

SKRIPSI

**STUDI DESULFURISASI BATUBARA DAERAH PALUDA,
KABUPATEN BARRU DENGAN MENGGUNAKAN
LARUTAN ASAM OKSALAT**

Disusun dan diajukan oleh:

**REGINA FRENSYA
D111 20 1034**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI DESULFURISASI BATUBARA DAERAH PALUDA, KABUPATEN BARRU DENGAN MENGGUNAKAN LARUTAN ASAM OKSALAT

Disusun dan diajukan oleh

REGINA FRENSYA
D111 20 1034

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 15 Juli 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Sufriadin, S.T., M.T.
NIP. 196608172000121001

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T.
NIP. 197010052008012026



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Regina Frensya
NIM : D111201034
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Studi Desulfurisasi Batubara Daerah Paluda, Kabupaten Barru dengan menggunakan Larutan Asam Oksalat}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, 20 Juli 2024

Yang Menyatakan


Regina Frensya



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRAK

REGINA FRENSYA. *Studi Desulfurisasi Batubara Daerah Paluda, Kabupaten Barru dengan Menggunakan Larutan Asam Oksalat (dibimbing oleh Sufriadin)*

Seiring dengan semakin terbatasnya bahan bakar minyak dan gas serta kebutuhan akan aktivitas industri yang semakin meningkat, batubara dapat digunakan sebagai energi alternatif di masa depan. Batubara merupakan salah satu sumber energi fosil yang paling banyak digunakan sebagai bahan bakar. Perkembangan penggunaan sumber daya batubara akan mengakibatkan sumber daya batubara berkualitas tinggi semakin menipis. Pemanfaatan batubara dengan kadar sulfur yang tinggi sangat beresiko terhadap lingkungan dan kerusakan alat. Penelitian ini bertujuan untuk menurunkan kandungan sulfur total pada batubara dari daerah Paluda, Kabupaten Barru dengan metode kimia menggunakan larutan asam oksalat. Pada studi ini, dilakukan pencucian dengan variabel konsentrasi 1 M, 2 M, 3 M, dan 4 M dengan waktu percobaan 2, 4, 6, dan 8 jam. Hasil analisis proksimat sampel batubara daerah Paluda menunjukkan kadar air 1,38%, kadar abu 6,99%, zat terbang 44,11%, karbon tetap 47,52%, hasil analisis sulfur total pada sampel awal 2,39%, dan nilai kalori 6.043 kal/gr. Sampel batubara yang diteliti dikategorikan sebagai batubara *rank* subbituminus A berdasarkan nilai kalorinya. Hasil analisis mikroskopis dan XRD sampel batubara daerah Paluda menunjukkan keberadaan mineral pirit, kuarsa, lempung, kalsilit dan gipsit. Hasil pencucian batubara menunjukkan kondisi maksimum yang dicapai pada penelitian ini yaitu pada percobaan dengan variabel konsentrasi asam oksalat 4 M dengan waktu reaksi selama 4 jam menghasilkan kadar sulfur total terendah sebesar 1,95% atau mengalami reduksi kadar sulfur sebesar 18,41%.

Kata Kunci: Batubara, Analisis Kualitas, Pencucian, Desulfurisasi, Asam Oksalat



ABSTRACT

REGINA FRENSYA. *Study of Coal Desulfurization in Paluda Area, Barru Regency Using Oxalic Acid Solution* (supervised by Sufriadin)

As oil and gas fuels become increasingly limited and the need for industrial activities increases, coal can be used as an alternative energy in the future. Coal is one of the fossil energy sources that is most widely used as fuel. Developments in the use of coal resources will result in increasingly depleted high quality coal resources. The use of coal with high sulfur content is very risky for the environment and equipment damage. This research aims to reduce the total sulfur content in coal from the Paluda area, Barru Regency using chemical methods using an oxalic acid solution. In this study, washing was carried out with variable concentrations of 1 M, 2 M, 3 M, and 4 M with experimental times of 2, 4, 6, and 8 hours. The results of the proximate analysis of Paluda area coal samples showed a water content of 1.38%, ash content of 6.99%, volatile matter 44.11%, fixed carbon 47.52%, results of total sulfur analysis in the initial sample 2.39%, and the value calories 6,043 cal/gr. The coal samples studied were categorized as subbituminous rank A coal based on their calorific value. The results of microscopic and XRD analysis of coal samples from the Paluda area show the presence of pyrite, quartz, clay, calcilite and gibbsite minerals. The coal washing results show that the maximum conditions achieved in this research were in the experiment with a variable concentration of oxalic acid of 4 M with a reaction time of 4 hours producing the lowest total sulfur content of 1.95% or experiencing a reduction in sulfur content of 18.41%.

Keywords: Coal, Quality Analysis, Washing, Desulfurization, Oxalic Acid



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Batubara	4
2.2 Kualitas Batubara.....	20
2.3 Sulfur dalam Batubara	27
2.4 Desulfurisasi Batubara	30
2.5 Asam Oksalat	33
BAB III METODE PENELITIAN.....	36
3.1 Lokasi Pengambilan Sampel	36
3.2 Variabel Penelitian.....	37
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	37
3.4 Teknik Pengumpulan Data Penelitian.....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	50
4.1 Karakteristik Kualitas Batubara Paluda	50
4.2 Analisis Mineralogi.....	51
4.3 Desulfurisasi Batubara Menggunakan Larutan Asam Oksalat	56
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	64



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Proses pembentukan batubara	8
Gambar 2 Pembentukan sulfur pada batubara	29
Gambar 3 Peta lokasi pengambilan sampel	36
Gambar 4 Proses reduksi ukuran sampel menggunakan mortar baja	40
Gambar 5 Proses pengayakan menggunakan ayakan 65 <i>mesh</i> , 100 <i>mesh</i> , dan 200 <i>mesh</i>	41
Gambar 6 Proses penimbangan sampel.....	42
Gambar 7 Proses pencucian sampel batubara	43
Gambar 8 Proses penyaringan hasil pencucian batubara	44
Gambar 9 Analisis menggunakan mikroskop Nikon Eclipse LV-100 POL	45
Gambar 10 XRD tipe shimadzu maxima-X XRD 7000.....	46
Gambar 11 <i>Digital bomb calorimeter</i>	47
Gambar 12 <i>Muffle Furnace YAMATO FO 310</i>	47
Gambar 13 LECO S832DR <i>dual range sulphur determination</i>	48
Gambar 14 Diagram alir penelitian.....	49
Gambar 15 Foto mikroskopis sampel batubara Paluda.....	52
Gambar 16 Difraktogram sampel batubara Paluda	54
Gambar 17 Grafik pengaruh konsentrasi terhadap penurunan kadar sulfur total	57
Gambar 18 Grafik pengaruh variabel waktu terhadap penurunan kadar sulfur total.....	58



DAFTAR TABEL

Tabel 1 <i>Classification of coal by rank</i>	27
Tabel 2 Hasil analisis proksimat sampel batubara Paluda	50
Tabel 3 Hasil analisis nilai kalori sampel batubara Paluda.....	51
Tabel 4 Hasil analisis total sulfur sampel awal batubara Paluda	51
Tabel 5 Data analisis kualitas batubara setelah percobaan	56
Tabel 6 Hasil perhitungan persentase reduksi kadar sulfur total berdasarkan variabel konsentrasi	56
Tabel 7 Hasil perhitungan persentase reduksi kadar sulfur total berdasarkan variabel waktu percobaan	58



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil perhitungan analisis proksimat.....	65
Lampiran 2 Hasil perhitungan reduksi kadar sulfur batubara (desulfurisasi) batubara setelah pencucian	68
Lampiran 3 Hasil analisis XRD.....	70
Lampiran 4 Hasil analisis total sulfur.....	75
Lampiran 5 Hasil analisis nilai kalori.....	82
Lampiran 6 Kartu Konsultasi.....	85



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Desulfurisasi Batubara Daerah Paluda, Kabupaten Barru dengan Menggunakan Larutan Asam Oksalat”. Skripsi ini disusun sebagai syarat mendapatkan gelar sarjana di Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Selain itu, skripsi ini juga dibuat sebagai salah satu wujud implementasi dari ilmu yang didapatkan selama masa perkuliahan. Penulis menyadari bahwa banyak tantangan yang dihadapi dalam proses penulisan skripsi ini, namun berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak semuanya dapat dilalui dengan baik.

Penyusunan skripsi ini tidak akan selesai tanpa adanya bantuan dari semua orang yang telah memfasilitasi penulis mulai dari preparasi sampel hingga selesai. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing Bapak Dr. Ir. Sufriadin, S.T., M.T yang banyak memberi masukan dalam penelitian ini serta telah banyak meluangkan waktunya dalam proses penyusunan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Dr. Eng. Rini Novrianti Sutardjo Tui, S.T., M.T., MBA dan Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T selaku dosen penguji.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua penulis yaitu Bapak Marthen Dudung dan Ibu Bertha Kutu' serta keluarga yang tidak henti-hentinya memberi dukungan mental, motivasi, dan dukungan materil sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh mahasiswa Teknik Pertambangan 2020 serta anggota Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian yang telah memberikan bantuan bahkan dukungan mental dan banyak menghibur ketika mengalami jenuh dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dalam pengembangan wawasan dalam bidang pengolahan bahan galian. Penulis juga menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih banyak kekurangan di dalamnya. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan skripsi yang berkaitan dengan penurunan kadar sulfur batubara ini kedepannya.

Gowa, Juli 2024

Regina Frensy



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Batubara merupakan salah satu sumber energi alternatif di Indonesia yang memiliki sumberdaya dan cadangan yang cukup banyak. Kedepannya batubara mempunyai prospek dan peluang pengembangan yang baik. Seiring dengan semakin terbatasnya bahan bakar minyak dan gas serta kebutuhan akan aktivitas industri yang semakin meningkat, batubara dapat digunakan sebagai energi alternatif di masa depan. Batubara sendiri terdiri dari komponen maseral, mineral dan lengas. Kualitas batubara terutama dipengaruhi oleh parameter abu, sulfur dan nilai kalor (Nur dkk., 2020).

Produksi batubara Indonesia diperkirakan akan terus tumbuh, terutama untuk memenuhi kebutuhan domestik dan ekspor. Ekspor batubara menyumbang 63% dari total produksi, dengan output sebesar 357 juta ton, yang sebagian besar diekspor untuk memenuhi permintaan di Tiongkok dan India. Besarnya ekspor batubara Indonesia menjadikan Indonesia bersama Australia sebagai salah satu eksportir batubara terbesar di dunia dan juga berperan penting dalam perdagangan batubara dunia (Secretariat General of the National Energy Council, 2019).

Batubara telah intensif digunakan di berbagai sektor industri dan pembangkit listrik dalam negeri, hal ini disebabkan oleh semakin berkurangnya cadangan minyak bumi, oleh karena itu penggunaan batubara diperkirakan akan meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi. Cadangan batubara Indonesia sebesar 38,8 miliar ton, termasuk batubara Sulawesi yang terkonsentrasi di provinsi Sulawesi Selatan yang termasuk dalam tiga cadangan batubara terbesar Indonesia setelah Kalimantan dan Sumatera. Namun sayangnya, kualitas batubara Sulawesi yang relatif rendah, selama ini belum bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar industri, karena kandungan sulfur dan abunya yang relatif tinggi sehingga dapat merusak peralatan pembakaran dan menyebabkan pencemaran lingkungan.



angan teknologi ramah lingkungan akan seiring dengan penggunaan
Oleh karena itu sebagian pemerhati lingkungan berupaya mendorong
angan teknologi batubara bersih atau ramah lingkungan (Aladin, 2009).

Seiring dengan berkembangnya sumber daya batubara, sumber daya batubara berkualitas tinggi semakin menipis, hal ini mendorong dilakukannya penelitian terhadap sumber daya batubara kandungan sulfur tinggi (Liu *et al.*, 2023). Metode pencucian atau pelindian banyak dilakukan dengan larutan asam anorganik seperti asam sulfat, asam nitrat, dan asam klorida. Padahal, limbahnya berbahaya dan membutuhkan biaya penanganan yang tinggi. Penggunaan asam oksalat dipilih pada penelitian ini karena asam oksalat merupakan asam organik lemah yang ramah lingkungan dan sering digunakan sebagai reagen ekstraksi. Asam oksalat memiliki kemampuan untuk membentuk senyawa kompleks dengan logam, termasuk logam sulfida seperti besi sulfida dan pirit yang mengandung sulfur dalam batubara. Asam oksalat dapat mengikat logam-logam ini dan membentuk senyawa kompleks yang lebih larut dalam air (Kusumaningrum *et al.*, 2019).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, adapun rumusan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana karakteristik kualitas batubara daerah Paluda, Kabupaten Barru.
2. Bagaimana komposisi mineral yang terdapat dalam batubara daerah Paluda, Kabupaten Barru.
3. Bagaimana pengaruh konsentrasi asam oksalat dan waktu pencucian terhadap reduksi kadar sulfur total yang dihasilkan dari proses desulfurisasi batubara daerah Paluda, Kabupaten Barru.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik kualitas batubara pada daerah Paluda, Kabupaten Barru.
2. Mengidentifikasi komposisi mineral yang terdapat dalam batubara daerah Paluda, Kabupaten Barru.



Analisis pengaruh konsentrasi asam oksalat dan waktu pencucian terhadap reduksi kadar sulfur total yang dihasilkan dari proses desulfurisasi batubara daerah Paluda, Kabupaten Barru.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini berguna untuk memberikan informasi mengenai alternatif lain atau pilihan baru dalam pengolahan batubara terutama pada penurunan kadar sulfur total menggunakan metode kimiawi. Penelitian ini diharapkan dapat meminimalisir dampak pencemaran sulfur terhadap lingkungan akibat penggunaan batubara dengan kadar sulfur yang tinggi ataupun mencegah kerusakan pada alat-alat industri dan juga dapat meningkatkan kualitas batubara dengan menggunakan larutan kimia yang ramah lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka penelitian ini dibatasi pada penyelesaian masalah agar penelitian lebih terarah dan terfokus yaitu kualitas batubara, pengaruh waktu pencucian dan pengaruh konsentrasi asam oksalat dalam penurunan kadar sulfur total. Analisis hanya dilakukan pada penurunan kadar sulfur sehingga keberadaan unsur-unsur lain yang terlarut pada saat pencucian tidak diperhitungkan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Menurut Muchjidin (2006), batubara merupakan batuan sedimen yang tersusun atas karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur. Batubara memiliki batuan yang mengandung mineral dalam proses pembentukannya. Selain kelembapan, mineral ini juga merupakan bahan tambahan karbon, sehingga bila digunakan konsentrasi kedua bahan tersebut mempunyai pengaruh yang besar. Dalam tiga kegunaan batubara, yaitu sebagai pembuat kokas, sebagai bahan bakar dan sebagai batubara konversi, pengotor-pengotor ini harus diperhitungkan karena semakin tinggi pengotor maka semakin rendah kandungan karbonnya, sehingga semakin rendah nilai kalor batubara tersebut.

Batubara merupakan bahan padat organik yang terbentuk dari sisa-sisa berbagai tumbuhan purba dan menjadi padat bila terkubur oleh lapisan di atasnya. Proses pembatubaraan (*coalification*) terjadi akibat tekanan dan suhu yang tinggi serta berlangsung dalam waktu yang lama. Proses dekomposisi tumbuhan ini terjadi karena proses biologi dengan mikroba dimana banyak oksigen dalam selulosa diubah menjadi karbondioksida (CO_2) dan air (H_2O). Perubahan yang terjadi dalam kandungan bahan tersebut disebabkan oleh adanya tekanan dan pemanasan yang kemudian membentuk lapisan tebal sebagai akibat pengaruh panas bumi dalam jangka waktu berjuta-juta tahun, sehingga lapisan akhirnya memadat dan mengeras. Perbedaan sifat-sifat batubara disebabkan oleh perbedaan dari sumber bahan baku (jenis tumbuhan purba), lingkungan tempat diendapkannya, kondisi dan keadaan serta derajat variasi jenis dan kuantitasnya, serta sebaran pengotornya (Sudarsono, 2003). Suatu tumbuhan atau pohon yang sudah mati kemudian jatuh di daerah yang berair seperti rawa, sungai atau danau maka tumbuhan tersebut tidak akan mengalami pembusukan secara sempurna, karena pada kedalaman tertentu bakteri tidak lagi bisa menguraikan tumbuhan tersebut baik bakteri aerob maupun anaerob.



a sisa tumbuhan tersebut akan terus mengendap dan membentuk suatu fosil tumbuhan yang selanjutnya mengalami perubahan fisik dan biokimia (Sudarsono *et al.*, 2012).

Proses pembentukan batubara terdiri atas dua tahap, yaitu (Mahreni, 2019):

1. Tahap biokimia (penggambutan) adalah ketika sisa-sisa tumbuhan yang terakumulasi tersimpan dalam kondisi bebas oksigen (anaerobik) di daerah rawa dengan sistem penirisan (*drainage system*) yang buruk dan selalu tergenang air beberapa inci dari permukaan air rawa. Material tumbuhan yang busuk tersebut melepaskan unsur H, N, O dan C dalam bentuk senyawa CO₂, H₂O, dan NH₃ untuk menjadi humus. Selanjutnya bakteri anaerobik dan fungi, material tumbuhan itu diubah menjadi gambut.
2. Tahap pembatubaraan (*coalification*) merupakan proses diagenesis terhadap komponen organik dari gambut yang menimbulkan peningkatan temperatur dan tekanan sebagai gabungan proses biokimia, kimia, dan fisika yang terjadi karena pengaruh pembebanan sedimen yang menutupinya dalam kurun waktu geologi. Tahap tersebut, presentase karbon meningkat, sedangkan persentase hidrogen dan oksigen akan berkurang sehingga menghasilkan batubara dalam berbagai tingkat maturitas material organiknya. Teori yang menerangkan terjadinya batubara yaitu:

- a. Teori In-situ

Teori in-situ pertama kali diperkenalkan pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20 sebagai tanggapan terhadap penemuan lapisan batubara yang tebal dan ekstensif di berbagai bagian dunia. Para ahli geologi yang mengamati karakteristik fisik lapisan batubara dan hubungannya dengan lapisan batuan sedimen lainnya mulai menyusun hipotesis bahwa batubara terbentuk di tempat tumbuhan tersebut hidup dan mati. Batubara terbentuk dari tumbuhan atau pohon yang berasal dari hutan tempat dimana batubara tersebut. Batubara yang terbentuk biasanya terjadi di hutan basah dan berawa, sehingga pohon-pohon di hutan tersebut pada saat mati dan roboh, langsung tenggelam ke dalam rawa tersebut dan sisa tumbuhan tersebut tidak mengalami pembusukan secara sempurna dan akhirnya menjadi fosil tumbuhan yang membentuk sedimen organik. Beberapa bukti geologi dan paleobotani mendukung teori in-situ pembentukan batubara yaitu lapisan batubara seringkali ditemukan dalam formasi yang sangat teratur dan berlapis-lapis,



menunjukkan bahwa material organik terakumulasi secara bertahap di tempat asalnya. Adanya struktur akar dan batang tumbuhan yang terawetkan dalam lapisan batubara juga mendukung hipotesis bahwa tumbuhan tersebut tidak mengalami transportasi yang signifikan. Fosil tumbuhan yang ditemukan dalam lapisan batubara sering kali dalam kondisi yang baik dan tidak menunjukkan tanda-tanda transportasi. Fosil-fosil ini biasanya berada dalam posisi tumbuh alami, dengan akar yang menembus lapisan gambut di bawahnya. Komposisi kimia batubara sering kali mencerminkan jenis tumbuhan asli yang membentuknya, menunjukkan bahwa material organik tidak mengalami pencampuran dengan material asing. Analisis isotop karbon dan hidrogen dalam batubara juga mendukung pembentukan in-situ. Bukti geologi menunjukkan bahwa banyak lapisan batubara terbentuk dalam lingkungan rawa-rawa dan delta sungai yang tergenang air. Kondisi ini mendukung akumulasi material organik yang kaya dan pembentukan gambut yang diperlukan untuk proses pematubaraan.

b. Teori *Drift*

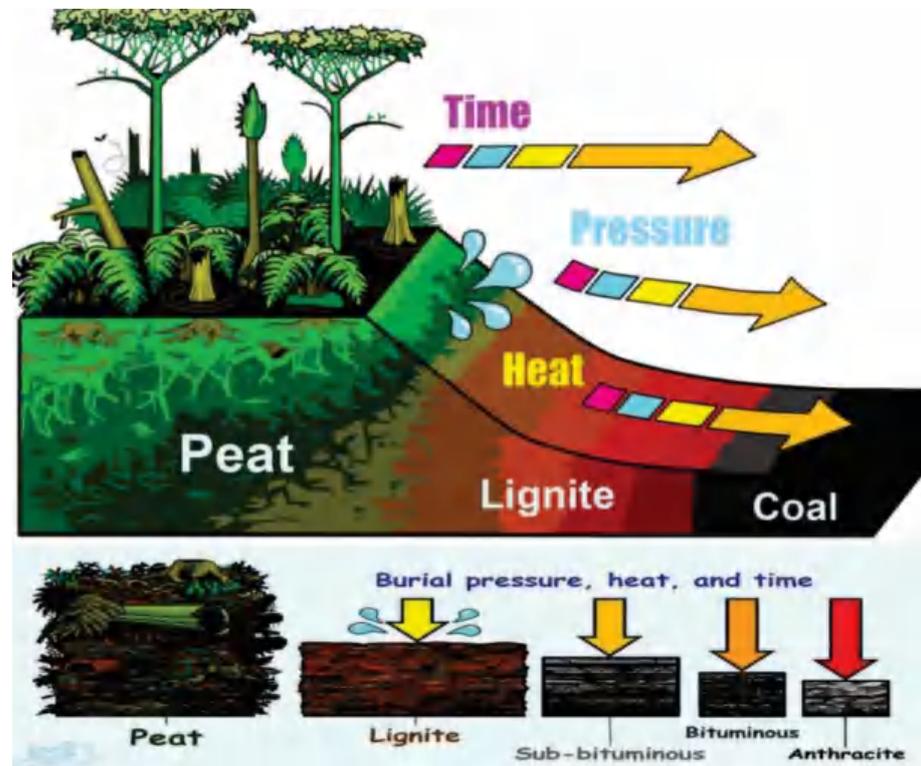
Pembentukan batubara dimulai dari akumulasi material organik, terutama tumbuhan, yang terkumpul di daerah rawa-rawa atau lingkungan pengendapan lainnya. Material ini kemudian mengalami proses pematubaraan yang melibatkan kompaksi, dekomposisi, dan perubahan kimiawi di bawah kondisi tekanan dan suhu tertentu selama jutaan tahun. Batubara terbentuk dari tumbuhan atau pohon yang berasal dari hutan yang bukan di tempat dimana batubara tersebut. Batubara yang terbentuk biasanya terjadi di delta mempunyai ciri-ciri lapisannya yaitu tipis, tidak menerus (*splitting*), banyak lapisannya (*multiple seam*), banyak pengotor (kandungan abu cenderung tinggi). Jenis batubara yang terbentuk dengan cara ini mempunyai penyebaran yang tidak luas. Faktor-faktor yang mempengaruhi *drift* dalam pembentukan batubara mencakup agen transportasi, kondisi lingkungan, dan jenis vegetasi. Agen transportasi seperti sungai, arus laut, dan aktivitas glasial



memainkan peran penting dalam mengangkut material organik dari tempat asalnya ke lokasi pengendapan. Sungai dapat mengangkut material organik dalam jarak yang jauh dan mengendapkannya di delta atau cekungan sungai, sementara arus laut dapat membawa material ke daerah pantai atau cekungan laut, dan aktivitas glasial dapat mengangkut material organik bersama dengan endapan glasial. Kondisi lingkungan, termasuk kecepatan dan volume air atau es yang mengangkut material, mempengaruhi jarak transportasi dan lokasi pengendapan material organik. Selain itu, kondisi iklim dan geologi setempat juga berperan penting dalam proses *drift* dan pengendapan. Jenis vegetasi yang menjadi sumber material organik juga mempengaruhi karakteristik batubara yang terbentuk; tumbuhan dengan struktur yang lebih kuat mungkin lebih tahan terhadap proses transportasi dan lebih mudah terakumulasi di cekungan pengendapan. Semua faktor ini bekerja bersama-sama untuk menentukan bagaimana dan di mana material organik diangkut dan diendapkan, yang pada akhirnya mempengaruhi pembentukan batubara. Teori *drift* dalam pembentukan batubara memiliki berbagai implikasi penting dalam bidang geologi, eksplorasi batubara, dan pengelolaan lingkungan. Dalam eksplorasi dan penambangan batubara, pemahaman tentang proses *drift* membantu mengidentifikasi lokasi-lokasi potensial dengan kondisi geologi yang mendukung transportasi dan pengendapan material organik, sehingga dapat menjadi target eksplorasi. Selain itu, studi tentang formasi batubara dan proses *drift* dapat membantu merekonstruksi lingkungan purba dan kondisi iklim masa lalu, yang penting untuk memahami perubahan iklim dan lingkungan selama periode geologis tertentu. Pengetahuan ini juga berguna dalam pengelolaan lingkungan, khususnya terkait dengan mitigasi dampak lingkungan yang dihasilkan dari aktivitas penambangan batubara. Dengan demikian, teori *drift* memberikan wawasan yang berharga



tentang dinamika interaksi antara proses geologis dan biologis dalam sejarah bumi, serta bagaimana sumber daya alam terbentuk dan terdistribusi di permukaan bumi. Proses pembentukan batubara dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Proses pembentukan batubara (Mahreni, 2019)

Saat batubara terbentuk, banyak faktor yang mempengaruhi prosesnya. Tahap awal pembentukan batubara adalah penggambutan. Ada beberapa jenis gambut pada fase penggambutan ini. Hasil penggambutan memberikan batubara yang terbentuk memiliki karakter yang khas. Secara umum, perkembangan tanaman, iklim, geografi lokal, dan tekanan waktu merupakan faktor-faktor yang menyatu. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan batubara antara lain (Irwandi, 2014):

1. Akumulasi sisa tumbuhan-tumbuhan (bahan organik)

Akumulasi sisa-sisa tumbuhan dapat terjadi secara in-situ atau akibat hanyut (*allocton*), namun akumulasi tersebut harus dalam jumlah cukup besar dan terletak pada daerah yang tergenang air yang nantinya dapat digunakan sebagai daerah pengendapan batuan sedimen glasial. Situasi ini dapat dicapai dengan produksi tanaman yang tinggi, pengisian yang lambat dan



terus menerus, diikuti dengan penurunan dasar cekungan secara bertahap. Faktor akumulasi sisa tumbuhan-tumbuhan atau bahan organik dalam pembentukan batubara melibatkan serangkaian proses yang kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai kondisi lingkungan, biologi, dan geologi. Pembentukan batubara dimulai dari akumulasi besar material organik, terutama dari tumbuhan, di daerah rawa-rawa atau lingkungan pengendapan lainnya yang memiliki kondisi anaerobik, yang mencegah dekomposisi lengkap bahan organik oleh mikroorganisme. Lingkungan rawa dengan air yang tergenang dan kondisi sedikit oksigen sangat ideal untuk akumulasi bahan organik karena memperlambat proses dekomposisi dan memungkinkan penumpukan material organik yang cukup tebal. Jenis tumbuhan yang berkontribusi dalam pembentukan batubara juga penting tumbuhan yang memiliki jaringan lignin dan selulosa yang kuat, seperti paku-pakuan besar dan pohon-pohon kayu keras, lebih cenderung bertahan dalam kondisi anaerobik dan memberikan kontribusi yang signifikan pada akumulasi bahan organik. Selain itu, tumbuhan dengan kandungan resin tinggi juga membantu memperlambat dekomposisi. Kondisi iklim memainkan peran penting dalam pembentukan batubara; iklim yang hangat dan lembap meningkatkan pertumbuhan vegetasi dan produksi biomassa yang tinggi, sementara curah hujan yang tinggi mendukung pembentukan rawa-rawa. Proses taphonomi, yang mencakup penguburan cepat dan perlindungan dari agen-agen erosional, membantu dalam pengawetan bahan organik sebelum transformasi menjadi batubara. Pengendapan yang cepat oleh sedimen halus seperti lempung atau lumpur melindungi bahan organik dari oksidasi dan dekomposisi lebih lanjut. Tekanan dari sedimen yang menumpuk di atasnya membantu dalam kompaksi material organik, yang merupakan tahap awal dalam proses pembatubaraan. Faktor geologis juga berperan penting, termasuk aktivitas tektonik yang dapat menciptakan cekungan pengendapan yang dalam dan stabil, yang ideal untuk akumulasi bahan organik dalam jumlah besar. Selain itu, aktivitas vulkanik dapat menyediakan lapisan abu vulkanik yang membantu mengubur dan melindungi bahan organik. Selama jutaan tahun, material organik yang



terkubur ini mengalami proses diagenesis, yang melibatkan perubahan kimiawi dan fisik di bawah tekanan dan suhu yang meningkat, mengarah pada transformasi bahan organik menjadi batubara. Selama proses diagenesis, bahan organik mengalami penguraian termal dan pelepasan air, karbon dioksida, dan metana, yang meningkatkan kandungan karbon dalam material yang tersisa. Tahapan awal pembatubaraan menghasilkan gambut, yang kemudian berubah menjadi lignit dengan tekanan dan suhu lebih lanjut. Proses ini berlanjut hingga lignit berubah menjadi batubara sub-bituminus, batubara bituminus, dan akhirnya antrasit, yang merupakan tahap tertinggi dalam pembatubaraan dengan kandungan karbon yang sangat tinggi dan kelembaban yang sangat rendah.

2. Bakteri dan organisme tingkat rendah

Bakteri dan organisme tingkat rendah menjadi faktor penyebab sisa-sisa tumbuhan berubah menjadi zat pembentuk gambut. Bakteri dan organisme kurang aktif lainnya menghancurkan akumulasi sisa tanaman yang ada dan mengubahnya menjadi massa seperti jeli (gel) menjadi bahan pembentuk gambut, yang kemudian terakumulasi sebagai gambut. Bakteri dan organisme tingkat rendah memiliki peran yang sangat signifikan dalam pembentukan batubara melalui proses dekomposisi dan transformasi bahan organik. Proses ini dimulai dengan penguraian material organik, terutama tumbuhan, yang terkumpul di lingkungan pengendapan seperti rawa-rawa atau cekungan yang tergenang air. Di lingkungan ini, kondisi anaerobik (kekurangan oksigen) mendominasi, yang menghambat dekomposisi lengkap bahan organik oleh mikroorganisme aerobik. Sebaliknya, bakteri anaerobik dan organisme tingkat rendah seperti fungi mengambil alih peran utama dalam memecah bahan organik kompleks menjadi senyawa-senyawa lebih sederhana. Pada tahap awal, bakteri dan fungi bekerja untuk memecah selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang membentuk dinding sel tumbuhan. Proses ini menghasilkan senyawa-senyawa seperti asam humat dan asam levat, yang merupakan komponen utama dalam pembentukan gambut, tahap awal dalam proses pembatubaraan. Dalam lingkungan yang anaerobik, bakteri anaerobik, termasuk bakteri metanogen, melakukan



fermentasi terhadap bahan organik, menghasilkan produk sampingan seperti gas metana dan karbon dioksida. Fermentasi anaerobik ini penting karena membantu mengurangi laju dekomposisi lebih lanjut, memungkinkan bahan organik terakumulasi dan terkompaksi secara efektif. Pembentukan gambut, yang merupakan prekursor utama batubara, sangat dipengaruhi oleh aktivitas bakteri dan organisme tingkat rendah. Gambut terbentuk dari akumulasi bahan organik yang sebagian terdekomposisi dan mengalami kompaksi di bawah kondisi anaerobik. Aktivitas mikroba pada tahap ini menghasilkan humus, yang merupakan campuran bahan organik terdekomposisi yang stabil. Proses humifikasi dan gelifikasi yang dilakukan oleh bakteri dan fungi mengubah bahan organik menjadi struktur kimia yang lebih kompleks dan tahan lama, yang menjadi dasar bagi pembentukan batubara. Humifikasi melibatkan dekomposisi lebih lanjut bahan organik oleh enzim yang diproduksi oleh mikroba, menghasilkan humus yang kaya akan senyawa aromatik dan alifatik. Proses gelifikasi terjadi ketika bahan organik yang terhumifikasi mengalami pengomposan lebih lanjut dan menjadi lebih kental, meningkatkan viskositasnya. Proses-proses ini mempersiapkan bahan organik untuk tahap-tahap selanjutnya dalam pembentukan batubara, di mana tekanan dan suhu yang meningkat mengubahnya menjadi lignit, sub-bituminus, bituminus, dan akhirnya antrasit. Bakteri metanogenik memainkan peran penting dalam proses metanogenesis, di mana mereka menghasilkan metana dari senyawa organik dalam kondisi anaerobik. Metanogenesis signifikan dalam lingkungan pengendapan batubara karena gas metana yang dihasilkan dapat mengurangi volume bahan organik, meningkatkan kompaksi, dan berkontribusi pada pengawetan bahan organik. Proses ini juga membantu meningkatkan kandungan karbon dalam material yang tersisa, karena metanogenesis cenderung melepaskan senyawa yang lebih volatil seperti hidrogen dan oksigen, meninggalkan residu yang lebih kaya karbon.



engaruh bakteri dan organisme tingkat rendah juga terlihat dalam komposisi kimia batubara yang terbentuk. Aktivitas mikroba mengubah komposisi elemen kimia dalam bahan organik, meningkatkan kandungan

karbon relatif terhadap oksigen dan hidrogen. Proses ini menghasilkan batubara dengan kandungan energi yang lebih tinggi, yang lebih efisien sebagai bahan bakar fosil. Selain itu, senyawa organik kompleks yang terbentuk melalui humifikasi dan gelifikasi memberikan struktur fisik yang lebih stabil pada batubara, yang penting untuk sifat mekanis dan penggunaan batubara dalam industri. Bakteri dan organisme tingkat rendah juga berkontribusi pada pembentukan gas dalam batubara. Gas-gas seperti metana dan karbon dioksida yang dihasilkan selama proses fermentasi anaerobik dapat terperangkap dalam matriks batubara, menjadi sumber gas metana yang penting dalam eksplorasi dan produksi gas metana dari batubara (*coalbed methane*). Kehadiran gas-gas ini dalam batubara juga mempengaruhi karakteristik penambangan dan penggunaan batubara, termasuk potensi bahaya ledakan dan efisiensi pembakaran. Secara keseluruhan, bakteri dan organisme tingkat rendah memainkan peran kunci dalam seluruh siklus pembentukan batubara, mulai dari dekomposisi awal bahan organik hingga tahap akhir pematubaraan. Proses-proses biokimia yang mereka mediasi membantu dalam pengawetan, transformasi, dan pematangan bahan organik menjadi batubara yang kaya karbon dan berkualitas tinggi. Dengan demikian, pemahaman tentang peran mikroorganisme dalam pembentukan batubara memberikan wawasan penting tentang dinamika proses geologis dan biokimia yang terlibat, serta implikasi praktis untuk eksplorasi, produksi, dan penggunaan batubara sebagai sumber energi utama. Pengaruh bakteri dan organisme tingkat rendah dalam pembentukan batubara juga menekankan pentingnya kondisi lingkungan yang mendukung aktivitas mikroba. Lingkungan yang tergenang air dengan sedikit oksigen, seperti rawa-rawa, menciptakan kondisi ideal bagi bakteri anaerobik untuk berkembang. Variasi dalam jenis tumbuhan yang terakumulasi dan kondisi iklim setempat juga mempengaruhi jenis dan aktivitas mikroba yang terlibat dalam proses dekomposisi dan humifikasi. Misalnya, tumbuhan dengan kandungan lignin tinggi mungkin lebih tahan terhadap dekomposisi, sementara tumbuhan dengan kandungan selulosa tinggi lebih mudah diuraikan oleh bakteri dan



fungi. Pada konteks eksplorasi batubara, pemahaman tentang peran mikroba dalam pembentukan batubara membantu geolog dan insinyur untuk mengidentifikasi daerah-daerah yang potensial untuk penambangan batubara. Pengetahuan ini juga penting untuk pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan, karena aktivitas penambangan batubara dapat memiliki dampak signifikan terhadap ekosistem lokal dan global. Upaya untuk mengurangi dampak lingkungan dari penambangan batubara melibatkan pendekatan yang lebih baik dalam pengelolaan lahan dan air, serta teknologi yang lebih bersih untuk ekstraksi dan penggunaan batubara.

3. Temperatur

Temperatur memainkan peran krusial dalam pembentukan batubara, mempengaruhi berbagai tahap transformasi material organik dari gambut menjadi batubara yang bernilai tinggi seperti antrasit. Pembentukan batubara dimulai dari akumulasi bahan organik di lingkungan seperti rawa-rawa, di mana kondisi anaerobik mencegah dekomposisi lengkap oleh mikroorganisme. Ketika bahan organik ini terkubur oleh sedimen, proses diagenesis dimulai, dan temperatur menjadi faktor kunci yang mendorong perubahan kimiawi dan fisik yang kompleks. Temperatur atau suhu hangat terjadi ketika sedimen diendapkan di atas lapisan batubara dan gradien panas bumi. Efek termal dari faktor ini menyebabkan proses kimia dinamis (geokimia) yang mampu menghasilkan perubahan fisik dan kimia, mengubah gambut menjadi batubara dengan jenis dan kualitas berbeda. Selain panas yang berasal dari akumulasi sedimen lapisan batubara dan gradien panas bumi, panas bumi juga dapat dihasilkan oleh intrusi batuan vulkanik, sirkulasi larutan hidrotermal, dan struktur geologi. Pada tahap awal pembentukan batubara, bahan organik mengalami perubahan di bawah tekanan dan temperatur relatif rendah. Pada kondisi ini, bahan organik berubah menjadi gambut melalui proses dekomposisi anaerobik yang dipengaruhi oleh aktivitas mikroba. Namun, seiring dengan bertambahnya kedalaman penguburan, tekanan dan temperatur meningkat, memicu transformasi gambut menjadi lignit, bentuk batubara dengan kadar karbon rendah. Proses ini dikenal sebagai *subsidence*, di mana akumulasi sedimen di atas bahan organik meningkatkan tekanan dan temperatur secara bertahap. Temperatur yang meningkat menyebabkan reaksi kimia dalam



bahan organik, yang dikenal sebagai proses katagenesis. Pada tahap ini, lignit mengalami dehidrasi, di mana molekul air terlepas, serta dekarboksilasi, di mana karbon dioksida terlepas dari bahan organik. Proses-proses ini meningkatkan konsentrasi karbon dalam bahan organik, mengubah lignit menjadi batubara sub-bituminus. Temperatur yang lebih tinggi mempercepat laju reaksi kimia, mempercepat konversi bahan organik menjadi batubara dengan kandungan karbon yang lebih tinggi dan volatil yang lebih rendah. Pada tahap berikutnya, peningkatan temperatur lebih lanjut menyebabkan transformasi batubara sub-bituminus menjadi batubara bituminus. Batubara bituminus memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dan menghasilkan energi lebih besar saat dibakar. Pada tahap ini, proses kimia yang lebih kompleks terjadi, termasuk polimerisasi dan aromatisasi, di mana struktur kimia batubara menjadi lebih kompleks dan stabil. Temperatur tinggi memfasilitasi pembentukan cincin aromatik dan ikatan kimia yang lebih kuat, meningkatkan kualitas dan densitas energi batubara. Dengan peningkatan lebih lanjut dalam tekanan dan temperatur, batubara bituminus dapat berubah menjadi antrasit, bentuk batubara dengan kualitas tertinggi dan kandungan karbon tertinggi. Proses ini, yang dikenal sebagai metagenesis, terjadi pada temperatur yang sangat tinggi, sering kali di atas 200°C, dan di bawah kondisi tekanan yang ekstrem. Antrasit dicirikan oleh kandungan karbon yang sangat tinggi, hampir tanpa bahan volatil, dan menghasilkan energi yang sangat tinggi saat dibakar. Struktur kristalin dari karbon dalam antrasit menunjukkan tingkat pengaturan yang sangat tinggi, yang hanya dapat dicapai melalui kondisi temperatur dan tekanan ekstrem selama jutaan tahun. Temperatur juga mempengaruhi volatilitas dan kandungan mineral dalam batubara. Pada temperatur tinggi, volatil seperti metana, karbon dioksida, dan senyawa hidrokarbon lainnya terlepas dari bahan organik, meninggalkan residu yang lebih kaya karbon. Kandungan mineral seperti belerang dan logam berat juga dapat mengalami perubahan kimiawi pada temperatur tinggi, yang mempengaruhi kualitas dan sifat pembakaran batubara. Proses pelepasan volatil ini, yang dikenal sebagai devolatilisasi, adalah langkah penting dalam pematangan batubara, yang secara signifikan meningkatkan kandungan energi dan efisiensi pembakaran. Selain itu, temperatur berperan dalam pembentukan struktur fisik batubara. Pada temperatur tinggi, tekanan yang meningkat



menyebabkan rekristalisasi dan pemadatan bahan organik, menghasilkan struktur yang lebih keras dan kurang porus. Proses ini meningkatkan densitas batubara dan mengurangi kandungan air serta gas yang terperangkap. Struktur fisik yang lebih padat dan kurang porus ini membuat antrasit sangat efisien sebagai bahan bakar karena mengandung energi yang lebih banyak per unit volume. Diagenesis termal yang terjadi pada berbagai tahap pembentukan batubara sangat dipengaruhi oleh gradien geotermal, yaitu kenaikan temperatur seiring dengan peningkatan kedalaman bumi. Gradien geotermal yang tinggi mempercepat proses diagenesis dan pematubaraan, sementara gradien yang lebih rendah memperlambat proses ini. Faktor-faktor geologis seperti aktivitas tektonik, intrusi magma, dan pergerakan kerak bumi juga dapat menyebabkan fluktuasi lokal dalam temperatur, yang pada gilirannya mempengaruhi kecepatan dan karakteristik pembentukan batubara di berbagai lokasi geologi. Pada konteks eksplorasi dan penambangan batubara, pemahaman tentang pengaruh temperatur dalam proses pematubaraan sangat penting. Ahli geologi dan insinyur menggunakan data tentang gradien geotermal dan sejarah termal cekungan batubara untuk mengidentifikasi daerah-daerah dengan potensi batubara berkualitas tinggi. Teknologi seperti pemetaan geotermal dan analisis isotop digunakan untuk mengukur temperatur sejarah dan mengevaluasi kondisi pematubaraan di berbagai lapisan geologi. Pemahaman tentang pengaruh temperatur juga membantu dalam perencanaan dan optimalisasi operasi penambangan batubara. Mengetahui karakteristik termal batubara dapat membantu dalam desain proses pembakaran yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Batubara dengan kandungan volatil yang lebih rendah dan struktur kristalin yang lebih stabil lebih efisien dalam proses pembakaran dan menghasilkan emisi yang lebih sedikit, yang penting untuk mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan batubara.

4. Tekanan

Tekanan adalah salah satu faktor utama yang mempengaruhi pembentukan batubara, memainkan peran penting dalam transformasi bahan organik menjadi batubara melalui proses yang dikenal sebagai pematubaraan atau maturation. Proses ini melibatkan konversi bahan organik, terutama sisa-



sisia tumbuhan, yang terakumulasi di lingkungan rawa atau cekungan pengendapan lainnya menjadi batubara dengan kualitas yang semakin tinggi. Perubahan ini terjadi dalam beberapa tahap, di mana tekanan memainkan peran kunci dalam setiap tahapannya. Tekanan sangat penting sebagai penghasil panas, namun tekanan juga dapat membantu melepaskan zat-zat terbang dari lapisan batubara, suatu proses yang disebut devolatilisasi. Proses ini lebih efisien bila lapisan batuan bagian atas bersifat permeabel dan berpori, sehingga memungkinkan karbon pada lapisan batupasir mengalami proses penguapan yang lebih efisien. Pada tahap awal pembatubaraan, bahan organik yang terakumulasi di lingkungan pengendapan mulai terkompaksi di bawah berat lapisan sedimen yang menumpuk di atasnya. Proses ini menghasilkan pembentukan gambut, bahan organik yang terurai sebagian dengan kandungan air yang tinggi. Tekanan dari lapisan sedimen di atasnya menyebabkan gambut terkompaksi, mengurangi kandungan airnya, dan meningkatkan densitasnya. Ini adalah tahap pertama di mana tekanan mulai berperan dalam mengubah bahan organik menjadi batubara. Seiring dengan bertambahnya kedalaman penguburan, tekanan yang diterapkan pada gambut terus meningkat. Pada kedalaman yang lebih besar, gambut mengalami peningkatan tekanan litostatik, yang merupakan tekanan yang dihasilkan oleh berat lapisan batuan di atasnya. Peningkatan tekanan ini menyebabkan dehidrasi lebih lanjut dari bahan organik, memaksa keluar lebih banyak air dan senyawa volatil dari matriks organik. Proses ini mengarah pada pembentukan lignit, tahap awal dari batubara dengan kandungan karbon yang lebih tinggi dibandingkan gambut. Tekanan juga mempengaruhi reaksi kimia yang terjadi dalam bahan organik selama proses pembatubaraan. Pada tekanan tinggi, bahan organik mengalami proses katagenesis, di mana molekul-molekul organik yang kompleks mulai terurai menjadi molekul-molekul yang lebih sederhana. Proses ini melibatkan

aksi dekarboksilasi, di mana karbon dioksida terlepas dari bahan organik, un reaksi dehidrasi, di mana air dikeluarkan. Hasilnya adalah peningkatan kandungan karbon dalam bahan organik, yang mengubah lignit menjadi



batubara sub-bituminus. Oleh karena peningkatan lebih lanjut dalam kedalaman dan tekanan, batubara sub-bituminus mengalami transformasi menjadi batubara bituminus. Pada tahap ini, tekanan litostatik yang sangat tinggi menyebabkan perubahan struktural dan kimia dalam batubara. Tekanan tinggi memfasilitasi pembentukan ikatan kimia yang lebih kuat antara molekul-molekul karbon, meningkatkan kestabilan termal dan kekuatan mekanik batubara. Proses polimerisasi dan aromatisasi terjadi, di mana molekul-molekul organik bergabung membentuk struktur aromatik yang kompleks. Batubara bituminus, dengan kandungan karbon yang lebih tinggi dan kandungan volatil yang lebih rendah, memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan lignit. Selain mempengaruhi kandungan karbon dan struktur kimia batubara, tekanan juga memainkan peran dalam pembentukan porositas dan retakan dalam batubara. Pada tekanan tinggi, bahan organik terkompaksi lebih padat, mengurangi porositas dan jumlah retakan dalam batubara. Hal ini penting karena porositas dan retakan dapat mempengaruhi permeabilitas batubara, yang berdampak pada kemampuan batubara untuk menyimpan dan melepaskan gas seperti metana. Batubara dengan porositas rendah dan retakan minimal cenderung memiliki kualitas yang lebih baik untuk penggunaan sebagai bahan bakar karena memiliki kandungan energi yang lebih tinggi dan menghasilkan lebih sedikit emisi selama pembakaran. Tekanan juga mempengaruhi kandungan mineral dalam batubara. Pada tekanan tinggi, mineral-mineral yang terperangkap dalam bahan organik dapat mengalami perubahan kimiawi dan rekristalisasi. Misalnya, mineral belerang dapat bereaksi dengan bahan organik di bawah kondisi tekanan tinggi, menghasilkan senyawa belerang yang lebih stabil dan kurang volatil. Ini penting karena kandungan belerang yang tinggi dalam batubara dapat menghasilkan emisi sulfur dioksida selama pembakaran, yang merupakan polutan udara berbahaya. Oleh karena itu, tekanan tinggi selama pembentukan batubara dapat membantu mengurangi kandungan belerang dan meningkatkan kualitas lingkungan dari batubara yang dihasilkan. Faktor geologis seperti aktivitas tektonik juga dapat mempengaruhi tekanan selama proses pembatubaraan. Aktivitas



tektonik yang menyebabkan pergerakan kerak bumi dapat menghasilkan tekanan tambahan pada lapisan batubara, mempercepat proses pembatubaraan dan meningkatkan kualitas batubara. Misalnya, intrusi magma ke dalam lapisan batubara dapat menghasilkan tekanan dan suhu yang sangat tinggi, menyebabkan rekristalisasi cepat dan pembentukan antrasit dalam waktu yang lebih singkat. Namun, kondisi ekstrem ini juga dapat mengakibatkan degradasi termal jika tekanan dan suhu terlalu tinggi, menyebabkan penguraian bahan organik dan penurunan kualitas batubara.

5. Waktu geologi

Waktu geologi merupakan faktor kritis dalam pembentukan batubara, karena proses transformasi bahan organik menjadi batubara membutuhkan rentang waktu yang sangat panjang, seringkali jutaan hingga ratusan juta tahun. Pembentukan batubara dimulai dari akumulasi bahan organik, terutama sisa-sisa tumbuhan, di lingkungan yang basah seperti rawa-rawa dan cekungan sedimen. Dalam kondisi anaerobik, dimana oksigen sangat terbatas, bahan organik tersebut terdekomposisi sebagian oleh mikroorganisme, menghasilkan gambut yang kaya akan bahan organik. Proses awal ini merupakan tahap diagenesis, yang dapat berlangsung selama ribuan hingga jutaan tahun, tergantung pada kondisi lingkungan dan kecepatan pengendapan sedimen. Pengaruh pembentukan batubara tidak dapat dipisahkan dari periode pemanasan cekungan lainnya. Pemanasan dalam waktu lama pada suhu yang sama menghasilkan batubara berkualitas tinggi. Seiring dengan berjalannya waktu, lapisan sedimen yang terus bertambah menekan lapisan gambut di bawahnya, menyebabkan peningkatan tekanan dan suhu. Proses ini, yang dikenal sebagai *subsidence*, merupakan bagian penting dari transformasi gambut menjadi batubara. Pada skala waktu geologi, tekanan dan suhu yang meningkat secara perlahan memungkinkan proses kimia dan fisika yang kompleks untuk berlangsung. Gambut secara bertahap mengalami dehidrasi dan pepadatan, di mana molekul air dan senyawa volatil lainnya terlepas, meningkatkan kandungan



karbon relatif dalam material organik. Waktu geologi juga berperan dalam penentuan lokasi cekungan batubara yang potensial untuk eksplorasi dan penambangan. Ahli geologi menggunakan penanggalan radiometrik dan teknik lain untuk menentukan usia lapisan sedimen dan sejarah termal cekungan batubara. Data ini membantu dalam memahami kondisi pembatubaraan dan mengidentifikasi daerah-daerah yang memiliki potensi batubara berkualitas tinggi. Pengetahuan tentang waktu geologi juga penting dalam merencanakan operasi penambangan yang berkelanjutan dan efisien, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti kedalaman penguburan dan kondisi geotektonik. Waktu geologi juga memungkinkan terjadinya perubahan lingkungan yang signifikan, yang dapat mempengaruhi proses pembatubaraan. Perubahan iklim, pergeseran tektonik, dan fluktuasi tingkat permukaan laut yang terjadi selama jutaan tahun dapat mempengaruhi akumulasi, penguburan, dan transformasi bahan organik. Misalnya, periode glasiasi dan interglasiasi dapat mengubah pola sedimen dan vegetasi, mempengaruhi jumlah dan jenis bahan organik yang terakumulasi di lingkungan rawa. Aktivitas tektonik dapat menyebabkan pergerakan kerak bumi, menciptakan cekungan sedimen baru atau mengangkat lapisan batubara ke permukaan.

Ada tiga faktor yang mempengaruhi terbentuknya batubara atau proses karbonisasi, yaitu umur, suhu dan tekanan. Ketiga faktor inilah yang sangat menentukan nilai batubara. Faktor umur adalah waktu pengendapan batubara atau umur mulai terbentuknya batubara. Semakin lama waktu pengendapan, semakin banyak karbon yang terperangkap dan terakumulasi dalam batubara. Pada saat yang sama, faktor suhu adalah pengaruh panas, yang mempengaruhi pengendapan karbon. Sumber panas dapat berasal dari energi panas bumi, asal vulkanik, dan geologi. Faktor tekanan biasanya ditentukan oleh kedalaman lapisan karena semakin dalam lapisan batubara tertimbun tanah maka semakin a efek tekan dari beban di atasnya (Mulyana, 2005).



2.2 Kualitas Batubara

Menurut Sukandarrumidi (2006), batubara yang diperoleh pada saat penambangan pasti mengandung pengotor. Saat proses pembentukannya, batubara selalu bercampur dengan mineral-mineral pembentuk batuan, yang selalu menyatu baik sebagai mineral anorganik maupun zat organik selama proses sedimentasi. Kualitas batubara juga dapat berbeda jika berasal dari lahan gambut yang berbeda (Sachsenhofer *et al*, 2003). Selama berlangsung proses pembatubaraan terbentuklah unsur S (sulfur) yang tidak dapat dihindari. Keberadaan pengotor dalam batubara hasil penambangan diperparah lagi dengan adanya kenyataan bahwa tidak mungkin membersihkan atau memilih batubara yang bebas dari mineral.

Setiap tempat yang memiliki batubara tentu saja akan memiliki karakter batubara yang berbeda-beda, terutama dari segi kualitasnya. Kualitas batubara adalah sifat fisika dan kimia dari batubara yang mempengaruhi potensi kegunaannya. Kualitas batubara ditentukan oleh maseral dan mineral *matter* penyusunnya, juga derajat *coalification* (*rank*). Berikut merupakan penjelasan karakterisasi batubara (Sepfitrah, 2016).

1. Maseral merupakan suatu material yang terdapat di dalam batubara yang hanya terlihat dengan menggunakan mikroskop. Maseral dari batubara terbagi atas tiga golongan grup *maceral*, yaitu *vitritinite*, *liptinitite*, dan *inertinitite*. *Liptinitite* tidak berasal dari materi yang tidak dapat terhumifikasikan melainkan berasal dari sisa tumbuhan atau dari jenis tanaman tingkat rendah seperti spora, ganggang (*algae*), kutikula, getah tanaman (resin) dan serbuk sari (*pollen*). Berdasarkan morfologi dan bahan asalnya, kelompok *liptinitite* dapat dibedakan menjadi *sporinitite* (spora dan butiran *pollen*), *cutinitite* (kutikula), *resinitite* (resin atau damar) *exudatinitite* (maseral sekunder yang berasal dari getah maseral *liptinitite* lainnya yang keluar pada proses pembatubaraan), *suberinitite* (kulit kayu atau serat gabus), *alganite* (ganggang) dan *bituminite* (degradasi material *algae*).
2. *Coalification rank* (peringkat pembatubaraan) berarti posisi batubara tertentu dalam garis peningkatan transformasi dari gambut melalui batubara muda dan batubara muda hingga grafit. Proses transformasi fisika dan kimia yang tetap disebut karbonifikasi.



2.2.1 Parameter Kualitas Batubara

Kualitas batubara pada dasarnya mengacu pada sifat kimia dan fisik batubara yang mempengaruhi potensi penggunaannya. Penting untuk memahami sifat kimia dan fisik batubara, terutama sifat yang menentukan apakah batubara dapat digunakan secara komersial. Batubara harus memiliki kualitas tertentu untuk tujuan penggunaannya, batubara tersebut harus memenuhi persyaratan agar dapat ditambang dan dijual sebagai produk murni, atau jika kualitasnya dapat ditingkatkan, batubara tersebut dapat dicampur dengan batubara pilihan lainnya untuk menghasilkan produk yang bisa dijual. Analisis batubara sering kali disajikan sebagai analisis proksimat atau analisis ultimat. Analisis proksimat merupakan analisis umum yang menentukan jumlah kadar air (*moisture content*), zat terbang (*volatile matter*), kadar abu (*ash content*) dan karbon tetap (*fixed carbon*). Ini adalah analisis batubara paling dasar dan sangat penting dalam penggunaan batubara. Pengujiannya sangat bergantung pada prosedur yang digunakan, dan perbedaan waktu serta suhu akan menghasilkan hasil yang berbeda. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui prosedur yang digunakan (Thomas, 2013). Kualitas batubara dapat diketahui dengan menggunakan parameter-parameter dari batubara yaitu:

1. Kadar air (*moisture content*)

Kadar air batubara dapat berupa kandungan air internal (air senyawa atau unsur), yaitu terikat secara kimia. Jenis air ini sulit untuk dilepaskan/dihilangkan namun dapat dikurangi dengan memperkecil ukuran butir batubara. Jenis air lainnya adalah air luar (air mekanikal), yaitu air yang menempel pada permukaan butir batubara. Semakin halus butiran batubara, maka semakin besar total luas permukaan butiran tersebut sehingga mampu menampung lebih banyak air. Salah satu kelebihanannya adalah batubara mempunyai sifat hidrofobik, yaitu ketika batubara dikeringkan maka batubara sulit menyerap air sehingga tidak menambah jumlah air di dalamnya. Selama penyimpanan, dihasilkan panas yang dapat menguapkan air mekanikal yang menempel pada permukaan butir batubara (Bukandarrumidi, 2006). Istilah yang digunakan untuk kadar air batubara dapat membingungkan dan memerlukan klarifikasi. Istilah yang paling membingungkan adalah *inherent moisture*, yang memiliki banyak definisi



berbeda dan harus dihindari sebisa mungkin. Oleh karena itu, industri batubara telah mengembangkan seperangkat definisi yang ditentukan secara empiris, yaitu (Thomas, 2013):

- a. *Surface moisture*, merupakan kelembapan adventif yang tidak terjadi secara alami pada batubara dan dapat dihilangkan dengan udara pengering bersuhu rendah (40°C). Langkah pengeringan ini biasanya merupakan langkah pertama dalam analisis apapun, dan kelembapan yang tersisa setelah langkah ini disebut kelembapan yang dikeringkan dengan udara atau *air dried moisture*.
- b. *As received or as delivered moisture*, adalah kadar air total sampel batubara pada saat diterima atau dikirim ke laboratorium.
- c. *Total moisture*, ini adalah semua kelembapan yang dapat dihilangkan oleh *aggressive drying* pada suhu 150°C dalam ruang hampa atau atmosfer nitrogen.
- d. *Air dried moisture*, merupakan sisa kelembapan setelah pengeringan di udara, yang dapat dihilangkan dengan *aggressive drying*.

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

$$MC (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

W1 : Berat cawan (gram)

W2 : Berat cawan + sampel (gram)

W3 : Berat cawan + sampel setelah dipanaskan (gram)

2. Kadar abu (*ash content*)

Batubara memiliki komposisi yang heterogen, terdiri dari unsur organik (diperoleh dari tumbuhan) dan senyawa organik yang terbentuk selama dekomposisi dan pencampuran batuan di sekitarnya selama pengangkutan, sedimentasi, dan fosilisasi. Ketika batubara dibakar, senyawa anorganik berupa abu menjadi senyawa oksida yang berukuran butir halus dalam bentuk abu. Abu yang dihasilkan dari pembakaran batubara disebut kadar abu (*ash content*). Abu ini merupakan kumpulan bahan pembentuk batubara yang tidak dapat terbakar (*non combustible materials*) atau teroksidasi oleh



oksigen. Bahan sisa dalam bentuk padat 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 lainnya (Sukandarrumidi, 2006). Abu batubara merupakan sisa organik yang tersisa setelah pembakaran. Perlu diingat bahwa penentuan kadar abu tidak sesuai dengan kandungan mineral batubara. Sebagian besar mineral batubara telah kehilangan komponen volatil seperti CO_2 , SO_2 dan H_2O yang terbentuk dari senyawa mineral karbonat, sulfida, dan lempung. Kandungan abu batubara yang tinggi menurunkan nilai kalorinya. Kadar abu maksimum yang direkomendasikan untuk digunakan sebagai bahan bakar uap batubara adalah sekitar 20% (*air dried*) (Thomas, 2013). Rumus yang digunakan dalam penentuan kadar abu pada analisis proksimat batubara, yaitu:

$$\text{AC (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

W_1 : Berat cawan (gram)

W_2 : Berat cawan + sampel (gram)

W_3 : Berat cawan + sampel setelah dipanaskan (gram)

3. Zat terbang (*volatile matter*)

Konsentrasi zat yang mudah menguap berhubungan dengan proses pembatubaraan. Di bawah pengaruh tekanan berlebih, kadar air batubara berkurang, dan sebaliknya, ketika kadar air menurun, nilai kalor meningkat. Pada saat yang sama terjadi proses penguapan batubara. Semua sisa oksigen, hidrogen, sulfur dan nitrogen direduksi sehingga konsentrasi zat-zat yang mudah menguap berkurang. Konsentrasi *volatile matter* mempengaruhi kesempurnaan pembakaran dan kekuatan nyala api. Kelengkapan pembakaran ditentukan oleh nilai *fixed carbon*. Semakin tinggi nilai *fuel ratio*, maka semakin banyak karbon yang tidak terbakar (Sukandarrumidi, 2006). Zat terbang adalah semua komponen batubara kecuali uap air, yang dilepaskan pada suhu tinggi tanpa adanya udara. Bahan ini sebagian besar berasal dari fraksi organik batubara, namun sejumlah kecil juga dapat berasal dari bahan mineral yang ada (Thomas, 2013). Zat terbang (*volatile matter*) adalah persentase kehilangan berat, disesuaikan dengan kelembapan, ketika batubara dipanaskan dan bersentuhan dengan



udara dalam kondisi normal. Di dalam pengujiannya, 1 gram sampel dimasukkan ke dalam wadah tertutup (untuk mencegah masuknya udara), kemudian dimasukkan ke dalam *furnace* bersuhu 900°C atau 950°C dengan menggunakan metode ASTM selama 7 menit. *Volatile* dihitung dari hilangnya massa sampel yang dianalisis setelah hilangnya massa yang disebabkan oleh *moisture*. Reprodusibilitas *volatile matter* adalah $\pm 0,5\%$ (ISO 562). *Volatile matter* merupakan parameter penting untuk penggunaan akhir batubara. Sebagai aturan umum, seiring dengan penurunan *volatile matter* dan peningkatan rasio bahan bakar (*fuel ratio*), batubara menjadi lebih sulit menyala dan membakar lebih lambat. Konsentrasi bahan mudah menguap (*volatile matter*) sering digunakan sebagai indikator kemudahan pembakaran batubara (Osborne, 2013). Rumus yang digunakan dalam penentuan zat terbang (*volatile matter*) pada analisis proksimat batubara, yaitu:

$$VM (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana:

W1 : Berat cawan (gram)

W2 : Berat cawan + sampel (gram)

W3 : Berat cawan + sampel setelah dipanaskan (gram)

4. Karbon tetap (*fixed carbon*)

Karbon tetap adalah karbon dalam residu yang tersisa setelah zat-zat yang mudah menguap dilepaskan. *Fixed carbon* tidak ditentukan secara langsung, namun perbedaannya antara komponen batubara *air dried* lainnya yaitu kelembapan, abu, zat terbang dan total 100% (Thomas, 2013). *Fixed carbon* didefinisikan sebagai material yang tersisa setelah berkurangnya *moisture*, *volatile matter*, dan *ash*. Karbon tertambat dihitung dengan mengurangkan presentase kadar air, abu dan *volatile matter* dari 100% (Osborne, 2013). Rumus yang digunakan dalam penentuan *fixed carbon* (karbon tertambat) pada analisis proksimat batubara, yaitu:

$$C = 100\% - (MC + VM + AC) \quad (4)$$

imana:

C : *Fixed carbon* (%)



MC : *Moisture content* (%)

VM : *Volatile matter* (%)

AC : *Ash content* (%)

5. Total sulfur

Sulfur adalah unsur alami dalam batubara. Keberadaan sulfur pada batubara berkaitan dengan proses pengendapan pada saat pembentukan lapisan batubara. Proses ini dapat mencakup jenis tumbuhan yang diendapkan, apakah pengendapan terjadi di air tawar atau air asin, aktivitas bakteri apa saja, dan jenis sedimen yang diendapkan (Osborne, 2013). Belerang pada batubara terbagi menjadi dua, yaitu berupa senyawa anorganik dan organik. Belerang dalam bentuk senyawa anorganik terdapat pada mineral pirit (sebagai kristal kubik FeS_2), markasit (sebagai kristal ortorombik FeS_2) atau sulfat. Mineral pirit dan markasit sangat sering terbentuk dalam kondisi sedimentasi rawa (reduktif). Belerang organik dihasilkan selama proses karbonisasi (Sukandarrumidi, 2006). Analisis laboratorium sampel batubara dibakar pada suhu 1350°C dalam aliran oksigen. Benda uji dipanaskan dalam tungku tabung dalam aliran oksigen untuk mengoksidasi belerang menjadi belerang dioksida. Aliran gas yang mengandung sulfur dioksida dilewatkan melalui sel, kemudian diukur dengan detektor laser inframerah pada panjang gelombang yang tepat (Osborne, 2013).

6. *Calorific value*

Massa batubara dibakar dalam oksigen bertekanan tinggi dalam kondisi standar dalam kalorimeter *isoperibol*. Nilai kalor (CGV) dihitung dalam kalorimeter dari kenaikan suhu air di sekitar bejana dan rata-rata kapasitas panas efektif sistem. Panas yang dilepaskan dari saluran bahan bakar digunakan untuk pembakaran batubara, dan perpindahan panas antara kalorimeter dan lingkungannya (Osborne, 2013). Nilai kalori (CV) batubara adalah banyaknya panas per satuan massa batubara pada saat dibakar. Nilai kalori sering disebut sebagai energi spesifik, khususnya di Australia. Nilai

lori batubara dinyatakan dalam dua cara (Thomas, 2013):

Gross kalori atau nilai kalor yang lebih tinggi adalah jumlah panas yang dilepaskan dalam percobaan laboratorium ketika batubara dibakar pada



volume konstan dalam kondisi standar sehingga seluruh air dalam produk tetap cair.

- b. Kalor bersih atau nilai kalor yang lebih rendah. Selama pembakaran sebenarnya, tungku tidak pernah mencapai nilai kalor yang lebih tinggi karena beberapa produk, seperti air hilang melalui penguapan. Nilai kalor tertinggi yang dapat dicapai pada kondisi ini adalah nilai kalor pada tekanan konstan. Hal ini dapat dihitung dan dinyatakan dalam joule mutlak, kalori per gram atau Btu/lb. Persamaan yang disederhanakan untuk ini, yaitu:

$$\text{Net CV} = \text{gross CV} - 0,212\text{H} - 0,024\text{M} \text{ (MJ kg}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

$$\text{Net CV} = \text{gross CV} - 50,7\text{H} - 5,83\text{M} \text{ (Kcal kg}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

$$\text{Net CV} = \text{gross CV} - 91,2\text{H} - 10,5\text{M} \text{ (Btu lb}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

Dimana:

H : Hidrogen (%)

M : *Moisture* (%)

2.2.2 Klasifikasi Batubara

Klasifikasi batubara digunakan untuk mengelompokkan batubara berdasarkan pemanfaatannya. Klasifikasi batubara dapat menjadi sarana komunikasi untuk setiap sektor, misalnya untuk tujuan ilmiah, termasuk genesis dan *rank* batubara, sedangkan untuk tujuan komersial, termasuk nilai perdagangan dan pemanfaatannya. Batubara diklasifikasikan berdasarkan peringkat yang mengacu pada tingkat perubahan batubara dari bahan organik awal pembentukannya. Semakin tinggi peringkat batubara, semakin besar derajat alterasinya (Orem and Finkelman, 2003). Peringkat batubara diklasifikasikan berdasarkan ASTM D388-05, batubara dengan nilai karbon tetap 69% atau lebih, dihitung atas dasar kering, dengan *mineral-matter-free* basis, diklasifikasikan menurut nilai karbon tetapnya, sedangkan batubara dengan nilai kalori kurang dari 7,784 cal/gr, yang dihitung atas dasar lembab dengan *mineral-matter-free* basis yang kemudian diklasifikasikan

nilai kalorinya (Riley, 2007).

di Indonesia batubara dibagi menjadi *brown coal* dan *hard coal* (SNI 6011 999). Batubara energi rendah atau *brown coal* merupakan jenis batubara



dengan peringkat yang paling rendah, bersifat lunak, mudah diremas, 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* merupakan semua jenis batubara yang mempunyai peringkat lebih tinggi dari *brown coal* dengan sifat yang lebih keras, tidak mudah diremas, kompak, mengandung kadar air yang relatif rendah, umumnya struktur kayu tidak tampak lagi, dan relatif tahan terhadap kerusakan fisik pada saat penanganan dengan nilai kalorinya >7000 kalori/gram. Klasifikasi batubara berdasarkan peringkatnya ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 *Classification of coal by rank*

<i>Class/Group</i>	<i>Fixed Carbon (%)</i>	<i>Volatile Matter (%)</i>	<i>Calorific Value (Cal/gr)</i>
I. Anthracitic			
<i>Meta-anthracite</i>	>98	<2	
<i>Anthracite</i>	92-98	2-8	
<i>Semi-anthracite</i>	86-92	8-14	
II. Bituminous			
<i>Low volatile</i>	78-86	14-22	
<i>Medium volatile</i>	69-78	22-31	
<i>High volatile A</i>	<69	>31	>7,784
<i>High volatile B</i>			7,228-7,784
<i>High volatile C</i>			6,394-7,228
III. Subbituminous			
<i>Subbituminous A</i>			5,838-6,394
<i>Subbituminous B</i>			5,282-5,838
<i>Subbituminous C</i>			4,614-5,282
IV. Lignite			
<i>Lignite A</i>			3,502-4,614
<i>Lignite B</i>			<3,502



ulfur dalam Batubara

merupakan salah satu unsur batubara yang mempunyai dampak paling besar pemasaran batubara. Hampir setiap kontrak penjualan batubara

mempunyai spesifikasi sulfur batubara dan sanksi jika kandungan sulfur melebihi kontrak penjualan (Laskowski, 2001). Kandungan sulfur pada batubara menyebabkan permasalahan operasional dan menimbulkan polusi. Belerang yang dilepaskan dalam gas buang menyebabkan korosi dan kontaminasi pada tabung boiler serta polusi udara. Dalam analisis akhir batubara, hanya total sulfur yang ditentukan, namun dalam banyak kasus, jumlah relatif sulfur dalam setiap bentuk diperlukan dan dilakukan sebagai analisis terpisah (Thomas, 2020).

Sulfur dalam batubara didapatkan dalam bentuk mineral sulfat, mineral sulfida dan material organik. Sulfur adalah salah satu komponen dalam batubara, yang terdapat sebagai sulfur organik maupun anorganik. Terdapat 3 (tiga) jenis sulfur yang terdapat dalam batubara, yaitu:

1. Sulfur pirit

Pirit dan markasit adalah mineral sulfida yang paling umum ditemukan dalam batubara. Kedua jenis mineral ini memiliki komposisi kimia (FeS_2) yang sama, namun berbeda sistem kristalnya. Pirit berbentuk isometrik, sedangkan markasit berbentuk ortorombik. Pirit (FeS_2) merupakan mineral yang memiliki proporsi kandungan sulfur yang besar pada batubara, yang lebih dikenal dengan nama sulfur pirit.

2. Sulfur organik

Batubara terdiri dari berbagai elemen struktur makromolekul, salah satunya adalah sulfur organik. Kehadiran unsur ini bergantung pada faktor-faktor seperti konsentrasi tanaman asli. Sulfur organik dapat terakumulasi dalam bahan organik melalui kombinasi degradasi biokimia dan oksidasi. Namun, degradasi biokimia merupakan proses paling signifikan dalam pembentukan sulfur organik, dan berlangsung lebih lambat di lingkungan jenuh air. Kandungan sulfur total diyakini didominasi oleh sulfur yang bukan berasal dari bahan pembentuk batubara. Sulfur anorganik, yang melimpah di lingkungan laut atau air payau, dapat diubah menjadi senyawa hidrogen sulfida dan sulfat melalui proses geokimia. Transformasi ini terjadi ketika

bahan organik mereduksi sulfat menjadi hidrogen sulfida (H_2S), dengan bakteri seperti *desulfovibrio* dan *desulphotomaculum* memulai reaksi reduksi

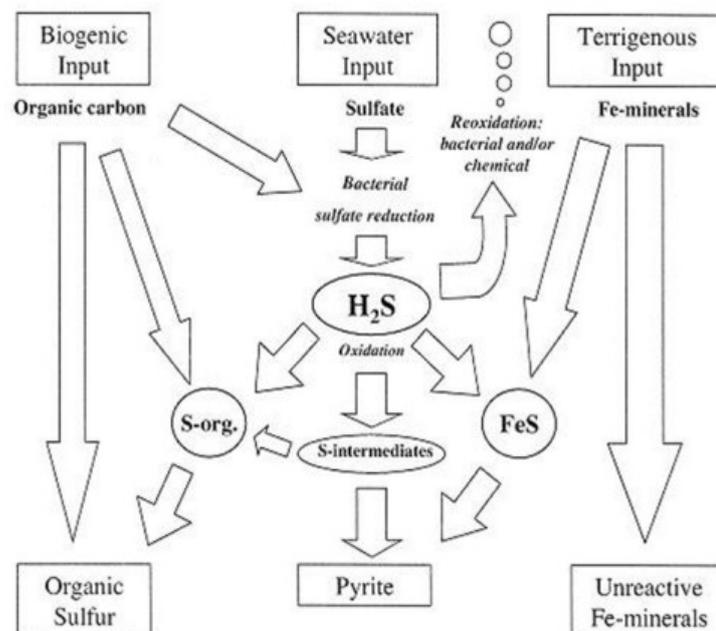


3. Sulfur sulfat

Biasanya, kandungan sulfur sulfat dalam batubara minimal atau tidak ada sama sekali, kecuali batubara tersebut telah mengalami pelapukan dan beberapa mineral piritnya telah teroksidasi menjadi sulfat. Secara umum, area paling bawah lapisan batubara mempunyai jumlah sulfur organik yang lebih tinggi, sedangkan kandungan sulfur pirit dan sulfat akan menonjol baik di bagian atas maupun bawah lapisan batubara.

Selama pembakaran batubara di dalam *boiler*, sulfur atau belerang yang ada di dalam batubara terbakar dan menghasilkan gas sulfur dioksida (SO_2), dengan sejumlah kecil sulfur berubah menjadi sulfur trioksida (SO_3). SO_2 dapat menyebabkan iritasi pernapasan, mengurangi jarak pandang, dan menyebabkan sesak napas, dan dalam kasus yang parah dapat menyebabkan kematian. Saat SO_2 bereaksi dengan kelembapan atau hujan, maka akan terbentuk hujan asam yang dapat membahayakan manusia, hewan, dan tumbuhan, serta sifat korosifnya dapat merusak infrastruktur yang ada. Sulfur trioksida yang memiliki reaktivitas tinggi dengan air, dapat menghasilkan asam sulfat, senyawa berbahaya dan korosif (Thomas, 2020).

Gambar 2 menunjukkan proses pembentukan sulfur pada batubara yang sangat dipengaruhi oleh reaksi reduksi sulfat bakteri baik dari sumber biogenik maupun air laut.



Gambar 2 Pembentukan sulfur pada batubara (Annisa, 2016)



2.4 Desulfurisasi Batubara

Belerang merupakan unsur berbahaya dalam batubara dan menyebabkan pencemaran lingkungan, kerusakan peralatan, dan keracunan katalis. Batubara dengan kandungan sulfur yang tinggi selama penggunaannya menghasilkan banyak zat sulfur yang menyebabkan hujan asam, kabut asap dan pencemaran lingkungan ekologi lainnya. Teknologi pembersihan batubara telah menjadi penghubung utama dalam pengendalian pencemaran lingkungan akibat pembakaran batubara. Oleh karena itu, desulfurisasi batubara merupakan bagian penting dari proses batubara bersih. Meskipun terdapat penelitian dan studi ekstensif mengenai penggunaan metode fisik dan kimia dalam kondisi produksi, permasalahan ini belum terselesaikan, terutama penghilangan sulfur organik, yang terus menjadi hambatan dalam penggunaan batubara bersih di seluruh dunia. Teknologi desulfurisasi fisik, kimia, dan biologis dapat mencapai tujuan menghilangkan sulfur dari batubara, namun efek desulfurisasinya sangat berbeda (Tang *et al*, 2022).

Desulfurisasi adalah proses pengurangan kandungan sulfur pada batubara. Kandungan sulfur dapat menyebabkan pencemaran lingkungan, kerusakan (korosi) dan memperpendek masa pakai alat. Batubara dapat digunakan sebagai bahan bakar dengan terlebih dahulu dilakukan proses desulfurisasi. Desulfurisasi batubara diperlukan tidak hanya untuk meminimalkan pencemaran lingkungan akibat emisi sulfur dioksida selama pembakaran, tetapi juga untuk meningkatkan kualitas batubara (Ehsani, 2006). Desulfurisasi batubara sebelum pembakaran dilakukan dengan cara fisik, kimia atau biologi. Metode fisik hanya dapat menghilangkan partikel pirit berukuran besar. Namun, metode biologis memakan waktu karena beberapa bakteri secara spesifik hanya menghilangkan jenis sulfur tertentu. Teknik desulfurisasi batubara yang paling efektif didasarkan pada metode kimia, dimana hampir seluruh sulfur pirit dan sejumlah besar sulfur organik dihilangkan dari batubara (Kasim, 2023).

Proses desulfurisasi batubara dapat dilakukan dengan berbagai macam cara yang berbeda yaitu (Maidi, 2020):



• cara fisika

Desulfurisasi fisika batubara mengacu pada proses menghilangkan sulfur dari batubara tanpa mengubah komposisi kimianya. Artinya sulfur

dihilangkan secara fisik tanpa mengubah struktur atau komposisi kimia batubara itu sendiri. Beberapa metode fisika yang umum digunakan untuk desulfurisasi batubara meliputi flotasi, pemisahan gravitasi, perlakuan panas, pemisahan magnetik, dan penyortiran. Derajat desulfurisasi batubara dengan metode fisik bisa mencapai 50-80%, tetapi sulfur organik tidak dapat dihilangkan. Desulfurisasi fisik telah digunakan secara luas di industri pertambangan dan pembangkit listrik. Namun, tantangan lingkungan dan regulasi yang semakin ketat mendorong perkembangan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Penelitian dan pengembangan terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan dan mengurangi konsumsi sumber daya. Beberapa inovasi terbaru termasuk penggunaan teknologi canggih seperti pemisahan magnetik dengan medan magnet tinggi, serta pengembangan bahan kimia pengapung yang lebih efektif dan ramah lingkungan untuk flotasi. Selain itu, kombinasi metode fisik dengan metode kimia atau biologis juga sedang dieksplorasi untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan desulfurisasi. Misalnya, penggunaan metode kimia untuk mengubah sulfur organik menjadi bentuk yang lebih mudah dipisahkan secara fisik atau pengolahan biologis untuk degradasi sulfur organik setelah pemisahan fisik dapat memberikan solusi yang lebih komprehensif. Desulfurisasi fisik batubara memiliki sejumlah keuntungan yang menjadikannya pilihan populer dalam industri. Salah satu keuntungannya adalah ekonomis; metode ini biasanya lebih murah dibandingkan dengan desulfurisasi kimia atau biologis karena tidak memerlukan bahan kimia mahal atau peralatan canggih. Selain itu, metode fisik seperti pemisahan gravitasi, flotasi, dan pemisahan magnetik cukup sederhana untuk diterapkan, sehingga mudah diintegrasikan dalam operasi pertambangan dan pembangkit listrik yang sudah ada. Metode ini juga sangat efektif untuk menghilangkan sulfur piritik dan sulfat, yang merupakan bentuk sulfur yang paling umum ditemukan dalam batubara dan dapat dipisahkan secara mekanis. Dengan demikian, desulfurisasi fisik dapat secara signifikan mengurangi kandungan sulfur dalam batubara, membantu memenuhi standar emisi yang lebih ketat dan mengurangi



dampak lingkungan negatif seperti hujan asam. Namun, desulfurisasi fisik juga memiliki keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Salah satu keterbatasan utamanya adalah ketidakmampuannya untuk menghilangkan sulfur organik, yang terikat dalam struktur molekul batubara. Metode fisik tidak dapat memutus ikatan kimia ini, sehingga sebagian sulfur tetap ada dalam batubara setelah pemrosesan. Efisiensi pemisahan juga dapat dipengaruhi oleh ukuran partikel dan distribusi sulfur dalam batubara, sehingga tidak semua batubara dapat diolah dengan efektivitas yang sama. Selain itu, beberapa proses fisik, seperti flotasi dan pemisahan gravitasi, memerlukan penggunaan air dalam jumlah besar, yang bisa menjadi masalah di daerah dengan keterbatasan sumber daya air. Pengolahan air limbah dan manajemen limbah padat yang dihasilkan juga memerlukan perhatian khusus untuk menghindari dampak lingkungan lebih lanjut. Meskipun demikian, dengan inovasi teknologi dan kombinasi dengan metode lain, banyak dari keterbatasan ini dapat diatasi untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan desulfurisasi batubara secara fisik.

2. Secara kimia

Desulfurisasi kimia batubara adalah proses menghilangkan sulfur dari batubara dengan mengubah komposisi kimianya. Selama proses ini, senyawa sulfur dalam batubara diubah menjadi bentuk yang lebih mudah dipisahkan atau dihilangkan. Metode kimia ini berfokus pada perubahan komposisi kimia batubara dengan cara mengurangi kandungan sulfur atau mengubah bentuk senyawa sulfur yang ada. Pilihan metode tergantung pada jenis batubara, tujuan desulfurisasi dan teknologi yang tersedia. Desulfurisasi batubara penting untuk mengurangi dampak lingkungan dan memenuhi persyaratan emisi, khususnya yang berkaitan dengan pembangkit listrik tenaga batubara. Penggunaan metode pengolahan kimia dapat menghilangkan sulfur organik, namun metode ini seringkali memerlukan suhu tinggi, tekanan tinggi, oksidasi kuat, dan kondisi intensif lainnya.

ersyaratan ini dapat menimbulkan masalah seperti biaya operasional yang tinggi, nilai kalori batubara yang lebih rendah, dan emisi karbondioksida yang tinggi.



3. Secara biologi

Kehidupan bakteri pada permukaan mineral memegang peranan yang sangat penting tidak hanya pada kehidupan bakteri di alam, namun bisa juga digunakan di industri pertambangan. Salah satu bakteri yang digunakan dalam industri pertambangan adalah bakteri pengoksidasi besi dan sulfur yaitu *Thiobacillus ferrooxidans*. Bakteri ini dapat meningkatkan oksidasi dan pembubaran pirit, serta dapat menghilangkan sulfur organik dalam batubara. Mengurangi kandungan sulfur dengan cara biologis disebut biodesulfurisasi, yaitu metode yang menggunakan organisme atau bakteri. Dibandingkan dengan metode lain, desulfurisasi biologis menawarkan kondisi reaksi yang lebih ringan yang biasanya terjadi pada suhu dan tekanan sekitar, sehingga membantu mengurangi pencemaran lingkungan. Selain itu, strain tertentu dapat secara selektif menghilangkan berbagai bentuk sulfur dari batubara tanpa mempengaruhi nilai kalorinya, namun pada desulfurisasi cara biologis mempunyai kelemahan yaitu bakteri hanya dapat mengoksidasi sulfur dalam bentuk tertentu.

2.5 Asam Oksalat

Asam oksalat dibuat pertama kali pada tahun 1776 oleh Carl W. Scheele dengan cara mengoksidasi gula menggunakan asam nitrat dari tanaman *sorrel*. Gay Lussac menemukan bahwa asam oksalat dapat diproduksi dengan cara meleburkan serbuk gergaji dalam larutan alkali. Asam oksalat adalah senyawa asam dikarboksilat yang setiap atom karbonnya terikat pada gugus hidroksil. Asam ini mempunyai bentuk kristal piramidal berbentuk berlian, transparan, tidak berwarna, tidak berbau, dan higroskopis. Asam oksalat mudah teroksidasi sempurna di bawah pengaruh panas tinggi dan terurai menjadi CO_2 dan asam formiat. Asam oksalat dapat digunakan sebagai bahan peledak, pembuatan zat warna, krayon, industri lilin, tinta, bahan kimia dalam fotografi serta untuk keperluan analisis laboratorium. Pada industri logam, asam oksalat dipakai sebagai bahan pelapis yang melindungi logam dari anoda pembersih untuk radiator otomotif (Febriaty dkk., 2016). Pembuatan komersial asam oksalat dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya oksidasi selulosa dengan basa kuat, oksidasi glukosa menggunakan asam kuat,



dan pembuatan dari Natrium Format. Asam oksalat terdistribusi secara luas dalam bentuk garam *pottasium* dan kalsium yang terdapat pada daun, akar dan *rhizoma* dari berbagai macam tanaman. Asam oksalat juga terdapat pada air kencing manusia dan hewan dalam bentuk garam kalsium yang merupakan senyawa terbesar dalam ginjal (Sitompul dan Surya, 2018).

Asam oksalat ($C_2H_2O_4$) digunakan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk dalam pengolahan bahan galian (mineral). Berikut adalah beberapa penggunaan asam oksalat dalam pengolahan bahan galian:

1. Pembersihan dan pemurnian mineral

Asam oksalat digunakan untuk membersihkan dan memurnikan berbagai mineral dengan cara melarutkan kotoran atau pengotor yang menempel pada permukaan mineral. Misalnya, dalam pemurnian bijih besi, asam oksalat dapat digunakan untuk menghilangkan oksida besi (karat) dari permukaan bijih.

2. Pengolahan bijih Langkah dan logam tanah jarang

Asam oksalat digunakan dalam pengolahan bijih yang mengandung logam tanah jarang (*rare earth elements*). Proses ini melibatkan pelarutan bijih dalam larutan asam oksalat untuk membentuk kompleks oksalat yang larut, yang kemudian dapat dipisahkan dan diendapkan kembali untuk memperoleh logam yang diinginkan.

3. Flotasi mineral

Pada proses flotasi, asam oksalat digunakan sebagai agen pengkondisi atau pengubah permukaan mineral tertentu agar lebih mudah terpisah dalam proses flotasi. Flotasi adalah teknik pemisahan mineral yang berdasarkan pada perbedaan sifat permukaan antara partikel mineral yang diinginkan dan pengotor.

4. Pemisahan mineral spesifik

Asam oksalat dapat digunakan untuk pemisahan spesifik mineral tertentu dari bijih kompleks. Misalnya, dalam pemisahan mineral tungsten, asam oksalat dapat digunakan untuk melarutkan dan memisahkan *scheelite* ($CaWO_4$) dari mineral lain dalam bijih.



5. Pengendapan kalsium

Pada beberapa proses pengolahan mineral, asam oksalat digunakan untuk mengendapkan kalsium sebagai kalsium oksalat, yang kemudian dapat dipisahkan dari larutan. Ini berguna dalam pengolahan bijih yang mengandung kalsium sebagai pengotor yang tidak diinginkan.

6. Pengolahan batu permata

Asam oksalat digunakan untuk membersihkan dan memoles batu permata dan kristal. Asam ini dapat menghilangkan noda dan kotoran pada permukaan batu, sehingga meningkatkan kilau dan kejernihan batu permata.

7. Penghilangan oksida logam

Asam oksalat dapat digunakan untuk menghilangkan oksida logam dari permukaan bijih atau logam yang telah teroksidasi. Ini membantu dalam proses pemurnian logam dengan menghilangkan lapisan oksida yang mengganggu.

8. Reagen dalam analisis kimia mineral

Asam oksalat juga digunakan sebagai reagen dalam analisis kimia mineral untuk menentukan kandungan logam tertentu dalam sampel mineral. Ini melibatkan reaksi kimia antara asam oksalat dan logam yang diinginkan, yang kemudian dapat dianalisis secara kuantitatif.

Asam oksalat merupakan asam organik yang paling menjanjikan sebagai pereaksi pelarut karena sumber biologisnya yang murah, kekuatan asam, dan aktivitas kompleksasi yang baik. Asam oksalat merupakan asam padat sehingga mudah digunakan dalam proses pelarutannya. Saat ini, asam oksalat dapat diproduksi melalui biofermentasi sumber karbon, sehingga produksi asam oksalat menjadi ekonomis. Pada saat yang sama residu asam oksalat dalam air limbah dapat dengan mudah dihilangkan melalui biodegradasi tanpa polusi. Oleh karena itu, penggunaan asam oksalat sebagai reagen pelindian menjamin keramahan lingkungan (Hu *et al.*, 2017).

