate	12
5. Cadangan, Produksi dan Konsumsi Batubara	16
6. Pengolahan Batubara	22
7. Batubara Sebagai Sumber Bahan Bakar dan Energi	23
8. Kriteria Bahan Bakar Batubara di Industri	26
9. Kelayakan Ekonomi Pemanfaatan Batubara	27

10. Dampak Penggunaan Batubara.....	28
B. Teknologi Desulfurisasi Batubara.....	31
1. Desulfurisasi Secara Fisika.....	31
a. Pemisahan Magnet.....	31
b. Kolom Flotasi.....	32
c. Flokulasi Selektif.....	32
2. Desulfurisasi Secara Biologi.....	32
a. Desulfurisasi Menggunakan Mikroba.....	32
b. Desulfurisasi Kombinasi Metode Flotasi dan Mikroba.....	33
3. Desulfurisasi Secara Kimia.....	33
a. Desulfurisasi Menggunakan Etanol.....	33
b. Desulfurisasi Dengan Proses Oksidasi Selektif.....	33
c. Desulfurisasi Menggunakan Asam Sulfonat Triflorometan.....	34
d. Desulfurisasi Menggunakan Larutan Barium Klorida.....	34
e. Desulfurisasi Menggunakan Oksidator Besi Sulfat atau Besi Klorida.....	34
f. Desulfurisasi Menggunakan Pereaksi Asam HCl, HNO ₃ atau H ₂ SO ₄	34
g. Desulfurisasi Menggunakan Pereaksi Basa NaOH atau KOH.....	34
C. Teknologi Pemisahan Flotasi.....	36
1. Prinsip Dasar Flotasi.....	37
a. Teori Gerakan Partikel Dalam Fluida.....	37
b. Teori Pengapungan (<i>buoyancy</i>).....	39
c. Teori Tegangan Permukaan.....	40
2. Komponen Utama Flotasi.....	43
a. Fasa Gas ..	43
b. Fasa Cair ..	44
c. Fasa Padat ..	44
3. Faktor-Faktor Berpengaruh Dalam Flotasi.....	45
a. Faktor Fisika.....	45
i. Pengadukan slury.....	45
ii. Ukuran gelembung udara ..	45
iii. Laju alir udara ..	45
iv. Dimensi kolom ..	45
v. Ukuran partikel/mineral ..	45
vi. Densitas slury ..	45
b. Faktor Kimia.....	45
i. Kolektor.....	45
ii. Modifier.....	48
① Pengatur pH.....	48
② Aktivator.....	49
③ Depresan.....	49
④ Dispersan.....	50
⑤ Flokulan.....	50
iii. Frother.....	50

D. Pemilihan Metode Desulfurisasi: Flotasi	51
E. Pemilihan Surfaktan : CPO	53
F. Penelitian-Penelitian yang Berhubungan	57
III. METODELOGI PENELITIAN	60
A. Bahan dan Alat Penelitian	60
B. Tempat dan Waktu Penelitian	60
C. Jalan Penelitian.....	62
1. Preparasi dan Karakterisasi Bahan Batubara	62
2. Studi Pencampuran Batubara	62
3. Studi Flotasi Batubara	64
D. Olah Data Hasil Penelitian	65
1. Optimasi 1 Variabel.....	65
2. Optimasi Multivariabel.....	65
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	69
A. Karakteristik Batubara Asal Sulawesi	69
B. Studi Pencampuran Batubara	71
C. Desulfurisasi Batubara Secara Flotasi	73
1. Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Waktu Flotasi.....	73
2. Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Dimensi Kolom Flotasi.....	74
3. Desulfurisasi Batubara dengan Variasi pH	76
4. Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Laju Alir Udara.....	78
5. Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Ukuran Partikel Batubara	80
6. Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Rasio CPO dan Batubara	82
7. Flotasi Batubara Berdasarkan 6 Variabel Optimum.....	84
D. Pemodelan Empirik	87
V KESIMPULAN DAN SARAN	91
A. Kesimpulan.....	91
B. Saran	94
DAFTAR PUSTAKA.....	95
LAMPIRAN DISERTASI	100

DAFTAR TABEL

Tabel-1: Klasifikasi Batubara.....	14
Tabel-2: Karakteristik Batubara Asal Sulawesi-Selatan	15
Tabel-3: Cadangan Batubara Indonesia	18
Tabel-4: Produksi dan Export/Inport Batubara di Indonesia.....	19
Tabel-5: Data Prediksi Produksi dan Konsumsi Batubara Indonesia.....	19
Tabel-6: Kontribusi Atom Terhadap Panas Pembakaran	23
Tabel-7: Konsumsi Berbagai Sumber Energi.....	24
Tabel-8: Kriteria Batubara Sebagai Bahan Bakar di Industri Semen dan PLTU	26
Tabel-9: Komposisi Kimia Flay Ash	30
Tabel-10: Konsentrat Mineral Yang Dapat Diperoleh Dengan Metode Flotasi	36
Tabel-11: Kelompok Mineral (Fasa Padat).....	44
Tabel-12: Jenis-Jenis Kolektor Untuk Flotasi	48
Tabel-13: Minyak Nabati Dari Beberapa Sumber	53
Tabel-14: Komposisi Asam Lemak Dalam Minyak Sawit.....	54
Tabel-15: Produksi Minyak Kasar Kelapa Sawit (CPO) di Indonesia.....	55
Tabel-16: Karakteristik CPO Asal Palopo (Sul-Sel).....	55
Tabel-17: Nomor Ayakan dan Jenis Ukuran Partikel	62
Tabel-18: Nomor Prosedur Analisis Batubara Dalam ASTM Standar 1980	63
Tabel-19: Acuan Pencampuran Batubara.....	63
Tabel-20: Karakteristik Batubara Mallawa (Maros, Sulawesi Selatan).....	69
Tabel-21: Hasil Studi Pencampuran Batubara	71
Tabel-22: Data Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Waktu Flotasi.....	73
Tabel-23: Data Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Dimensi Kolom Flotasi.....	74
Tabel-24: Data Desulfurisasi Batubara dengan Variasi pH	76
Tabel-25: Data Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Laju Alir Udara.....	78
Tabel-26: Data Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Ukuran Partikel Batubara	80
Tabel-27: Data Desulfurisasi Batubara dengan Variasi Rasio CPO dan Batubara	82
Tabel-28: Karakteristik Batubara Hasil Flotasi Berdasarkan 6 Variabel Optimum.....	85
Tabel-29: Nilai Power Masing-Masing KTD.....	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar-1: Bongkahan Batubara	6
Gambar-2: Struktur Batubara, Model Shinn's	9
Gambar-3: Struktur Batubara, Model Wiser's	10
Gambar-4: Struktur Batubara, Model Spiro's	11
Gambar-5: Kualitas Batubara Indonesia	15
Gambar-6: Konsumsi Bahan Bakar Dunia	17
Gambar-7: Peta Potensi Batubara di Indonesia	20
Gambar-8: Peta Potensi Batubara di <i>Sulawesi Selatan</i>	21
Gambar-9: Perbandingan Cadangan Bahan Bakar Batubara, Gas Alam Dan Minyak	24
Gambar-10: Konsumsi Batubara di Indonesia Tahun 2000 dan 2001	25
Gambar-11: Produksi <i>Clean Fuel</i> dari Batubara	25
Gambar-12: Biaya Produksi Sumber Bahan Bakar	28
Gambar-13: Skema Alat Pembakaran Dengan Bahan Bakar Batubara	29
Gambar-14: Penurunan Nilai Kalor Akibat Penurunan Sulfur dan Karbon Tetap	35
Gambar-15: Gaya-Gaya yang Bekerja Pada Bola Kaku	37
Gambar-16: Gaya Arah y Pada Partikel Dalam Fluida	40
Gambar-17: Sudut Kontak (θ) yang Terbentuk Pada Sistem Tiga Fasa	41
Gambar-18: Diagram Sudut Kontak Antara Cair dan Padat	42
Gambar-19: Skema Proses Pemisahan di Dalam Kolom Flotasi	43
Gambar-20: Klasifikasi Kolektor	46
Gambar-21: Bentuk Partikel Hidrofilik yang Terhidrofobikan	47
Gambar-22: pH Kritis Flotasi Pirit, Kalkopirit dan Kalkosit	49
Gambar-23: Flow Sheet Depiritisasi Batubara dengan Metode Flotasi	51
Gambar-24: Skema Alat Desulfurisasi Batubara Secara Flotasi	61
Gambar-25: Profil Recovery Sulfur Batubara Sebagai Fungsi Waktu Flotasi	74
Gambar-26: Profil Recovery Sulfur Batubara Sebagai Fungsi Dimensi Kolom Flotasi	75
Gambar-27: Profil Recovery Sulfur Batubara Sebagai Fungsi pH	77
Gambar-28: Campuran Slury Batubara Dalam Kolom Flotasi	77
Gambar-29: Profil Recovery Sulfur Batubara Sebagai Fungsi Laju Alir Udara	79
Gambar-30: Profil Recovery Sulfur Batubara Sebagai Fungsi Ukuran Partikel Batubara	81
Gambar-31: Profil Recovery Sulfur Batubara Sebagai Fungsi Rasio CPO dan Batubara	82
Gambar-32: Kadar Sulfur (a) dan Nilai Kalor (b) Batubara Sebelum dan Setelah Flotasi	84
Gambar-33: Perbandingan Karakteristik Batubara Sebelum dan Setelah Flotasi	85
Gambar-34: Korelasi Recovery Sulfur Simulasi dengan Data Labortorium	89

DAFTAR SIMBOL

A	: Luas permukaan bidang kontak permukaan bola arah y ($= \frac{1}{4} \pi \cdot D_p^2$) (m^2)
a	: Percepatan (<i>acceleration</i>) ($= dv/dt$), (m^2/dt)
a_i, b_i	: Koefisien persamaan polinomial
B	: Berat batubara (kg)
C	: Berat CPO, (kg)
c1-c4	: Nilai power masing-masing KTD pada persamaan <i>power function</i> tersederhanakan
C_B	: Konsentrasi batubara (kg/Liter)
C_C	: Konsentrasi CPO (kg/Liter)
C_D	: Koefisien gesek (<i>drag coefisien</i>)
C_H	: Konsentrasi ion H^+ (kg/Liter)
D	: Diameter kolom flotasi, (cm)
D_p	: Diameter partikel, (m)
\bar{d}_p	: Ukuran (diameter) partikel batubara rata-rata, (μm)
$\bar{d}_{p_{opt}}$: Diameter partikel batubara rata-rata optimum, (μm)
F	: Gaya percepatan, (N)
F_b	: Gaya apung (<i>buoyant force</i>), (N)
F_D	: Gaya gesek (<i>drag force</i>), (N)
F_g	: Gaya gravitasi (<i>gravitation force</i>), (N)
g	: Kecepatan gravitasi ($= 9,80665 m/dt^2$)
L	: Tinggi kolom flotasi (cm)
LpD_{opt}	: Dimensi kolom flotasi optimum
m	: Massa, (kg)
N_{Re}	: Bilangan Reynold (<i>Reynold number</i>)
p1 – p13	: Nilai power masing-masing variabel flotasi pada persamaan umum <i>power function</i>
pH	: Derajat keasaman ($= -\log [H^+]$)
pH_{opt}	: pH optimum
Q	: Nilai kalor (<i>calorific value</i>) (Btu/lb, kal/g)
R	: Recovery sulfur dalam batubara (%)
$R_{simulasi}$: Recovery sulfur dalam batubara berdasarkan hitungan (%)
R_{lab}	: Recovery sulfur dalam batubara berdasarkan data laboratorium (%)
r^2	: Koefisien korelasi
$R_{\bar{d}_p, D}$: Recovery sulfur sebagai fungsi \bar{d}_p / D (%)
$R_{v.t/V}$: Recovery sulfur sebagai fungsi $v.t / V$ (%)
R_t	: Rasio berat CPO dan batubara ($= C/B$)
$R_{t_{opt}}$: Rasio berat optimum
t	: Waktu flotasi (menit)
t_{opt}	: Waktu optimum (menit)
W	: Kerja (N.m, J)
V	: Volume kolom flotasi ($= \frac{1}{4} \pi D^2 L$; liter)
V_p	: Volume partikel bola ($= m/\rho_p$; m^3)
X	: Gabungan perkalian <i>polynomial function</i>

Disertasi Pascasarjana Teknik Kimia ITS Surabaya, 2006
By: Andi Aladin

Disertasi Pascasarjana Teknik Kimia ITS Surabaya, 2006
By: Andi Aladin

α	: Konstanta pada persamaan <i>power function</i>
α'	: Konstanta pada persamaan <i>power function</i> yang disederhanakan
β	: Konstanta pada persamaan gabungan <i>polynomial function</i>
ζ	: Konstanta pada persamaan korelasi matematis data simulasi dengan laboratorium
v	: Laju gerak partikel bola, (m/dt); Laju alir udara masuk kolom flotasi, (liter/menit)
v_t	: Laju linear (<i>terminal velocity</i>), (m/dt)
v_{opt}	: Laju alir udara optimum (liter/menit)
ρ	: Massa jenis fluida, (kg/m ³); Massa jenis batubara (g/cm ³)
θ	: Sudut kontak
γ	: Tegangan permukaan (N/m ²)
γ_{LA}	: Tegangan permukaan cair-gas, (N/m ²)
γ_{SA}	: Tegangan permukaan padat-gas, (N/m ²)
γ_{SL}	: Tegangan permukaan padat-cair, (N/m ²)
π	: Bilangan faktor (=22/7)
σ	: Luas permukaan, (m ²)
$\Delta\sigma_{SL}$: Luas permukaan antara fasa padat dan cair, (m ²)
$\Delta\sigma_{LA}$: Luas permukaan antara fasa cair dan gas, (m ²)
$\Delta\sigma_{SA}$: Luas permukaan antara fasa padat dan gas, (m ²)
ΔE	: Energi permukaan yang terbebaskan, (N)
ρ_p	: Massa jenis partikel bola, (kg/m ³)
μ	: Viskositas, (N.dt/m ² , Pa.dt, cP)

DAFTAR SINGKATAN

A	: Air, volume air (mL)
Ash	: <i>Ash</i> , kandungan abu dalam batubara (%)
ASTM	: Standar the <i>American Society for Testing and Materials</i>
B	: Batubara, berat batubara (kg)
BSN	: Badan Standarisasi Nasional
C	: Carbon, komposisi unsur karbon dalam batubara (%)
C	: CPO, berat CPO (kg)
CBM	: <i>Coal Bed Methane</i>
CBMOP	: <i>Coal Bed Methane Outreach Program</i>
CCT	: <i>Clean Coal Technologies</i>
COM	: <i>Coal Oil Mixture</i>
CPO	: <i>Crude Palm Oil</i> (Minyak kasar kelapa sawit)
CWF	: <i>Coal Water Fuel</i>
CWM	: <i>Coal Water Mixture</i>
FC	: <i>Fixed Carbon</i> , komposisi karbon tetap dalam batubara, (%)
H	: <i>Hydrogen</i> , komposisi hidrogen dalam batubara (%)
IEEJ	: <i>Institute of Energy Economics Japan</i> .
KPO	: <i>karnel palm oil</i> , minyak inti kelapa sawit
KTD	: Kelompok Tidak Berdimensi
LpD	: Dimensi kolom flotasi, ratio tinggi dan diameter kolom ($=L/D$)
M	: <i>Moisture</i> , komposisi kandungan air dalam batubara, (%)
MIBC	: <i>Metilisobutil karbinol</i> (4-metil-2-pentenol), jenis <i>frother</i> dalam flotasi
NAAQS	: <i>National Ambient Air Quality Standards</i> .
O	: <i>Oxygen</i> , komposisi oksigen dalam batubara (%)
S	: <i>Sulphur</i> , komposisi sulfur dalam batubara (%)
SR	: Skala Rotameter
SSE	: <i>Sum of Squares of Errors</i>
TBB	: Teknologi Batubara Bersih
TFMS	: <i>Triflorometan sulfonat</i> , jenis perekasi dalam desulfurisasi batubara
VM	: <i>Volatile matter</i> , komposisi bahan mudah menguap dalam batubara (%)