

SKRIPSI

**ANALISIS BENEFISIASI BATUBARA DENGAN METODE
FLOTASI KOLOM MENGGUNAKAN AIR LAUT**

Disusun dan diajukan oleh

RICKHARDO WAHYU KASIM

D111171014



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS BENEFISIASI BATUBARA DENGAN METODE FLOTASI
KOLOM MENGGUNAKAN AIR LAUT**

Disusun dan diajukan oleh

RICKHARDO WAHYU KASIM

D111171014

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 14 Oktober 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Sufriadin, S.T., M.T.

NIP.19660817 200012 1001

Pembimbing Pendamping,



Dr. phil. nat. Sri Widodo, S.T., M.T.

NIP.19710101 201012 1 001

Ketua Program Studi,



Asep Ilyas, ST. MT. Ph.D.

NIP.19730314 200012 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rickhardo Wahyu Kasim
NIM : D111171014
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya yang berjudul

ANALISIS BENEFISIASI BATUBARA DENGAN METODE FLOTASI KOLOM MENGGUNAKAN AIR LAUT

adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan hasil skripsi ini merupakan hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 14 Oktober 2022

Yang menyatakan,

Tanda tangan,



Rickhardo Wahyu Kasim

ABSTRAK

Batubara merupakan batuan hidrokarbon padat yang terbentuk dari endapan organik berupa tumbuhan dalam lingkungan bebas oksigen, pengaruh tekanan, dan panas yang berlangsung sangat lama. Batubara di Indonesia mengandung sulfur yang tinggi. Kadar sulfur yang sangat tinggi pada batubara menyebabkan pencemaran lingkungan dan kerusakan alat pembakaran. Pengurangan kadar sulfur pada batubara selain menghilangkan pencemar juga untuk menaikkan nilai kalori sehingga dapat meningkatkan harga jual batubara. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui bagaimana penurunan kadar sulfur, kadar abu, dan peningkatan nilai kalori pada batubara asal daerah Tamalea, dengan metode flotasi kolom menggunakan air laut sebagai media dan reagen yang digunakan yaitu minyak pinus dan minyak diesel. Sampel batubara dibagi menjadi beberapa fraksi 70, 80, dan 100 *mesh*, dengan waktu pengujian masing-masing selama 7 menit. Berdasarkan hasil analisis *ultimate* dan proksimat hasil flotasi kolom menunjukkan penurunan persentase kadar sulfur total berkisar 2,34% hingga 32,81%, dengan persentase tertinggi pada sampel GN-1. Persentase penurunan kadar abu berkisar 6,23% hingga 12,98%, dengan persentase tertinggi pada sampel RWK-1. Sampel juga mengalami peningkatan nilai kalori berkisar 5,1% sampai 5,7%, dengan persentase tertinggi pada sampel RWK-2.

Kata Kunci: Batubara; Flotasi Kolom; Sulfur; Air Laut; Nilai Kalori

ABSTRACT

Coal is a solid hydrocarbon rock formed from organic deposits in the form of plants in an oxygen-free environment, the influence of pressure, and heat that lasts a very long time. Coal in Indonesia contains high sulfur. Very high sulfur content in coal causes environmental pollution and damage to combustion equipment. Reducing the sulfur content in coal in addition to eliminating pollutants is also to increase the calorific value so that it can increase the selling price of coal. The purpose of this study was to find out how to reduce sulfur content, ash content, and increase calorific value in coal from the Tamalea area, by column flotation method using seawater as the medium and the reagents used were pine oil and diesel oil. The coal samples were divided into 70, 80, and 100 mesh fractions, with a test time of 7 minutes each. Based on the results of the ultimate and proximate analysis of column flotation results showed a decrease in the percentage of total sulfur content ranging from 2.34% to 32.81%, with the highest percentage in the GN-1 sample. The percentage reduction in ash content ranged from 6.23% to 12.98%, with the highest percentage in the RWK-1 sample. The sample also experienced an increase in calorific value ranging from 5.1% to 5.7%, with the highest percentage in the RWK-2 sample.

Keywords: Coal; Column Flotation; Sulfur; Sea Water; Calorific Value

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi Analisis Benefisiasi Batubara dengan Metode Flotasi Kolom Menggunakan Air Laut.

Skripsi ini disusun untuk peningkatan mutu batubara dengan metode flotasi kolom. Skripsi ini juga disusun untuk mengaplikasikan ilmu yang didapatkan selama berkuliah di Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin untuk diajukan sebagai syarat menyelesaikan studi.

Penyusun mengucapkan terima kasih pada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan baik secara moril maupun materil sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya penyusun sampaikan kepada Bapak Dr. Sufriadin ST., MT selaku kepala Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian sekaligus pembimbing I dan Bapak Dr. Phil, nat. Sri Widodo, ST., MT selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dalam Menyusun skripsi ini.

Terima kasih juga kepada orang tua saya yang telah banyak berkorban material selama saya berkuliah di Universitas Hasanuddin. Tanpa dukungan moril serta materil dari orang tua, skripsi ini tidak akan bisa disusun.

Saya ucapkan terima kasih kepada Choi Yena beserta member IZ*ONE lainnya Kwon Eunbi, Miyawaki Sakura, Kang Hyewon, Lee Chaeyeon, Kim Chaewon, Kim Minjoo, Yabuki Nako, Honda Hitomi, Jo Yuri, Ahn Yujin, Jang Wonyoung yang karyanya menemani saya dalam pembuatan skripsi, serta memberi motivasi agar tetap berkerja keras di umur yang masih muda.

Penyusun menyadari terdapat kekurangan dan keterbatasan dalam skripsi ini sehingga kritik dan saran sangat diharapkan guna menutupi kekurangan dan

keterbatasan penyusun dalam penyusunan skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penyusun dan semua pembaca.

Gowa, 29 Juli 2022

Rickhardo Wahyu Kasim

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Kegunaan Penelitian.....	4
1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian	4
1.6 Lokasi Penelitian	6
BAB II FLOTASI KOLOM	7
2.1 Batubara	7
2.2 Mineral pada Batubara	14
2.3 Analisis Kualitas Batuabara	15
2.4 Proses Penurunan Kadar Abuh dan Sulfur Batubara	22
2.5 Flotasi Batubara.....	26
BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1 Pengumpulan Data.....	36
3.2 Peralatan Penelitian	36
3.3 Preparasi Sampel	44
3.4 Analisis Sampel.....	45
3.5 Flotasi Kolom Sampel Batubara	51
3.6 Bagan Alir Penelitian	52

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Karakteristik Sampel Batubara	53
4.2 Analisis Mineral <i>Matter</i> Batubara.....	55
4.3 Perbandingan Sampel Awal dengan Sampel Setelah Flotasi Kolom Berdasarkan Analisis Sulfur dan Abu	58
4.4 Analisis Presentasi Desulfurisasi dan <i>Deashing</i>	62
4.6 Faktor yang Mempengaruhi Desulfurisasi dan <i>Deashing</i> Batubara	64
BAB V PENUTUP	66
5.1 Kesimpulan	66
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA.....	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Lokasi penelitian	6
2.1 Proses pembentukan batubara	9
2.2 Kelas dan jenis batubara.....	11
2.3 Proses flotasi	26
2.4 Sudut kontak pada proses flotasi	29
2.5 Mekanisme kerja flotasi kolom.....	31
2.6 <i>Aeration cell</i>	34
2.7 <i>Sub aeration cell</i>	34
3.1 <i>Jaw Crusher</i>	36
3.2 <i>Screening</i>	36
3.3 Mortar	37
3.4 Neraca analitik.....	37
3.5 Mikroskop polarisasi	38
3.6 <i>X-Ray diffraction</i>	39
3.7 <i>Muffle furnace</i>	40
3.8 Tang <i>crucible</i>	41
3.9 <i>Crucible</i>	41
3.10 Labu semprot	42
3.11 <i>Boat crucible</i>	42
3.12 <i>Set tube furnace</i>	43
3.13 <i>Digital bomb calorimeter</i>	49
3.14 Bagan alir penelitian.....	51
4.1 Kenampakan mikroskopik batubara Bonehau	55

4.2	Difraktogram hasil XRD.....	57
4.3	Grafik hasil desulfurisasi	58
4.4	Grafik hasil <i>deashing</i>	60
4.5	Perbandingan <i>deashing</i> dan desulfurisasi.....	62

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Sudut kontak didasarkan pada pengukuran flotometrik yang dinyatakan dalam derajat.....	27
2.2 Sudut kontak beberapa bahan.....	28
4.1 Hasil analisis conto batubara awal.....	53
4.2 Hasil analisis sulfur dan abu	57
4.3 Pengaruh ukuran butir terhadap desulfurisasi dan <i>deashing</i> batubara.....	58
4.4 Ukuran fraksi yang optimal desulfurisasi	59
4.5 Ukuran fraksi yang optimal <i>deashing</i>	60
4.6 Persentase desulfurisasi dan <i>deashing</i> batubara	61
4.7 Hasil analisis nilai kalori	63

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A. Hasil analisis sulfur.....	74
B. Hasil analisis XRD	75
C. Hasil analisis nilai kalori	79
D. Hasil analisis proksimat.....	82
E. Kegiatan penelitian	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsumsi batubara di dunia diperkirakan akan terus menerus meningkat dari waktu ke waktu terutama di kawasan Asia. Cadangan batubara lignit terhitung sekitar 48% dari total cadangan batubara di dunia, sementara itu di Asia cadangan batubara lignit mencapai 30%, sedangkan di Indonesia mencapai 60% dari total cadangan batubara. Meskipun jumlah batubara lignit yang dikonsumsi terhitung sekitar 30% dari total produksi batubara dunia. Jumlah yang dikonsumsi di Asia terhitung hanya 10% dari total produksinya. Terutama di Indonesia, praktik-praktik penambangan cenderung batubara bituminus dan subbituminus yang kualitasnya lebih tinggi yang lebih banyak ditambang dan diproduksi karena memproduksi batubara lignit kurang ekonomis dan tidak dapat memenuhi kriteria pasar. Dapat diprediksi bahwa yang tersisa di masa mendatang adalah sejumlah besar cadangan batubara lignit yang tidak bisa dimanfaatkan. Oleh karena peluang untuk mengisi potensi pasar batubara masih terbuka luas, baik dipakai langsung sebagai sumber energi pada pembangkit listrik maupun diekspor ke luar negeri, maka promosi pemanfaatan batubara lignit harus sedini mungkin dijadikan isu yang amat penting bagi Indonesia (Billah, 2007).

Batubara hasil penambangan mengandung bahan pengotor (*impurities*). Hal ini terjadi ketika proses *coalification* (pembatubaraan) atau pun pada proses penambangan. Ada dua jenis pengotor batubara yaitu *inherent impurities*, merupakan pengotor bawaan yang terdapat dalam batubara dan eksternal *impurities*, merupakan pengotor yang berasal dari luar yang berasal dari lapisan penutup. *Inherent impurities* dapat berupa gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrit (CaSO_4), pirit (FeS_2), silika (SiO_2). Sulfur dalam batubara terdapat dalam bentuk anorganik dan organik. Pirit (FeS_2) merupakan

sulfur anorganik selain markasit (FeS_2) dan sulfat yang terdapat pada batubara. Sulfur merupakan elemen-elemen *impurities* (kotoran pengganggu), disamping kotoran lainnya seperti tanah, batuan, mineral dan lain-lain. Usaha pengurangan kadar abu dan kadar sulfur pada batubara, selain menghilangkan unsur pencemar, juga merupakan usaha menaikkan nilai kalori batubara itu sehingga dapat memberikan nilai tambah yang mirip dengan batubara kualitas tinggi (Nukman dan Poertadji, 2006). Unsur sulfur terdapat pada batubara dengan kadar bervariasi dari rendah (jauh di bawah 1%) sampai lebih dari 4%. Menurut kepmen ESDM Nomor 1395K/30/MEM/2018 Sulfur batubara dikatakan tinggi apabila besar dari 0,8% dan *ash content* maksimal yang diperbolehkan sebesar 26,30%.

Proses mengurangi kandungan sulfur dalam batubara disebut desulfurisasi. Berdasarkan prosesnya, desulfurisasi batubara dapat dilakukan dengan tiga metoda, yaitu metode fisika, kimia, dan biologi (Manik dan Gah, 2018). Sulfur pada batubara dapat dikurangi kadarnya dengan cara mencuci batubara tersebut, salah satu metode yang dapat digunakan yaitu dengan menggunakan metode flotasi (Nukman dan Poertadji, 2006). Metode flotasi banyak dipakai dalam industri pertambangan untuk mengkonsentrasikan mineral-mineral yang diinginkan dan juga termasuk karbonat, fosfat, oksida dan batubara atas dasar perbedaan sifat sifat hidrophobiknya. Metode flotasi cukup selektif untuk memisahkan mineral dari pengotornya sehingga mempunyai nilai ekonomi yang signifikan (Sundari dkk., 2010). Flotasi berlangsung pada suatu sistem yang terdiri dari partikel berukuran halus, air, udara, dan beberapa pereaksi kimia (kolektor). Keempat komponen tersebut saling berinteraksi baik secara fisik maupun secara kimia sedemikian rupa sehingga terjadi pemisahan antara komponen hidrofobik (anti air) dan komponen hidrofilik (suka air). Biasanya komponen hidrofobik densitasnya lebih rendah dari komponen hidrofilik sehingga komponen ini cenderung terapung, sementara komponen hidrofilik akan berada di bagian bawah.

Dalam sistem flotasi, partikel berukuran halus yang bersifat hidrofobik atau dibuat hidrofobik oleh kolektor dapat menempel di permukaan gelembung-gelembung udara yang sengaja diciptakan. Sehingga dengan demikian, partikel halus tersebut akan lebih mudah mengapung bersama media gelembung udara (Mandasini dan Aladin, 2003).

Menurut Klassen dan Mokrousov dalam (Orhan Ozdemir, 2013), para peneliti dari Uni Soviet menemukan bahwa mineral hidrofobik alami seperti batubara dapat mengapung dalam larutan elektrolit tanpa menggunakan kolektor dan *frothers*. Menurut Li dan Somasundaran (1991), menunjukkan bahwa efisiensi flotasi tergantung pada tingkat perpaduan gelembung. Mereka kemudian menegaskan bahwa sementara flotasi batubara menurun pada konsentrasi garam rendah dan flotasi meningkat pada garam yang lebih tinggi, sedangkan air laut merupakan sumber konsentrasi garam. Daerah penyelidikan sebagian besar merupakan daerah tinggian, dicirikan oleh morfologi dataran dan perbukitan. Struktur geologi yang terdapat di daerah penyelidikan berupa sesar normal dan sesar anjak berarah timurlaut-baratdaya yang mengontrol pengendapan formasi berumur Tersier. Lipatan berupa antiklin dan sinklin terdapat di sekitar lapisan batubara di daerah Tamalea Tua. Lapisan batubara di beberapa lokasi mempunyai kemiringan lapisan yang cukup tegak hingga 80°. Lapisan batubara di daerah penyelidikan juga secara megaskopis sangat mengkilap, mengindikasikan struktur geologi mempunyai peranan dalam meningkatkan kualitas batubara. Benefisiasi merupakan proses yang meningkatkan (manfaat) nilai ekonomi bijih yang ditambang dengan menghapus bahan-bahan yang bernilai, menghasilkan tingkatan yang lebih tinggi produk. Hal inilah yang melatar belakangi penulis melakukan penelitian mengenai penurunan kadar sulfur, abu, dan peningkatan nilai kalori batubara dengan menggunakan air laut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana karakteristik sampel batubara awal yang digunakan?
2. Bagaimana pengaruh variabel fraksi batubara terhadap penurunan kadar abu dan sulfur?
3. Bagaimana peningkatan nilai kalori batubara dengan flotasi kolom menggunakan air laut?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian benefisiasi dengan flotasi kolom ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik batubara awal yang digunakan sebagai sampel.
2. Menganalisis pengaruh variabel fraksi ukuran batubara terhadap penurunan kadar abu dan sulfur.
3. Menganalisis peningkatan nilai kalori batubara dengan flotasi kolom menggunakan air laut.

1.4 Kegunaan Penelitian

Penelitian ini berguna dalam memberikan informasi mengenai pengaruh air laut terhadap penurunan kadar abu, sulfur, dan peningkatan nilai kalori batubara yang dapat berdampak pada peningkatan kualitas batubara yang digunakan.

1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Tahap studi literatur

Studi literatur merupakan tahapan kajian yang ditinjau melalui buku, jurnal penelitian, artikel ataupun referensi lain yang berkaitan dengan topik penelitian. Tahapan ini dilakukan sebelum dan selama penelitian berlangsung.

2. Tahap perumusan masalah

Perumusan masalah dilakukan untuk menentukan masalah yang akan diteliti dan menjadi batasan dalam melakukan penelitian.

3. Tahap pengambilan dan preparasi sampel

Pengambilan sampel dilakukan di daerah Tamalea yang terletak di Kecamatan Bonehau, Kabupaten Mamuju, Provinsi Sulawesi Barat. Selanjutnya, dilakukan preparasi sampel di Laboratorium Pengolahan Bahan Galian, Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin; Laboratorium Preparasi, Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Laboratorium Motor Bakar, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan Graha Sucofindo MKS.

4. Tahap analisis data

Sampel yang telah dipreparasi kemudian dianalisis menggunakan metode analisis proksimat dan analisis nilai kalori. Analisis proksimat meliputi penentuan kandungan air (*moisture*), kadar abu (*ash*), zat terbang (*volatile matter*), dan perhitungan karbon tetap (*fixed carbon*). Analisis nilai kalori berfungsi untuk mengetahui besarnya panas yang dihasilkan dari pembakaran batubara.

5. Tahap penyusunan laporan tugas akhir

Penyusunan laporan tugas akhir merupakan tahapan akhir dalam rangkaian kegiatan penelitian, yakni secara keseluruhan data yang telah dikumpulkan, diolah dan dianalisis, kemudian dituangkan dalam bentuk laporan akhir penelitian. Laporan ini disusun secara sistematis sesuai dengan aturan

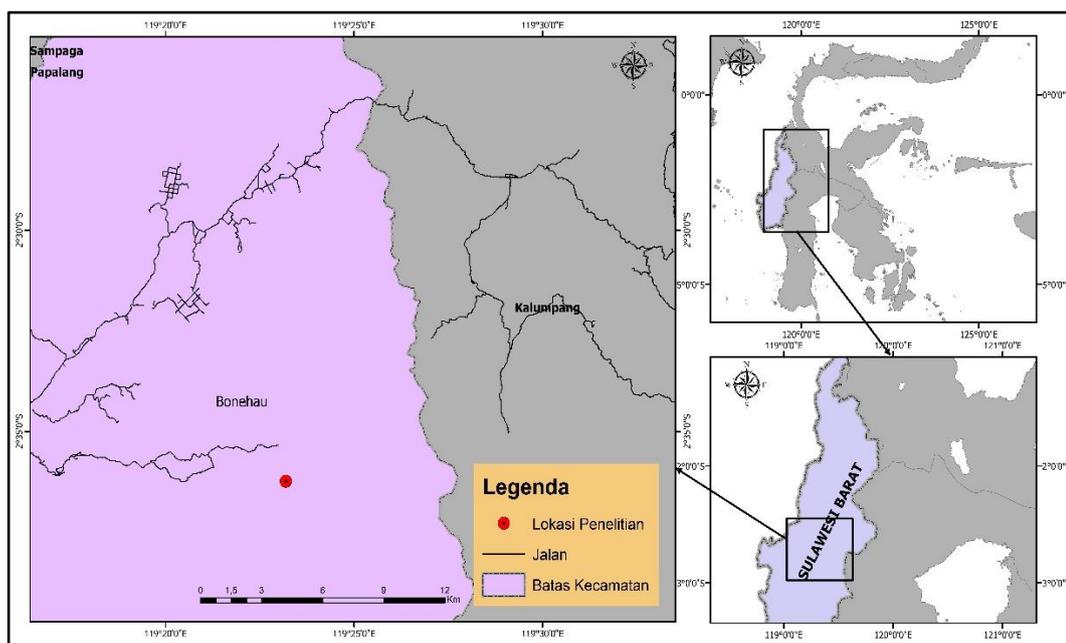
penulisan tugas akhir yang telah ditetapkan pada Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

6. Tahap seminar dan penyerahan laporan tugas akhir

Laporan hasil penelitian akan dipresentasikan dalam seminar hasil dan ujian akhir sarjana. Melalui kegiatan ini akan diperoleh masukan dan berbagai saran untuk perbaikan dan penyempurnaan laporan dari dosen penguji, pembimbing maupun peserta seminar. Laporan yang telah direvisi selanjutnya diserahkan ke perpustakaan Program Studi Teknik Pertambangan.

1.6 Lokasi Penelitian

Secara administrative lokasi penelitian terletak di daerah Tamalea terletak di Kecamatan Bonehau, Kabupaten Mamuju, Provinsi Sulawesi Barat, Indonesia. Lokasi pengambilan sampel ditempuh melalui jalur darat. Perjalanan dari Makassar menuju lokasi dapat ditempuh dengan transportasi darat, menuju Desa Tamalea dengan waktu tempuh dari kota Makassar ± 11 jam perjalanan menggunakan mobil. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Lokasi Penelitian

BAB II

FLOTASI KOLOM

2.1 Batubara

Batubara adalah salah satu bahan galian yang memiliki peran cukup penting dalam industri pertambangan di Indonesia. Sejak sekian lama batubara tidak hanya digunakan sebagai pembangkit listrik semata. Namun, digunakan pula sebagai bahan bakar utama dalam kegiatan semen, produksi baja, dan berbagai kegiatan industri lainnya. Batubara digunakan sebagai pembangkit listrik hampir 40% di seluruh dunia. Hal ini menunjukkan bahwa batubara ke depannya perlu usaha-usaha pemanfaatan yang lebih baik lagi (Malaidji *et al.*, 2018).

Batubara merupakan suatu batuan yang mudah terbakar dengan lebih dari 50% dari berat volumenya adalah bahan organik yang merupakan material karbonat termasuk *inherent moisture*. Bahan organik utama penyusun batubara yaitu tumbuhan yang dapat berupa jejak kulit pohon, struktur kayu, daun, akar, damar, polen, dan lain-lain. Kemudian bahan organik tersebut mengalami berbagai tingkat pembusukan (dekomposisi) hingga menyebabkan perubahan sifat fisik maupun sifat kimia sesudah tertutup maupun sebelum tertutup oleh endapan lain pada saat pembentukan batubara (Tirasonjaya, 2006 dalam Siswati *et al.*, 2010).

Dekomposisi tanaman pada proses pembentukan batubara terjadi karena proses biologi dengan mikroba dimana banyak oksigen dalam selulosa diubah menjadi karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O). Setelah itu, perubahan yang terjadi dalam kandungan bahan tersebut disebabkan karena adanya tekanan serta pemanasan yang kemudian membentuk suatu lapisan tebal sebagai akibat pengaruh panas bumi dalam jangka waktu berjuta-juta tahun, sehingga lapisan tersebut akhirnya mengalami pemadatan dan pengerasan. Pola yang terlihat dari proses perubahan bentuk tumbuh-

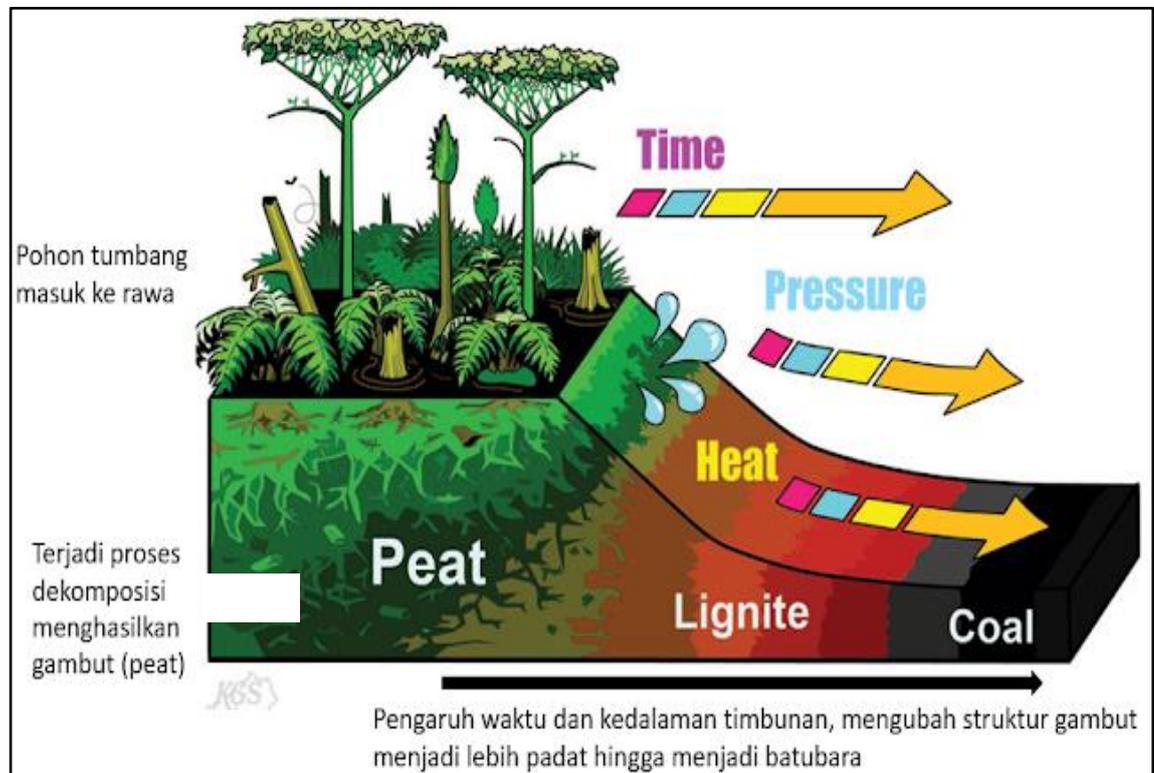
tumbuhan sampai menjadi batubara yaitu dengan terbentuknya karbon. Kenaikan kandungan karbon dapat menunjukkan tingkatan dari suatu batubara (Malaidji *et al.*, 2018).

Batubara merupakan bahan bakar hidrokarbon padat yang terbentuk dari proses penggabutan dan pematubaraan di dalam suatu cekungan (daerah rawa) dalam jangka waktu geologis yang meliputi aktivitas bio-geokimia terhadap akumulasi flora di alam yang mengandung selulosa dan lignin. Proses pematubaraan juga dibantu oleh faktor tekanan (berhubungan dengan kedalaman), dan suhu (berhubungan dengan pengurangan kadar air dalam batubara) (Sukandarrumidi, 1995).

Proses pembentukan batubara sendiri sangatlah kompleks dan membutuhkan waktu hingga berjuta-juta tahun lamanya. Batubara terbentuk dari sisa-sisa tumbuhan purba yang kemudian mengendap selama berjuta-juta tahun dan mengalami proses pematubaraan (*coalification*) di bawah pengaruh fisika, kimia, maupun geologi. Oleh karena itu, batubara termasuk dalam kategori bahan bakar fosil. Secara ringkas ada 2 tahap proses pematubaraan yang terjadi, yakni (Sudarsono, 2000):

1. Tahap diagenetik atau biokimia (penggabutan), dimulai pada saat dimana tumbuhan yang telah mati mengalami pembusukan derdeposisi dan menjadi humus. Humus ini kemudian diubah menjadi gambut oleh bakteri *anaerobic* dan fungi hingga lignit (gambut) terbentuk. Agen utama yang berperan dalam proses perubahan ini adalah kadar air, tingkat oksidasi, dan gangguan biologis yang dapat menyebabkan proses pembusukan (dekomposisi) dan kompaksi material organik serta membentuk gambut.
2. Tahap malihan atau geokimia, meliputi proses perubahan dari lignit menjadi bituminus dan akhirnya antrasit.

Secara rinci, proses pembentukan batubara dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan dijelaskan sebagai berikut (Sudarsono, 2000):



Gambar 2.1 Proses Pembentukan Batubara (*coalification*) (Kentucky Geological Survey, 2012)

- a. Pembusukan, bagian-bagian tumbuhan yang lunak akan diuraikan oleh bakteri anaerob.
- b. Pengendapan, tumbuhan yang telah mengalami proses pembusukan selanjutnya akan mengalami pengendapan, biasanya di lingkungan yang berair. Akumulasi dari endapan ini dengan endapan-endapan sebelumnya akhirnya akan membentuk lapisan gambut.
- c. Dekomposisi, lapisan gambut akan mengalami perubahan melalui proses biokimia dan mengakibatkan keluarnya air dan sebagian hilangnya sebagian unsur karbon dalam bentuk karbon dioksida, karbon monoksida, dan metana. Secara relatif, unsur karbon akan bertambah dengan adanya pelepasan unsur atau senyawa tersebut.

- d. Geotektonik, lapisan gambut akan mengalami kompaksi akibat adanya gaya tektonik dan kemudian akan mengalami perlipatan dan patahan. Batubara *low grade* dapat berubah menjadi batubara *high grade* apabila gaya tektonik yang terjadi adalah gaya tektonik aktif, karena gaya tektonik aktif dapat menyebabkan terjadinya intrusi atau keluarnya magma. Selain itu, lingkungan pembentukan batubara yang berair juga dapat berubah menjadi area darat dengan adanya gaya tektonik *setting* tertentu.

Faktor-Faktor yang mempengaruhi pembentukan batubara sangat berpengaruh terhadap bentuk maupun kualitas dari lapisan batubara. Beberapa faktor yang berpengaruh dalam pembentukan batubara adalah (Sudarsono, 2005):

1. Material dasar, yakni flora atau tumbuhan yang tumbuh beberapa juta tahun yang lalu, yang kemudian terakumulasi pada suatu lingkungan dan zona fisiografi dengan iklim dan topografi tertentu. Jenis dari flora sendiri amat sangat berpengaruh terhadap tipe dari batubara yang terbentuk.
2. Proses dekomposisi, yakni proses transformasi biokimia dari material dasar pembentuk batubara menjadi batubara. Dalam proses ini, sisa tumbuhan yang terendapkan akan mengalami perubahan baik secara fisika maupun kimia.
3. Umur, yakni skala waktu (dalam jutaan tahun) yang menyatakan berapa lama material dasar yang diendapkan mengalami transformasi. Untuk material yang diendapkan dalam skala waktu geologi yang panjang, maka proses dekomposisi yang terjadi adalah fase lanjut dan menghasilkan batubara dengan kandungan karbon yang tinggi.
4. Posisi geotektonik, yang dapat mempengaruhi proses pembentukan suatu lapisan batubara.

Batubara di Indonesia dibagi menjadi *brown coal* dan *hard coal* (SNI-6011-1999). *Brown coal* atau batubara energi rendah adalah jenis batubara dengan

peringkat yang paling rendah, mudah diremas, bersifat lunak, dan mengandung air yang tinggi (10-70%). *Brown coal* terdiri atas *soft brown coal* dan *hard brown coal* atau *lignitic* dengan nilai kalorinya <7000 kalori/gram. *Hard coal* adalah semua jenis batubara yang mempunyai peringkat lebih tinggi dari *brown coal* dengan sifat yang lebih keras, kompak, tidak mudah diremas, mengandung kadar air yang relatif rendah, umumnya struktur kayu tidak tampak lagi, dan relatif tahan terhadap kerusakan fisik pada saat penanganan (*coal handling*) dengan nilai kalorinya >7000 kalori/gram.

Kelas dan jenis batubara berdasarkan proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas, dan waktu, umumnya dibagi ke dalam lima kelas, dapat dilihat pada Gambar 2.2 (Buana, 2011):

1. Antrasit adalah kelas batubara tertinggi, dengan warna hitam berkilauan (luster) metalik, mengandung antara 86-98% unsur karbon (C) dengan kadar air kurang dari 8%.
2. Bituminus mengandung 68-86% Unsur karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya.
3. Subbituminus mengandung sedikit karbon dan banyak air sehingga menjadi sumber panas yang kurang efisien dibanding dengan bituminus.
4. Lignit atau batubara coklat adalah batubara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75 % dari beratnya.
5. Gambut, berpori, dan memiliki kadar air diatas 75% serta nilai kalori yang paling rendah.



Gambar 2.2 Kelas dan jenis batubara (Rumidi, 1995)

Batubara yang diperoleh dari hasil penambangan mengandung bahan pengotor (*impurities*). Hal ini bisa terjadi ketika proses *coalification* ataupun pada proses penambangan yang dalam hal ini menggunakan alat-alat berat yang selalu bergelimang dengan tanah (Anggayana, 2002).

Inherent *impurities* merupakan pengotor bawaan yang terdapat dalam batubara. Batubara yang sudah dibakar memberikan sisa abu. Pengotor bawaan ini terjadi bersama-sama pada proses pembentukan batubara. Pengotor tersebut dapat berupa gipsum, anhidrit, pirit, dan silika. Pengotor ini tidak mungkin dihilangkan sama sekali, namun dapat dikurangi dengan melakukan pembersihan. Eksternal *impurities*, merupakan pengotor yang berasal dari luar, timbul pada saat proses penambangan antara lain terbawanya tanah yang berasal dari lapisan penutup. Sebagai bahan baku pembangkit energi yang dimanfaatkan industri, mutu batubara mempunyai peranan sangat penting dalam memilih peralatan yang akan dipergunakan dan pemeliharaan alat. Dalam menentukan kualitas batubara perlu diperhatikan beberapa hal, antara lain (Anggayana, 2002):

- a. *Heating Value* (HV) (*calorific value* /Nilai kalori), banyaknya jumlah kalori yang dihasilkan oleh batubara tiap satuan berat dinyatakan dalam kkal/kg. Semakin tinggi HV, makin lambat jalannya batubara yang diumpankan sebagai bahan bakar setiap jamnya, sehingga kecepatan umpan batubara

perlu diperhatikan. Hal ini perlu diperhatikan agar panas yang ditimbulkan tidak melebihi panas yang diperlukan dalam proses industri.

- b. *Moisture content* (kandungan air), air batubara ditentukan oleh jumlah kandungan air yang terdapat dalam batubara. Kandungan air dalam batubara dapat berbentuk air internal (air senyawa/unsur), yaitu air yang terikat secara kimiawi. Jenis air ini sulit dihilangkan tetapi dapat dikurangi dengan cara memperkecil ukuran butir batubara. Jenis air yang kedua adalah air eksternal, yaitu air yang menempel pada permukaan butir batubara. Batubara mempunyai sifat hidrofobik yaitu ketika batubara dikeringkan, maka batubara tersebut sulit menyerap air, sehingga tidak akan menambah jumlah air internal.
- c. *Sulfur Content* (kandungan sulfur), kandungan sulfur pada batubara terdapat dalam abu batubara (disebut pula *noncombustible* sulfur). Semakin tinggi sulfur dalam batubara, maka kualitas pemrosesan batubara akan semakin menurun.
- d. *Ash content* (kandungan abu), komposisi batubara bersifat heterogen, terdiri dari unsur organik dan senyawa anorganik, yang merupakan hasil rombakan batuan yang ada di sekitarnya, bercampur selama proses transportasi, sedimentasi dan proses pembatubaraan. Abu hasil dari pembakaran batubara ini, yang dikenal sebagai *ash content*. Abu ini merupakan kumpulan dari bahan-bahan pembentuk batubara yang tidak dapat terbakar atau yang dioksidasi oleh oksigen. Bahan sisa dalam bentuk padatan ini antara lain senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_3 , Mn_3O_4 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , P_2O , SO_3 , dan oksida unsur lain.

2.2 Mineral pada Batubara

Mineral *matter* pada batubara termasuk mineral dan material anorganik lain di dalamnya serta asosiasi mineral dan maseral. Lebih dari 150 jenis mineral yang dapat diidentifikasi dari batubara. Meskipun begitu, jenis mineral yang umum ditemukan pada batubara sedikit. Mineral yang umum ditemukan pada batubara adalah pirit, kuarsa, kalsit, dolomit, siderit, dan ankerit. Mineral lain jarang ditemukan pada batubara (Xiuyi, 2009).

Mineral *matter* pada batubara dapat berasal dari unsur anorganik pada tumbuh-tumbuhan pembentuk batubara atau disebut *inherent* mineral serta mineral yang berasal dari luar rawa atau endapan kemudian di*transport* ke dalam cekungan pengendapan batubara melalui air atau angin dan dapat disebut *extraneous* atau *adventitious* mineral *matter*. Berdasarkan dari pembentukannya mineral *matter* dibagi menjadi dua kategori yaitu *syngenetic* dan *epigenetic*. *Syngenetic (primary)* umumnya mempunyai ukuran butir lebih kecil dari mineral *epigenetic* dan tersebar secara merata pada batubara.

Berdasarkan atas dari kelimpahannya, maka mineral-mineral pada batubara dapat dibedakan atas mineral utama (*major minerals*), mineral tambahan (*minor minerals*) dan mineral jejak (*trace minerals*). Mineral utama jika kadarnya >10% berat, mineral tambahan 1-10% dan mineral jejak 1% berat. Umumnya yang termasuk mineral utama adalah mineral lempung dan kuarsa sedangkan mineral minor yang umum adalah karbonat, sulfida dan sulfat.

Mineral lempung (*clay*) merupakan kelompok yang paling dominan dijumpai pada batubara, sekitar 60-80% dari total mineral *matter*. *Spesies* mineral lempung umum terdapat dalam batubara adalah kaolinit, illit, dan montmorilonit. Kuarsa (SiO_2) adalah salah satu mineral oksida yang paling penting terdapat dalam batubara. Ada

dua tipe dari kuarsa yang dapat dibedakan berdasarkan dari pada teksturnya yaitu butiran kuarsa klastik berbentuk bulat jika terendapkan melalui media air dan berbentuk menyudut jika melalui media angin. Kuarsa dalam batubara ini kebanyakan merupakan silika yang terlarut dari hasil pelapukan felspar dan mika. Kuarsa merupakan mineral *syngenetic* dan jarang ditemukan sebagai *epigenetic*.

Terdapat 4 (empat) spesies mineral karbonat yang biasa ditemukan dalam batubara yaitu kalsit (CaCO_3), siderit (FeCO_3), dolomit (Ca, Mg CO_3) dan ankerit (CaMgFe CO_3). Pirit dan markasit merupakan mineral sulfida yang paling umum terdapat pada batubara. Dua spesies mineral ini memiliki komposisi kimia yang sama (FeS_2) hanya berbeda dalam bentuk kristalnya. Pirit berbentuk kubik dan markasit berbentuk ortorombik.

Mineral sulfat yang paling dominan terdapat pada batubara adalah bassanit dan gipsum. Umumnya mineral ini terbentuk dari hasil oksidasi mineral sulfida (pirit) pada batubara terutama bila berhubungan dengan udara luar dalam waktu lama (Nursanto dkk., 2011).

2.3 Analisis Kualitas Batubara

Kualitas batubara pada dasarnya berarti sifat kimia dan fisik dari batubara yang mempengaruhi potensi penggunaannya. Hal ini penting untuk memiliki pemahaman tentang sifat kimia dan fisik batubara, terutama sifat-sifat yang akan menentukan apakah batubara dapat digunakan secara komersial. Batubara harus memiliki kualitas tertentu untuk penggunaan yang dipilih, harus memenuhi persyaratan tersebut, maka batubara bisa ditambang dan dijual sebagai produk murni atau, jika kualitas dapat ditingkatkan, maka mereka dapat dicampur dengan batubara terpilih lainnya untuk mencapai produk yang dapat dijual (Thomas, 2013).

Analisis batubara sering dilaporkan sebagai analisis proksimat atau analisis *ultimate*. Analisis proksimat adalah analisis umum yang menentukan jumlah *moisture* (kadar air), *volatile matter* (zat terbang), *fixed carbon* (karbon tetap) dan *ash* (abu). Ini adalah yang paling mendasar dari analisis batubara dan sangat penting dalam penggunaan batubara. Tes sangat bergantung pada prosedur yang digunakan dan hasil yang berbeda diperoleh dari perbedaan waktu dan temperatur. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui prosedur yang digunakan (Thomas, 2013).

2.3.1 Analisis Proksimat

2.3.1.1 *Moisture*

Kadar air batubara akan berubah tergantung pada kelembapan relatif dari atmosfer yang terkena. Setiap perubahan dalam kelembapan akan tercermin sebagai perubahan dalam kadar air batubara. Oleh karena itu, penting bahwa kelembapan dalam sampel analisis ditentukan pada saat yang sama dengan tes lain dilakukan, untuk menghindari kesalahan hasil yang disebabkan oleh fluktuasi kondisi kelembapan laboratorium (Osborne, 2013).

Kandungan air dalam batubara dapat berbentuk kandungan air internal (air senyawa/unsur), yaitu air yang terikat secara kimiawi. Jenis air ini sulit untuk dilepaskan/dihilangkan tetapi dapat dikurangi dengan cara memperkecil ukuran butir batubara. Jenis air yang kedua adalah air eksternal (air mekanikal) yaitu air yang menempel pada permukaan butir batubara. Makin halus butir batubara, makin luas jumlah permukaan butir secara keseluruhan, sehingga makin banyak pula air yang menempel. Satu hal yang menguntungkan bahwa batubara mempunyai sifat hidrofobik, artinya apabila batubara telah dikeringkan, maka batubara tersebut sulit

menyerap air sehingga tidak akan menambah jumlah air internal. Selama proses penimbunan di *stockpile* akan timbul panas yang mampu menguapkan air mekanikal yang menempel pada permukaan butir (Sukandarrumidi, 2006).

Istilah yang digunakan dalam kadar air batubara dapat membingungkan dan perlu diklarifikasi. Istilah yang paling membingungkan adalah *inherent moisture*, yang memiliki banyak definisi yang berbeda dan harus dihindari jika memungkinkan. Oleh karena itu, industri batubara telah mengembangkan berikut seperangkat definisi yang ditentukan secara empiris (Thomas, 2013).

Berikut ini istilah yang digunakan dalam kadar air batubara (Thomas, 2013):

- 1) *Surface Moisture*. Ini adalah kelembaban adventif, tidak secara alami pada batubara dan yang dapat dihilangkan pada udara pengeringan suhu rendah (40°C). Tahap pengeringan ini biasanya yang pertama dalam analisis apapun dan kelembaban yang tersisa setelah langkah ini dikenal sebagai *air dried moisture*.
- 2) *As Received or As Delivered Moisture*. Ini adalah total *moisture* dari sampel batubara saat diterima atau dikirim ke laboratorium.
- 3) *Total Moisture*. Ini adalah semua kelembaban yang dapat dihilangkan oleh *aggressive drying* pada suhu 150°C dalam ruang hampa atau atmosfer nitrogen.
- 4) *Air-Dried Moisture*. Ini adalah kelembaban yang tersisa setelah *air drying* dan yang dapat dihilangkan oleh *aggressive drying*.

Rumus yang digunakan dalam penentuan kadar air pada analisis proksimat batubara:

$$\% \text{ Moisture} = \frac{A-B}{A} \times 100\% \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

A = Berat sampel yang digunakan (g)

B = Berat sampel setelah pemanasan (g)

2.3.1.2 Ash

Komposisi batubara bersifat heterogen, terdiri dari unsur organik (berasal dari tumbuh tumbuhan) dan senyawa anorganik, yang merupakan hasil rombakan batuan yang ada di sekitarnya, bercampur selama proses transportasi, sedimentasi, dan proses pembatubaraan (*coalification*). Apabila batubara dibakar, senyawa anorganik yang ada diubah menjadi senyawa oksida yang berukuran butir halus dalam bentuk abu. Abu hasil pembakaran batubara ini yang dikenal sebagai *ash content* (kandungan abu). Abu ini merupakan kumpulan dari bahan-bahan pembentuk batubara yang tidak dapat terbakar (*non combustible materials*), atau yang dioksidasi oleh oksigen. Bahan sisa dalam bentuk padatan ini antara lain senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Mn_3O_4 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , SO_3 dan oksida unsur lain (Sukandarrumidi, 2006).

Abu batubara adalah residu anorganik yang tetap setelah pembakaran. Harus diingat bahwa penentuan kadar abu tidak setara dengan kandungan bahan mineral batubara. Sebagian besar bahan mineral dalam batubara setelah kehilangan komponen volatile seperti CO_2 , SO_2 , dan H_2O , yang telah keluar dari senyawa mineral karbonat, sulfida dan *clay*. Dalam batubara, kandungan abu yang tinggi secara efektif akan mengurangi nilai kalorinya. Direkomendasikan kadar abu maksimum untuk uap batubara untuk digunakan sebagai bahan bakar dihaluskan sekitar 20% (*air-dried*) (Thomas, 2013).

Ash adalah yang paling mendasar dari parameter kualitas batubara dan sangat penting dalam menentukan penggunaan akhir batubara. Prosedur standar untuk menentukan nilai abu untuk batubara melibatkan pemanasan sampel dengan massa (biasanya 1 gram) dalam sebuah wadah pada suhu 500°C selama 30 menit, menjaga sampel pada suhu ini selama 30 menit, sebelum pemanasan 815°C sampai massa sampel konstan (Osborne, 2013).

Rumus yang digunakan dalam penentuan kadar abu pada analisis proksimat batubara:

$$\%Ash = \frac{A-B}{C} \times 100\% \dots\dots\dots(2.2)$$

2.3.1.3 Volatile matter

Kandungan *volatile matter*, berkaitan dengan proses pematubaraan. Akibat adanya *overburden pressure*, kandungan air dalam batubara akan berkurang, sebaliknya semakin mengecilnya kandungan air, *calorific value* akan meningkat. Pada saat yang bersamaan batubara akan mengalami proses *devolatisation*. Semua sisa oksigen, hidrogen, sulfur, nitrogen berkurang sehingga kandungan *volatile matter* mengecil. Kandungan *volatile matter*, mempengaruhi kesempurnaan pembakaran dan intensitas nyala api. Kesempurnaan pembakaran ditentukan oleh nilai *fixes carbon*. Semakin tinggi nilai *fuel ration*, maka karbon yang tidak terbakar semakin banyak (Sukandarrumidi, 2006).

Zat terbang (VM) adalah persentase peurunan massa, disesuaikan dengan kelembapan, ketika batubara dipanaskan dari kontak dengan udara dibawah kondisi standar. Dalam tes, satu gram sampel ditempatkan dalam wadah tertutup (untuk mencegah masuknya udara), yang ditempatkan dalam *furnace* pada suhu 900°C selama 7 menit atau 950°C jika menggunakan metode ASTM. VM dihitung dari hilangnya massa dari sampel analisis setelah pengurangan massa karena *moisture*. Reprodutifitas untuk VM adalah ±0,5% (ISO 562) (Osborne, 2013).

Volatile matter adalah parameter penting untuk penggunaan akhir batubara. Aturan umum adalah bahwa penurunan VM dan rasio bahan bakar (*fuel ratio = fixed carbon/VM*) maingkat, batubara menjadi lebih sulit menyala dan membakar lebih lambat. Kandungan VM sering digunakan sebagai indikator kemudahan dari pembakaran batubara (Osborne, 2013).

Rumus yang digunakan dalam penentuan *volatile matter* (zat terbang) pada analisis proksimat batubara:

$$\%Weight\ Ioss = \frac{A-B}{A} \times 100\% \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\%VM = C - D \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

A = Berat sampel (g) B = Berat sampel setelah pemanasan (g)

C = % *Weight loss* D = % *Moisture*

2.3.1.4 *Fixed carbon*

Kandungan karbon tertambat (*fixed carbon*) adalah karbon yang ditemukan di residu yang tersisa setelah *volatile matter* telah dibebaskan. *Fixed carbon* tidak ditentukan secara langsung, tetapi perbedaannya adalah dalam batubara *air-dried* antara total persentase komponen lain, yaitu *moisture*, *ash*, VM dari 100% (Thomas, 2013).

Fixed carbon didefinisikan sebagai material yang tersisa, setelah berkurangnya *moisture*, *volatile matter*, dan *ash*. Karbon tertambat dihitung dengan mengurangi persentase kadar air, abu, dan VM dari 100% (Osborne, 2013).

Rumus yang digunakan dalam penentuan *fixed carbon* (karbon tertambat) pada analisis proksimat batubara:

$$\% \text{ Fixed Carbon } 100 - (\% \text{Moisture} - \% \text{Ash} - \% \text{VM}) \dots\dots\dots(2.5)$$

2.3.1.5 Total Sulfur

Sulfur merupakan unsur alami dalam batubara. Timbulnya sulfur dalam batubara terkait dengan proses pengendapan selama pembentukan lapisan batubara. Proses ini mungkin termasuk jenis tanaman yang mengendap, apakah pengendapan terjadi di lingkungan air tawar atau air asin, setiap aktivitas bakteri dan jenis sedimen yang diendapkan (Osborne, 2013).

Belerang yang terdapat dalam batubara dibedakan menjadi dua yaitu dalam bentuk senyawa anorganik dan senyawa organik. Belerang dalam bentuk senyawa anorganik dapat dijumpai dalam bentuk mineral pirit (FeS₂ bentuk kristal kubus),

markasit (FeS_2 bentuk kristal orthombik) atau dalam bentuk sulfat. Mineral Pirit dan markasit sangat umum terbentuk pada kondisi sedimentasi rawa (reduktif). Belerang organik terbentuk selama terjadinya proses *coalification* (Sukandarrumidi, 2006).

Untuk analisis laboratorium, sampel batubara dibakar pada suhu 1350°C dalam aliran oksigen. Benda uji dipanaskan dalam tungku tabung dalam aliran oksigen untuk mengoksidasi sulfur menjadi sulfur dioksida. Aliran gas yang mengandung sulfur dioksida dilewatkan melalui sel dimana ia diukur pada tepat panjang gelombang dengan detektor serpat inframerah (Osborne, 2013).

Sulfur umumnya dianggap terjadi dalam tiga bentuk batubara yaitu sulfat sulfur, belerang sulfida (pirit sulfur), dan sulfur organik (Osborne, 2013). Mineral sulfat, biasanya besi hidrous atau kalsium sulfat, yang dihasilkan oleh oksidasi fraksi sulfida dari batubara. Pirit sulfur hadir sebagai mineral sulfida pada batubara, terutama besi pirit. Sulfur organik, yang hadir dalam senyawa organik batubara (Thomas, 2013).

2.3.1.6 *Calorific value*

Massa batubara yang diketahui dibakar dalam oksigen bertekanan tinggi dalam kalorimeter isoperibol dalam kondisi standar. Berat nilai kalor (GCV) dihitung dari kenaikan suhu air sekitar bejana dalam kalorimeter dan rata-rata kapasitas panas yang efektif dari sistem. Panas yang dilepaskan oleh kawat pembakaran digunakan untuk menyalakan batubara, koreksi termokimia, dan untuk transfer panas antara kalorimeter dan sekitarnya (Osborne, 2013).

Nilai kalori (CV) batubara adalah jumlah panas per unit massa batubara saat dibakar. Nilai kalori sering disebut sebagai energi spesifik (SE), khususnya di Australia. CV batubara dinyatakan dalam dua cara (Thomas, 2013):

1. *Gross* kalori atau nilai kalor yang lebih tinggi adalah jumlah panas yang dibebaskan selama pengujian di laboratorium, ketika batubara dibakar di

bawah kondisi standar pada volume konstan, sehingga semua air dalam produk tetap dalam bentuk cair.

2. Kalor bersih atau nilai kalor yang lebih rendah. Selama pembakaran yang sebenarnya di tungku, nilai gross kalori tidak pernah tercapai karena beberapa produk, seperti air hilang dengan yang terpendam terkait dari penguapan. Nilai kalori maksimum diacapai di bawah kondisi ini adalah nilai kalor bersih pada tekanan konstan. Hal ini dapat dihitung dan dinyatakan dalam joule mutlak, kalori per gram atau Btu/lb. Persamaan yang disederhanakan untuk ini adalah sebagai berikut:

$$\text{Net CV} = \text{gross CV} - 0,212H - 0,024M \text{ (MJ kg}^{-1}\text{)} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\text{Net CV} = \text{gross CV} - 50,7H - 5,83M \text{ (Kcal kg}^{-1}\text{)} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\text{Net CV} = \text{gross CV} - 91,2H - 10,5M \text{ (Btu lb}^{-1}\text{)} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

H = Hidrogen (%); M = *Moisture* (%)

2.4 Proses Penurunan Kadar Abu dan Sulfur Batubara

Sulfur merupakan salah satu komponen yang ada pada batubara, yang terdapat sebagai sulfur organik dan anorganik. Secara umum, komponen sulfur dalam batubara terdapat sebagai sulfur *syngenetik* yang erat hubungannya dengan proses fisika dan kimia selama proses penggabutan serta dapat juga sebagai sulfur *epygenetik* yang dapat diamati sebagai pirit pengisi *cleat* pada batubara akibat proses presipitasi kimia pada akhir proses pematubaraan (Speight, 2005).

Sulfur pada batubara dibedakan dalam dua jenis, yaitu sulfur anorganik dan sulfur organik. Sulfur anorganik terdiri dari sulfur sulfat dan besi disulfida. Walaupun demikian kadar sulfur dalam batubara pada umumnya sangat rendah dan tetap tertinggal di dalam abu (*ash*) selama pembakaran. Sulfur sulfat tidak akan terlibat

dalam pembentukan oksida sulfur yang merupakan salah satu bahan polusi udara. Besi disulfida (*iron disulfide*) dibedakan menjadi 2 yaitu pirit dan markasit, keduanya mempunyai rumus kimia FeS_2 (Sukandarrumidi, 2006).

Sulfur dalam bentuk senyawa anorganik dapat dijumpai dalam bentuk mineral pirit (FeS_2 bentuk kristal kubus), markasit (FeS_2 bentuk kristal ortorombik) atau dalam bentuk sulfat. Mineral pirit dan markasit sangat umum terbentuk pada kondisi sedimentasi rawa (reduktif). Sulfur organik terbentuk selama terjadinya proses *coalification*. Sulfur organik yang terdapat dalam batubara dapat dioksidasi membentuk sulfat. Keberadaan sulfur dalam batubara akan berpengaruh terhadap tingkat korosi sisi luar yang terjadi pada elemen pemanas udara, juga berpengaruh terhadap peralatan penangkapan abu. Adanya kandungan sulfur, baik dalam bentuk senyawa anorganik maupun organik di atmosfer dipicu oleh keberadaan air hujan, mengakibatkan terbentuknya air asam (dalam dunia pertambangan batubara dikenal sebagai air asam tambang, dengan $\text{pH} < 7$). Keberadaan sulfur pada abu terbang yang terlepas di atmosfer, dapat mengakibatkan hujan asam (Sukandarrumidi, 2006).

Pembakaran batubara pada akhirnya akan meninggalkan abu. Abu dari hasil pembakaran ini ada tiga jenis yaitu abu terbang (*fly ash*), abu tertinggal (*bottom ash*) dan abu tertinggal di ketel uap sebagai pengotor (*boiler slag*). Terdapat sejumlah elemen yang berpotensi menjadi racun yang ditemukan pada abu terbang. Kadar abu pada batubara berkisar antara 5% sampai dengan 30% (Nukman dkk., 2006).

Abu dan sulfur merupakan elemen-elemen *impurities* (kotoran pengganggu), disamping kotoran lainnya seperti tanah, batuan, mineral, dan lain-lain. Sebagai salah satu parameter kualitas batubara, sulfur menjadi perhatian dari banyak pihak. Kandungan sulfur dalam batubara apabila dibakar akan berubah menjadi oksida sulfur. Senyawa ini dapat bereaksi dengan uap air di udara sehingga membentuk H_2SO_3 (asam sulfit) dan H_2SO_4 (asam sulfat). Bila kedua asam tersebut terkondensasi di

udara dan kemudian jatuh bersama-sama dengan air hujan, maka terjadilah hujan asam. Pelepasan oksida sulfur dari pembakaran batubara dapat menimbulkan hujan asam sampai sejauh ratusan kilometer (Nukman dkk., 2006).

Sulfur merupakan bahan yang stabil dalam senyawa organik batubara dan sering disebut sulfur organik yang tersebar secara merata ke seluruh batubara. Sulfur dalam jumlah sangat kecil dapat terbentuk sebagai sulfat seperti kalsium sulfat atau besi sulfat. Kadar sulfur dalam batubara bervariasi mulai dari jumlah yang sangat kecil (*traces*) sampai lebih dari 4% (Nukman dkk., 2006). Abu dan sulfur pada batubara dapat dikurangi kadarnya dengan cara *deashing* dan desulfurisasi dengan menggunakan pelarut kimia.

Desulfurisasi batubara dapat dicapai dengan metode fisika, biologi, dan kimia. Efektifitas dari metode yang berbeda tergantung tujuan pada struktur dan komposisi mineral dan asosiasi mereka dalam batubara. Metode fisika didasarkan pada perbedaan sifat fisik dari mineral dan bagian karbon dari batubara. Metode kimia melibatkan pengolahan dengan bahan kimia yang berbeda yang efektif untuk menghilangkan pengotornya yang tersebar halus dan terikat kuat pada batubara (Mukherjee dkk., 2003).

Proses fisika adalah metode yang efektif biaya namun tidak efektif dalam pemisahan mineral yang terdispersi halus dan yang terikat pada struktur batubara. Namun, metode kimia dikenal sebagai solusi untuk mendapatkan batubara desulfurisasi bersih, yang melibatkan pelarutan unsur anorganik di berbagai pelarut. Sulfur hadir dalam batubara dalam bentuk piritik, organik, dan sulfat. Kandungan sulfur organik dan piritik sulfur hampir seimbang di banyak batubara dan bentuk sulfat biasanya sangat kecil. Piritik sulfur mengacu pada disulfida besi dan biasanya dihilangkan dengan metode pemisahan fisik seperti flotasi buih dan pemisahan gravitasi. Sampai 50% sulfur anorganik dapat dihilangkan dengan proses flotasi buih.

Leaching adalah salah satu metode yang paling umum digunakan untuk desulfurisasi batubara. Batubara dicampur dengan asam atau alkali dan sulfurnya diekstraksi saat dipanaskan dan diaduk (Saleem dkk., 2007).

Pembakaran batubara berkadar sulfur tinggi menghasilkan SO_2 yang beracun dan korosif. Sulfur dioksida kemudian dikonversi menjadi SO_3 , yang kontak dengan bentuk air asam belerang. Di batubara lapuk, air asam tambang merembes ke dalam tanah dan membuat air tanah sangat asam. SO_3 menyebabkan pembentukan hujan asam dan korosi *boiler*, pipa bawah tanah, insulasi logam, mesin tambang, dll (Mukherjee dkk., 2001).

Abu batubara menurunkan efisiensi pembakaran *boiler* dan menyebabkan efek kerusakan lainnya. Penangan abu dan pembuangan abu juga menjadi masalah. Oleh karena itu, perlu menghilangkan pengotor dan sulfur dari batubara sebelum pemanfaatan (Mukherjee dkk., 2001).

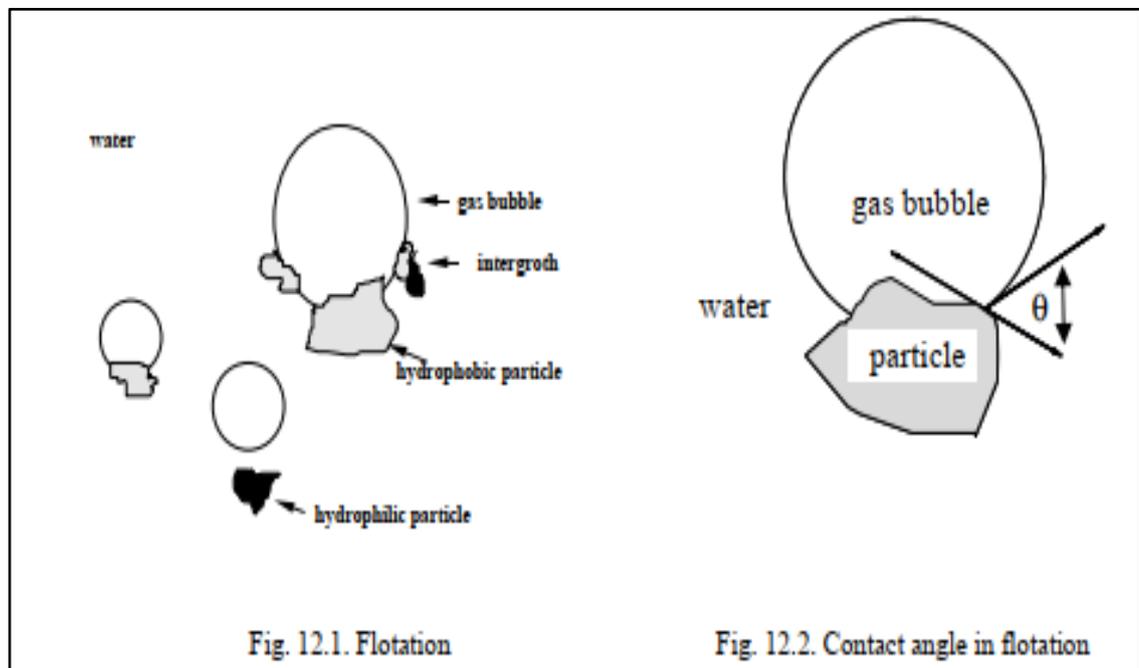
Penggunaan batubara sebagai sumber energi bersih adalah kepentingan di banyak negara, meskipun sebagian besar batubara peringkat rendah dengan abu yang tinggi, kelembapan dan kandungan sulfur. Penghilangan belerang dari batubara batubara ini menjadi lebih penting. Hujan asam yang dihasilkan dari SO_2 memiliki efek yang merugikan pada pertanian dan menghancurkan keseimbangan ekologi (Ratanakandilok dkk., 2001).

Metode fisika hanya mampu menghilangkan sebagian besar pirit. Proses ini dilakukan dengan biaya yang efektif, tetapi mungkin tidak efektif dalam memisahkan mineral halus yang tersebar dan yang terikat kuat pada struktur batubara. Teknik biologi, memakan waktu dengan beberapa mikroba khusus yang hanya mampu menghilangkan beberapa jenis bentuk sulfur. Teknik desulfurisasi batubara yang paling efektif adalah berdasarkan metode kimia dimana hampir semua sulfur pirit, *ash*, dan jumlah besar dari sulfur organik dapat dihilangkan dari batubara (Meshram, 2015).

2.5 Flotasi Batubara

2.5.1 Pengertian flotasi

Flotasi adalah salah satu dari banyak metode pemisahan dan dapat digunakan untuk pemisahan fase, misalnya untuk menghilangkan partikel padat atau tetes minyak dari air dari Gambar 2.3. Flotasi digunakan untuk pemisahan partikel yang memiliki hidrofobitas yang berbeda. Hidrofobitas adalah sifat bahan yang mengkarakterisasi kemampuannya untuk dibasahi dengan cairan masuk karena adanya fase gas.



Gambar 2.3 Proses flotasi (Drzymala, 2007)

Padatan yang mudah dibasahi dengan air disebut hidrofilik, sedangkan padatan dengan afinitas terbatas untuk pembasahan disebut hidrofobik. Sebagai hasil dari hidrofobik, partikel melekat pada gelembung gas dan bergerak ke atas menuju permukaan air. Sedangkan partikel hidrofilik tidak melekat pada gelembung dan jatuh ke bawah tangki pengapungan. Sifat hidrofobik dari suatu zat ditentukan oleh derajat atau sudut kontak partikel dengan gelembung udara. Sudut kontak ditentukan dengan menarik garis lurus antar partikel dan gelembung udara. Umumnya, sudut kontak

diukur sebagai sudut antara fase gas dan padat, melalui fase air. Sudut kontak dapat juga didefinisikan sebagai sudut antara padat dan fase cair, melalui fase gas. Sudut kontak untuk bahan hidrofilik adalah nol, sedangkan untuk zat hidrofobik lebih dari nol. Nilai maksimum sudut kontak untuk material yang bersentuhan dengan air dan udara sekitar 110° (parafin, teflon). Tabel 2.1 berikut menyajikan sudut kontak untuk bahan yang diukur dengan flotometri (Drzymala, 2007).

Tabel 2.1 Sudut kontak didasarkan pada pengukuran flotometrik yang dinyatakan dalam derajat (Drzymala, 2007)

Strongly hydrophobic*		hydrophobic		weakly hydrophobic		hydrophilic**
Material	θ	Material	θ	Material	θ	$\theta = 0$
<i>Paraffin</i> <i>C_nH_{2n+2}</i>	90+	<i>sulfides</i>	44–0	<i>fluorite,</i> <i>CaF₂</i>	10–13	<i>CaSO gypsum</i> <i>4·2H₂O</i>
<i>Teflon, C₂F₄</i>	90+	<i>silicon</i> <i>carbide SiC</i>	27.6	<i>arsenic,</i> <i>As₂O₃</i>	9.3	<i>ferrosilicon</i>
<i>Sulfur, S</i>	63.2	<i>coal</i>	26–0	<i>perovskite,</i> <i>CaTiO₃</i>	9	<i>dolomite</i> <i>CaMg(CO₃)₂</i>
<i>Mercury, Hg</i>	45.6	<i>indium, In</i>	25	<i>scheelite,</i> <i>CaWO₄</i>	9	<i>magnetite</i> <i>Fe₃O₄</i>
<i>Germanium, Ge</i>	39.7	<i>iodargyrite,</i> <i>AgI</i>	23.5	<i>diamond, C</i>	7.9	<i>halite, NaCl</i>
<i>Silicon, Si</i>	35.4	<i>cassiterite,</i> <i>SnO₂</i>	22–	<i>tin, Sn</i>	7.5	<i>brown coal</i>
<i>Talc</i>	35.2	<i>silver, Ag</i>	14	<i>boric acid,</i> <i>H₃BO₃</i>	64	<i>kaolinite</i>
<i>ilmenite, Fe</i>	14	<i>graphite, C</i>	6.2+	<i>hematite,</i> <i>Fe₂O₃</i>		
<i>molybdenite,</i> <i>MoS₂</i>	5.9+	<i>PbJ₂</i>	6	<i>quartz,</i> <i>SiO₂</i>		
<i>gold, Au</i>	5	<i>calcite,</i> <i>CaCO₃</i>				
<i>barite, BaSO₄</i>	5	<i>anhydrite,</i> <i>CaSO₄</i>				

<i>corundum, Al₂O₃</i>	4	<i>bones</i>
<i>HgO</i>	3,3	<i>tourmaline</i>
<i>copper, Cu</i>	3	<i>iron, Fe</i>
<i>amber</i>		
<i>ice</i>		

* Metode flotometrik mampu mengukur sudut kontak yang lebih kecil dari 90°.

** Bahan hidrofilik lainnya: kromit, perunggu, *smithsonite*, azurit, rutil, zirkon, mika.

Sudut kontak diukur pada pelat poles yang terbuat dari mineral hidrofobik alami biasanya lebih tinggi daripada flotometrik. Perbedaan sudut kontak pada beberapa bahan ditunjukkan pada Tabel 2.2. Sejumlah pengukuran sudut kontak menunjukkan bahwa sebagian besar mineral bersifat hidrofilik. Bahan hidrofilik dapat dibuat hidrofobik dengan reagen yang sesuai. Bahan hidrofobik yang dibuat secara artifisial memiliki sifat permukaan yang mirip dengan zat hidrofobik alami.

Tabel 2.2 Sudut kontak beberapa bahan (Drzymala, 2007)

<i>Substance</i>	<i>Advancing contact angle</i>	<i>Substance</i>	<i>Advancing contact angle</i>
<i>Teflon</i>	112	<i>sulfur</i>	86
<i>Paraffin</i>	110	<i>graphite</i>	86
<i>Polystyrene</i>	103	<i>stibnite (Sb₂S₃)</i>	84
<i>Human skin</i>	90	<i>iodargyrite (AgI)</i>	17
<i>Naphthalene</i>	88	<i>calcite (CaCO₃)</i>	~0
<i>Stearic acid</i>	80	<i>G</i>	

Metode paling sederhana untuk penentuan sudut kontak bergantung pada pengukuran langsung dari sudut pelekatan gelembung ke permukaan mineral yang direndam dalam air. Metode ini disebut metode *captive bubble* dapat dilihat pada Gambar 2.4. Ketika menggunakan metode ini, penting untuk gelembung udara untuk tidak menempel pada tepi partikel karena kedua zat bersifat hidrofobik yang berbeda kekuatan tepi sehingga dapat menyebabkan distorsi. Selain itu, untuk menghindari histeresis sudut kontak akibat kekasaran permukaan, permukaan harus dipoles.

Terjadinya histeresis sudut kontak dapat dideteksi ketika sudut kontak diukur melalui fase air (Drzymala, 2007).

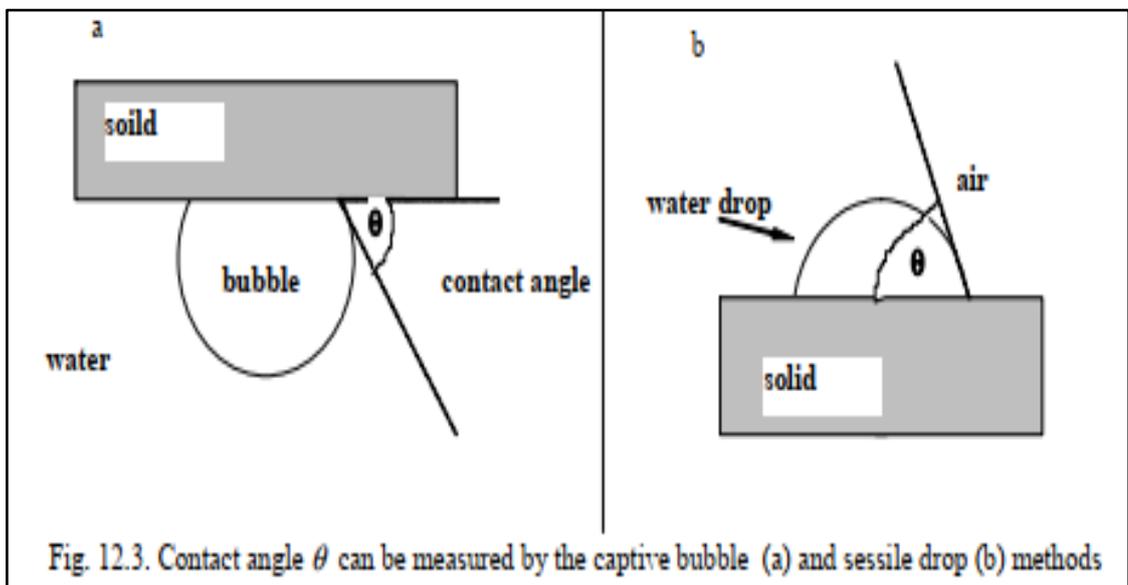
Sudut kontak juga dapat diukur dengan menggunakan metode *sessile drop* sudut kontak *drop sessile* biasanya tidak sesuai dengan hasil yang diperoleh pada prosedur gelembung *captive*. Sudut kontak tidak hanya tergantung pada metode pengukuran, fisik, atau heterogenitas kimiawi permukaan, tetapi juga pada parameter seperti *drop* dan ukuran gelembung. Nilai sudut kontak juga dapat dipengaruhi tegangan garis yang merupakan analog dari tegangan permukaan. Ada banyak teori yang membahas mengenai sudut kontak dengan sifat-sifatnya sistem multi-fase. Prinsipnya adalah rumus Young (1805) yang berkorelasi sudut kontak dengan energi antarmuka (γ) sistem tiga fase termasuk padat (s), gas (g), dan cairan (c) (Drzymala, 2007).

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sc} + \gamma_{cg} \cos \theta \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

θ = sudut kontak ekuilibrium

$\gamma_{sg}, \gamma_{sc}, \gamma_{cg}$ = energi antarmuka untuk fase gas-padat, cairan padat, dan gas cair batas, masing-masing.



Gambar 2.4 Sudut kontak pada proses flotasi (Drzymala, 2007)

2.5.2 Jenis-jenis flotasi

Adapun jenis-jenis dari flotasi ada 3 antara lain (Allis, 2015):

1. *Air flotation*

Udara akan masuk ke dalam fluida dengan menggunakan mekanisme rotor. Rotor yang terendam dalam fluida akan mendorong udara menuju bukan disperser sehingga udara bercampur dengan air sehingga partikel yang mengapung dapat disisihkan. Sistem ini memiliki keuntungan antara lain tidak memerlukan area yang luas dan lebih efektif dalam menyisihkan partikel minyak.

2. *Vacum flotation*

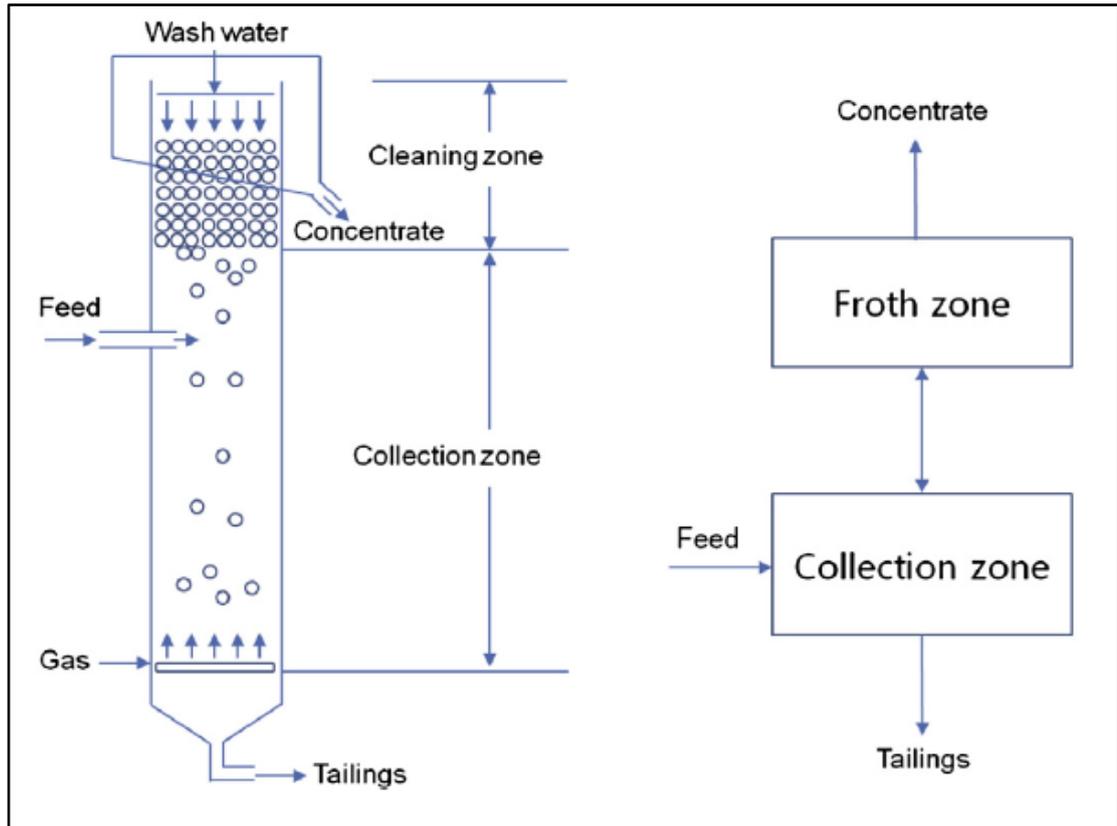
Limbah cair diaerasi hingga jenuh sehingga akan terbentuk gelembung udara yang akan lolos ke atmosfer dengan mengangkat partikel-partikel ke atas. Secara garis besar flotasi merupakan proses pemisahan suatu zat yang ada di dalam zat cair (fluida) maupun gas dengan prinsip pengapungan. Zat yang akan dihilangkan berada di atas (hidrofobik) sedangkan fluidanya berada di bawah (hidrofilik).

3. *Dissolved air flotation (DAF)*

Udara dilarutkan di dalam air buangan di bawah tekanan beberapa atmosfer sampai jenuh ke tekanan atmosfer. Akibat terjadinya perubahan tekanan maka udara yang terlarut akan lepas kembali dalam bentuk gelembung-gelembung udara yang sangat halus. Metode *dissolved air flotation* (DAF) telah digunakan secara luas untuk pengolahan air limbah industri, karena efisien untuk pemisahan padat-cair pada material dengan *specific gravity* yang <1 atau tinggi.

4. *Column Flotation*

Dalam flotasi batubara kasar, kolektivitas adalah perhatian utama sedangkan dalam flotasi batubara *ultrafine*, selektivitas adalah yang utama. Karena massa dan momennya yang kecil, partikel halus dapat diangkut ke buih dengan cara *entrainment* di dalam cairan, atau dengan jebakan mekanis oleh partikel mengambang. Efek yang dihasilkan dari *entrainment* ini adalah untuk meningkatkan kadar abu dari produk batubara bersih. Untuk mengatasi keterbatasan fisik ini, sejumlah solusi potensial telah ditemukan dan desain flotasi kolom adalah salah satunya. Teknik flotasi kolom menggunakan prinsip aliran air cucian berlawanan arah untuk pemisahan yang lebih baik terutama ketika beroperasi pada material halus. Flotasi kolom merupakan bentuk paling sederhana dari mesin flotasi tipe pneumatik. Terdiri dari kolom silindris tinggi yang memiliki rasio tinggi terhadap diameter lebih dari 10. *Pulp* umpan yang dikondisikan dengan reagen dimasukkan ke dalam bagian atas, biasanya sampai kedalaman 1/3 sampai 1/5 dari tinggi total kolom dan *tailing* flotasi dibuang di bagian bawah kolom. Udara bertekanan dimasukkan ke dalam sparger (atau diffuser atau aerator) di bagian bawah kolom sehingga gelembung udara dihasilkan dan bergerak ke atas berlawanan dengan arah aliran *slurry* ke bawah. Partikel batubara melekat pada bagian pengayaan bawah, juga disebut bagian pemulihan, kolom antara titik umpan dan saluran masuk udara yang dikenal sebagai zona pengumpulan atau zona flotasi. Partikel batubara yang menempel pada gelembung udara diangkut ke bagian atas kolom, yang disebut bagian pencucian, juga disebut zona pembersihan atau zona buih (Rao, 2016). Dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Mekanisme kerja flotasi kolom (Han *et. all.*, 2014)

2.5.3 Prinsip flotasi

Flotasi adalah suatu proses dimana padatan, cairan, atau zat terlarut dibawa ke permukaan larutan dengan penggunaan gelembung udara. Prinsip flotasi antara lain (Allis, 2015):

1. Penempelan partikel (mineral) pada gelembung udara.
2. Gelembung mineral harus stabil.
3. Ada sifat *float* dan *sink*.

Beberapa jenis partikel yang tercampur dapat dipisahkan salah satu jenisnya dari campurannya atau bila memungkinkan dan dapat terpisah keseluruhan jenis sehingga dapat terkonsentrasi dari tiap-tiap jenis. Pemisahan dari partikel-partikel dalam flotasi ini ditunjukkan oleh penentuan kontak antara tiga fasa yaitu fasa partikel padat yang akan diapungkan, larutan *aqua electrolit*, dan gas (biasanya dipakai udara) hampir semua zat anorganik dapat dibasahi oleh fasa *aqua*. Oleh karena itu, langkah

pertama dalam flotasi adalah menggantikan sebagian dari antar fasa padat-cair menjadi antara fasa padat-gas. Hasil yang diperoleh adalah permukaan partikel akan menjadi hidrofobik (Allis, 2015).

2.5.4 Persyaratan yang harus dipenuhi dalam flotasi

Proses flotasi memiliki persyaratan yang harus dipenuhi, diantaranya adalah sebagai berikut (Allis, 2015):

1. Diameter partikel harus disesuaikan dengan butiran mineral.
2. Persen *solid* yang baik 25%-45% (*pryor*), 15%-30% (*gaudin*).
3. Sudut kontak yang baik sekitar 60°- 90°.
4. pH Kritis, pH kritis merupakan pH larutan yang memengaruhi konsentrasi *collector* yang digunakan dalam pengapungan mineral.

2.5.5 Faktor yang Memengaruhi Flotasi Batubara

Flotasi batubara dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor tersebut diuraikan sebagai berikut.

2.5.5.1 Faktor-faktor yang memengaruhi flotasi

Faktor-faktor yang memengaruhi flotasi adalah sebagai berikut (Wills, 2005):

1. Ukuran partikel, ukuran partikel yang besar membuat partikel tersebut cenderung untuk mengendap, sehingga susah untuk terflotasi.
2. pH larutan, partikel cenderung mudah mengendap pada pH yang tinggi, sehingga dia lebih susah terflotasi.
3. Surfaktan, fungsi surfaktan adalah *collector* yang merupakan reagen yang memiliki gugus polar dan gugus nonpolar sekaligus. *Collector* akan mengubah sifat partikel hidrophil menjadi hidrofob.
4. Bahan kimia lainnya misalnya koagulan, penambahan koagulan dapat mengakibatkan ukuran partikel menjadi lebih kecil.

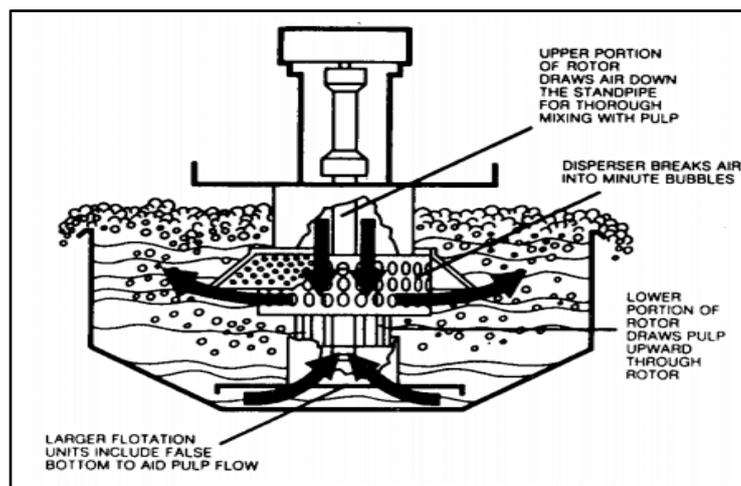
5. Laju udara, laju udara berfungsi sebagai pengikat partikel yang memiliki sifat permukaan hidrofobik, persen padatan. Flotasi pada partikel kasar dapat dilakukan dengan persen padatan yang besar demikian juga sebaliknya. Besar laju pengumpanan berpengaruh terhadap kapasitas dan waktu tinggal.
6. Ukuran gelembung udara.
7. Ketebalan lapisan buih.
8. Penambahan reagen kimia, dengan adanya perbedaan sifat permukaan hidrofobik dan hidrofilik perlu adanya suatu reagen kimia untuk mengubah permukaan mineral.

2.5.5.2 Macam-macam sel flotasi

Sel flotasi berfungsi untuk menerima *pulp* dan dilakukan proses flotasi. Jenis sel mendasarkan atas pemasukan udara, adalah (Wills, 2005):

1. *Aeration cell*

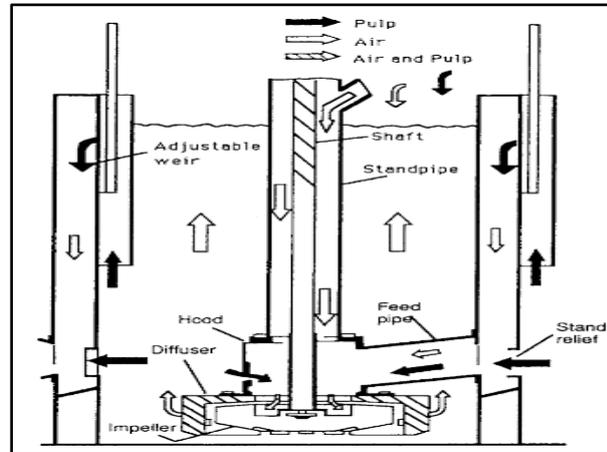
Alat ini jarang digunakan, sebab adanya perkembangan dengan ditemukannya *sub aeration cell*. Udara masuk ke dalam *cell* flotasi karena putaran pengaduk, dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Aeration cell* (Gill, 1921)

2. *Sub aeration cell*

Pada alat ini udara masuk akibat hisapan putaran pengaduk. Alat ini paling praktis sehingga banyak digunakan, dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Sub aeration cell* (Gill, 1921)

BAB III

METODE PENELITIAN

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian meliputi persiapan, pengambilan sampel, preparasi sampel, karakterisasi sampel, flotasi kolom, pengolahan, dan interpretasi data hingga penyusunan laporan. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian, Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.