

**ANALISIS PENGARUH LINGKUNGAN PENGENDAPAN
TERHADAP KUALITAS BATUBARA DI DAERAH
BONEHAU PROVINSI SULAWESI BARAT**

*ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE DEPOSITION ENVIRONMENT
ON COAL QUALITY IN THE BONEHAU AREA
OF WEST SULAWESI PROVINCE*



**TRI UTOMO TALIDING
D112201006**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA
2022**

TESIS

ANALISIS PENGARUH LINGKUNGAN PENGENDAPAN TERHADAP KUALITAS BATUBARA DI DAERAH BONEHAU PROVINSI SULAWESI BARAT

TRI UTOMO TALIDING

NIM: D112201006

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Magister Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 9 Desember 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan



Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Dr. phil. nat. Sri Widodo, ST., MT.
NIP. 197101012010121001


Asran Ilyas, ST., MT., Ph.D.
NIP. 197303142000121001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin




Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Pertambangan




Dr. Ir. Irzal Nur, MT.
NIP. 196604091997031002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tri Utomo Taliding
Nim : D112201006
Program Studi : Magister Teknik Pertambangan
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**ANALISIS PENGARUH LINGKUNGAN PENGENDAPAN TERHADAP
KUALITAS BATUBARA DI DAERAH BONEHAU
PROVINSI SULAWESI BARAT**

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

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

Gowa, 9 Desember 2022

Yang menyatakan,



Tri Utomo Taliding

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Peneliti Terdahulu	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Batubara.....	6
2.2 Proses Pembentukan Batubara	6
2.3 Maseral	7
2.4 Geologi Daerah Penelitian.....	10
2.3.1 Geomorfologi	10
2.3.2 Struktur Geologi.....	11
2.3.3 Stratigrafi.....	12
2.5 Tipe Lingkungan Pengendapan	14
2.6 Penentuan Lingkungan Pengendapan.....	19
2.7 Analisis Batubara	21
2.6.1 Analisis Proksimat	21

2.6.2	Analisis Ultimat	23
2.6.3	Analisis Total Sulfur	24
2.6.4	Nilai Kalori.....	29
2.6.5	Analisis Maseral.....	31
2.6.6	Reflektansi Vitrinit.....	31
2.6.7	Analisis Mineralogi.....	32
2.8	Klasifikasi batubara berdasarkan peringkat menurut ASTM D388	39
BAB III METODE PENELITIAN.....		41
3.1	Jenis Penelitian	41
3.2	Lokasi Penelitian dan Kesampaian Daerah	41
3.3	Tahapan Penelitian	42
3.3.1	Tahapan Persiapan	42
3.3.2	Kegiatan Lapangan.....	42
3.3.3	Kegiatan Laboratorium	43
3.3.4	Tahapan Penyusunan Tesis	43
3.4	Teknik Pengumpulan Data	43
3.5	Teknik Analisis Data	44
3.6	Bagan Alir Penelitian	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		48
4.1	Gambaran Umum Lokasi Penelitian	48
4.1.1	Batubara dan batuan pengapit	49
4.2	Analisis Maseral Batubara.....	52
4.3	Nilai Reflektasi Vitrinit dan Rank Batubara	56
4.4	Lingkungan Pengendapan Batubara	57
4.5	Analisis Mineralogi	61

4.5.1. Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> Batubara	61
4.5.2. Analisis Mikroskopis Batubara	63
4.6 Analisis Proksimat.....	66
4.7 Analisis Total Sulfur	68
4.7.1 Total sulfur batubara dan batuan pengapit stasiun A.....	68
4.7.2 Total sulfur batubara dan batuan pengapit stasiun B	69
4.8 Analisis Nilai Kalori.....	71
4.9 Hubungan lingkungan pengendapan dan Kualitas Batubara.....	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	78
6.1 Kesimpulan.....	78
6.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN.....	89

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1. Skema pembentukan batubara (Pajares <i>and</i> Díez, 2014).	7
2.2. Ilustrasi Perkembangan jaringan tanaman dan jamur serta material yang terbakar dari permukaan gambut melalui peatifikasi dan batubara untuk menghasilkan kelompok maseral (Dai et al.,2020)	8
2.3. Peta Geologi Daerah Mamuju (Sumber Hermiyanto, 2010. modifikasi dari Ratman dan Atmawinata, 1993).	12
2.4. Kolom Stratigrafi Regional Sulawesi Barat (Calvert, 1999)	14
2.5. Diagram fasies pengendapan batubara menggunakan indeks GI dan TPI (Diessel., 1986).	21
2.6. Mekanisme pembentukan pirit framboidal dan sulfur organik pada batubara yang dipengaruhi oleh air laut (Speight, 2013).	28
2.7. Sistem peringkat batubara (UN-ECE, 1998, modifikasi dari <i>Kentucky Geological Survey</i>).	29
2.8. Contoh Fotomikrograf Sampel Batubara.	38
3.1. Lokasi daerah penelitian	41
3.2. Bagan alir penelitian	47
4.1. Peta lokasi pengambilan sampel	48
4.2. Batubara dan batuan pengapit (overburden dan underburden) pada stasiun A.	49
4.3. Batubara, batuan pengapit (overburden dan underburden) pada stasiun B.	51
4.4. Diagram hasil analisis maseral	54
4.5. Fotomikrograf maseral batubara di daerah penelitian.	55
4.6. Hasil plotting pada diagram TPI-GI (dimodifikasi dari Diessel, 1986, dalam Lamberson, 1991).	59
4.7. Rekonstruksi lingkungan pengendapan daerah penelitian (Modifikasi dari Horne 1978).	60

4.8. Rekonstruksi kondisi hidrologi lingkungan pengendapan daerah penelitian (modifikasi dari Edress <i>and</i> Sýkorová, 2007).....	60
4.9. Difraktogram hasil uji XRD pada sampel BNH01-PL01 dan BNH01-PL02.....	62
4.10. Difraktogram hasil uji XRD pada sampel BNH02-PL01 dan BNH02-PL02.....	63
4.11. Fotomikrograf batubara.	64
4.12. Hasil analisis MC, Ash, VM, FC batubara Desa Tamalea, Kecamatan Bonehau, Kabupaten Mamuju	67
4.13. Total sulfur batubara dan batuan pengapit stasiun A secara vertikal.	69
4.14. Total sulfur batubara dan batuan pengapit stasiun A secara vertikal.	70
4.15. Diagram hasil analisis nilai kalori batubara.....	73
4.16. Grafik Perbandingan nilai kalori basis <i>as-received</i> (<i>ar</i>) ke basis <i>moisture</i> , <i>mineral matter</i> (<i>m,mmf</i>)	77

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1. Klasifikasi maseral pada batubara (AS 2856, 1986)	10
2.2. Lingkungan pengendapan utama pembentuk batubara (Diessel, 1992). ...	16
2.3. Komposisi untuk peringkat batubara (Speight, 2015)	24
2.4. Konversi satuan nilai kalori (Miller, 2013)	30
2.6. Peringkat batubara berdasarkan nilai reflektansi vitrinit (Ward, 1984; dalam Widodo dan Antika, 2012; Thomas L., 2013)	32
2.7. Sifat-sifat optik beberapa mineral yang umum terdapat pada batubara (Falcon and Snyman., 1986).....	37
2.8. Klasifikasi batubara berdasarkan peringkat (ASTM D388-19a)	40
4.1. Hasil analisis maseral group <i>vitritinite (huminitite)</i> , (<i>Australian Standart 2856 (1986) dan ASTM (2009)</i>).....	52
4.2. Hasil analisis maseral group <i>inertinite</i> , (<i>Australian Standart 2856 (1986) dan ASTM (2009)</i>).....	53
4.3. Hasil analisis maseral, (<i>Australian Standart 2856 (1986) dan ASTM (2009)</i>)	53
4.4. Hasil pengukuran reflektasi vitrinit dan rank batubara, (<i>Australian Standart 2856 (1986) dan ASTM (2009)</i>)	56
4.5. Nilai TPI dan GI hasil analisis maseral	57
4.6. Hasil analisis <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> batubara di daerah penelitian.....	61
4.7. Hasil analisis proksimat batubara pada daerah penelitian (<i>ASTM D3172-13</i>)	66
4.8. Data persentase total sulfur batubara dan batuan pengapit stasiun A.....	68
4.9. Data persentase total sulfur batubara dan batuan pengapit stasiun B.....	70
4.10. Data persentase total sulfur batubara pada daerah penelitian.....	71
4.11. Hasil analisis nilai kalori batubara	72
4.12. Konversi nilai basis <i>as-received (ar)</i> ke basis <i>moisture, mineral matter (m,mmf)</i>	75

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
1. Lampiran A. Peta situasi lokasi penelitian.....	90
2. Lampiran B. Dokumentasi Penelitian	91
3. Lampiran C. Laporan hasil analisis proksimat	92
4. Lampiran D. Laporan hasil analisis nilai kalori dan total sulfur batubara...	93
5. Lampiran E. Konversi nilai kalori batubara Kcal/Kg ke Btu/Lb	94
6. Lampiran F. Laporan hasil analisis total sulfur batuan pengapit (overburden dan underburden).....	97
7. Lampiran G. Hasil analisis mikroskopis sampel BNH01_PL01 menggunakan <i>Nikon Eclipse LV10</i>	98
8. Lampiran H. Hasil analisis mikroskopis sampel BNH01_PL02 menggunakan <i>Nikon Eclipse LV10</i>	99
9. Lampiran I. Hasil analisis mikroskopis sampel BNH02_PL01 menggunakan <i>Nikon Eclipse LV10</i>	100
10. Lampiran J. Hasil analisis mikroskopis sampel BNH02_PL02 menggunakan <i>Nikon Eclipse LV10</i>	101
11. Lampiran K. Laporan hasil analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) sampel BNH01_PL01	102
12. Lampiran L. Laporan hasil analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) sampel BNH01_PL02	108
13. Lampiran M. Laporan hasil analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) sampel BNH02_PL01	114
14. Lampiran N. Laporan hasil analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) sampel BNH02_PL02	120
15. Lampiran O. Hasil Analisis Petrografi Maseral dan <i>Reflectance</i> <i>Vitrinite</i>	125
16. Lampiran P. Hasil Perhitungan TPI dan GI	134
17. Lampiran Q. Daftar Istilah.....	136
18. Lampiran R. Daftar Singkatan dan lambang.....	147

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Setiap lapisan batubara memiliki karakteristik kualitas batubara yang berbeda yang ditentukan oleh kombinasi sejumlah faktor baik lingkungan pengendapan, kondisi iklim dan hidrologi yang merupakan faktor dominan yang mengendalikan tahap awal pembentukan batubara, sedangkan coalification juga dapat dipengaruhi oleh tektonik, intrusi magmatik dan faktor lainnya. Dalam klasifikasi peringkat U.S ASTM batubara dibagi dalam tiga peringkat yaitu batubara peringkat rendah dengan kalori 2.777–6.388 Kcal/kg, peringkat sedang dengan kalori 6.388–7.777 Kcal/kg, dan peringkat tinggi dengan kalori >7.777 Kcal/kg. Beberapa contoh batubara yang terdapat di Indonesia berdasarkan hasil penelitian yang menunjukkan kualitas dan lingkungan pengendapannya, seperti lapisan batubara “D” Formasi Muara Enim yang berdasarkan hasil penelitian terendapkan pada lahan basah sub-akuatik yang tidak terpengaruh oleh air laut yaitu pada lingkungan pengendapan limnik, dengan kalori 7.995–8.164 Kcal/kg batubara tersebut terendapkan di Cekungan Sumatera Selatan berumur Miosen Tengah sampai Miosen Akhir (Salinita dan Bahtiar., 2014; Purnama dkk., 2018). Pada contoh selanjutnya batubara termasuk peringkat subbituminus hingga high *volatile bituminous C* dengan kalori berkisar 5.829–7.217 Kcal/kg dimana batubara terendapkan pada lingkungan *lower delta plain* batubara tersebut berada pada Formasi Purukcahu di daerah Murung Raya, Kalimantan Tengah termasuk ke dalam Cekungan Barito (Rahim dkk., 2018). Contoh batubara peringkat rendah terdapat pada formasi Meliat berumur Miosen Tengah, di Kabupaten Nunukan, Kalimantan Utara, dari hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan batubara memiliki peringkat lignit, yaitu dengan kalori berkisar 2.777–4.068 Kcal/kg, dari hasil penelitian tersebut batubara terendapkan pada kondisi lingkungan pengendapan *telmatic* dan *limno-telmatic*, lahan gambut clastic marsh dan wet forest swamp, serta berada pada lingkungan lower delta plain (Qadaryati dkk., 2019).

Jenis batubara mencerminkan lingkungan pengendapan pada saat gambut terakumulasi. Diagenesis dan metamorfisme batubara, yang secara kolektif disebut sebagai *Coalification*, adalah pengaruh temperature dan tekanan yang bekerja dari waktu ke waktu dan diukur sebagai peringkat batubara. *Coalification* melibatkan transformasi fisik dan kimiawi dari gambut melalui lignit dan batubara *subbituminous*, menjadi batubara *bituminous*, dan melalui batubara bitumen menjadi antrasit dan metaantrasit, dan mendekati grafit (O'Keefe *et al.*, 2013).

Penyelidikan batubara yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti menggunakan analisis proksimat dan total sulfur dalam menentukan kualitas batubara (Widodo *et al.*, 2016). Sulfur adalah salah satu faktor penting yang terkait dengan lingkungan pengendapan batubara, dalam hal ini kandungan sulfur yang terkandung dalam batubara diharapkan menjadi minimal skarena dapat menyebabkan polusi udara dan penurunan kualitas batubara. (Sari *et al.*, 2017). Dalam kebanyakan kasus hubungan antara kandungan sulfur di lapisan batubara dan lingkungan pengendapan batubara yaitu batubara dengan sulfur rendah terbentuk di lingkungan fluvial dan batubara sulfur tinggi diendapkan di lingkungan yang terpengaruh air laut karena ketersediaan sulfat pada air laut (Chou, 2012; Widodo *et al.*, 2016). Namun adanya batuan sulfat dan mineralisasi sulfida yang intensif di dalam daerah tangkapan air juga dapat berkontribusi pada pembentukan sulfur yang tinggi batubara dalam kondisi lingkungan air tawar (Toprak *et al.*, 2015)

Penyelidikan lapangan yang telah dilakukan pada daerah Bonehau dan sekitarnya meberikan informasi terdapatnya lapisan batubara dari Formasi Toraja berumur Eosen. Batubara yang ditemukan secara megaskopis berwarna hitam kecoklatan hingga hitam, gores-garis coklat hingga hitam, agak kusam hingga mengkilap keras, renyah (*brittle*), belahan konkoidal dan rekahan pada batubara terlihat jelas dengan ketebalan lapisan batubara berkisar antara 0,20–4,75 meter (Ibrahim dan Fatimah, 2015). Kualitas batubara dapat dijadikan parameter untuk menentukan potensi penggunaannya. Batubara yang diendapkan dalam beberapa lingkungan pengendapan berbeda memungkinkan adanya perbedaan kualitas batubara yang dihasilkan. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh lingkungan pengedapan terhadap kualitas batubara.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan sebelumnya terdapat beberapa masalah yang mendasari rencana penelitian ini:

1. Komposisi maseral dan mineral dapat memberikan informasi setting lingkungan pengendapan batubara di daerah penelitian.
2. Keterdapatannya sumberdaya batubara di daerah Bonehau merupakan potensi yang perlu diteliti untuk mengetahui informasi kualitas pada batubara di daerah penelitian.
3. Lingkungan pengendapan batubara merupakan parameter yang mengontrol dan bertanggungjawab terhadap kualitas batubara.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan untuk mencapai suatu tujuan, yaitu:

1. Menganalisis dan menentukan lingkungan pengendapan batubara berdasarkan komposisi maseral dan mineral
2. Mengidentifikasi dan menganalisis kualitas batubara di daerah penelitian.
3. Menganalisis pengaruh lingkungan pengendapan terhadap kualitas batubara di daerah penelitian.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai lingkungan pengendapan batubara dan kualitas batubara yang terdapat di daerah penelitian, sehingga diharapkan dapat memberikan manfaat ke beberapa bidang seperti:

1. Manfaat dalam bidang akademik: penelitian ini dapat dijadikan sebagai salah satu bahan referensi untuk penelitian yang relevan maupun penelitian yang berada pada satu lokasi yang sama.
2. Manfaat untuk bidang usaha pertambangan: Penelitian ini dapat dijadikan sebagai acuan untuk proses ataupun pengembangan kegiatan eksplorasi dan pertimbangan menuju ke tahapan kegiatan eksploitasi.

1.5 Peneliti Terdahulu

Beberapa peneliti terdahulu yang menjadi referensi dan rujukan dalam penelitian ini yaitu:

1. Chou (2012) melaporkan bahwa variasi kandungan sulfur pada batubara dikontrol oleh kondisi geologi selama pembentukan batubara. Air laut merupakan sumber utama sulfur, batubara dengan sulfur rendah terbentuk di lingkungan fluvial dan batubara sulfur tinggi diendapkan di lingkungan yang terpengaruh air laut karena ketersediaan sulfat pada air laut. Spesifikasi senyawa sulfur organik dalam batubara tampaknya terkait dengan peringkat batubara; senyawa tiofenik lebih melimpah pada batubara bituminus dan antrasit dibandingkan pada batubara peringkat rendah.
2. O'Keefe *et al.*, (2013) melaporkan bahwa jenis batubara berhubungan langsung dengan lingkungan pembentukan gambut, iklim pembentukan gambut, dan proses dekomposisi gambut. Secara umum, jenis batubara dapat diartikan sebagai batubara humik atau sapropelik.
3. Widodo *et al.*, (2016) penelitian yang dilakukan menyatakan bahwa kandungan sulfur dan abu batubara memiliki peran penting untuk pertimbangan eksploitasi pemanfaatan batubara. Dari hasil analisis pada sampel batubara dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat hubungan yang signifikan antara kandungan abu dan sulfur pada sampel batubara. Hal ini mungkin disebabkan oleh perbedaan afinitas unsur sulfur dalam batubara. Kandungan sulfur yang tinggi pada batubara ini diyakini disebabkan oleh pengendapan deposit batubara di lingkungan laut dangkal (dipengaruhi oleh Formasi Batugamping Tonasa).
4. Sari *et al.*, (2017) melaporkan bahwa nilai rata-rata reflektansi vitrinite (Rv) batubara di daerah penelitian (0,54%). Hasil analisis menunjukkan bahwa batubara di Formasi Muara Enim pada daerah penelitian ini menunjukkan batubara berada pada lingkungan pengendapan *lower delta plain*, dimana setiap perubahan lingkungan pengendapan yang dipengaruhi oleh air laut akan mengalami perubahan peningkatan total sulfur dan kadar abu juga mengalami peningkatan, serta sebaliknya nilai kalori batubara yang dihasilkan semakin rendah.

5. Toprak *et al.*, (2015) melaporkan bahwa untuk mengetahui komposisi petrografi dan penentuan lingkungan pengendapan batubara, perlu dilakukan analisis petrografi dan *XRD* pada sampel batubara. Dalam penelitiannya *GI (gelification index)* dan *TPI (tissue preservation index)* menunjukkan lingkungan limnic dan titik sampel terletak di antara rawa terbuka dan rawa klastik pada Diagram *TPI* dan *GI*. Kasus ini menunjukkan bahwa tabel air bervariasi selama pembentukan batubara dan komposisi mineral menunjukkan air rawa yang kaya alkali, sulfat dan Ca. Arus masuk Cairan hidrotermal ke dalam lapisan batubara melalui patahan dan retakan dapat menjadi sumber kemungkinan kondisi alkali kaya sulfat dan Ca. Selain itu, keberadaan material vulkanik kemungkinan besar mempengaruhi komposisi mineral dan kondisi lingkungan pengendapan.
6. Ibrahim dan Fatimah (2015) memberikan informasi dalam penelitian yang telah dilakukan bahwa Formasi Toraja yang mengandung batubara di daerah penelitian berumur Eosen. Lingkungan fluvial sampai laut merupakan tempat terbentuknya Formasi Toraja. Rekahannya terlihat jelas, dan batubaranya berukuran megaskopik hitam pekat hingga hitam, sedikit kusam hingga berkilau, dan rapuh. Batubara ini memiliki ketebalan 0,20 – 4,75 meter dan nilai kalor 6.000 – 7.000 Kcal/gr (adb).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara adalah batuan sedimen organik gelap dengan sedikit kandungan mineral yang terbentuk dari fosil tumbuhan. Suhu, tekanan, skala waktu geologi, dan lingkungan pengendapan semuanya memiliki dampak keseluruhan pada proses pembentukan batubara. Selain itu, batubara adalah komoditas dengan ekonomi yang sangat baik. Prospek karena potensi yang dimilikinya; Batubara telah lama menjadi komoditas ekonomi yang sangat penting karena merupakan bahan bakar dan sumber bahan kimia. (Pasymi., 2008).

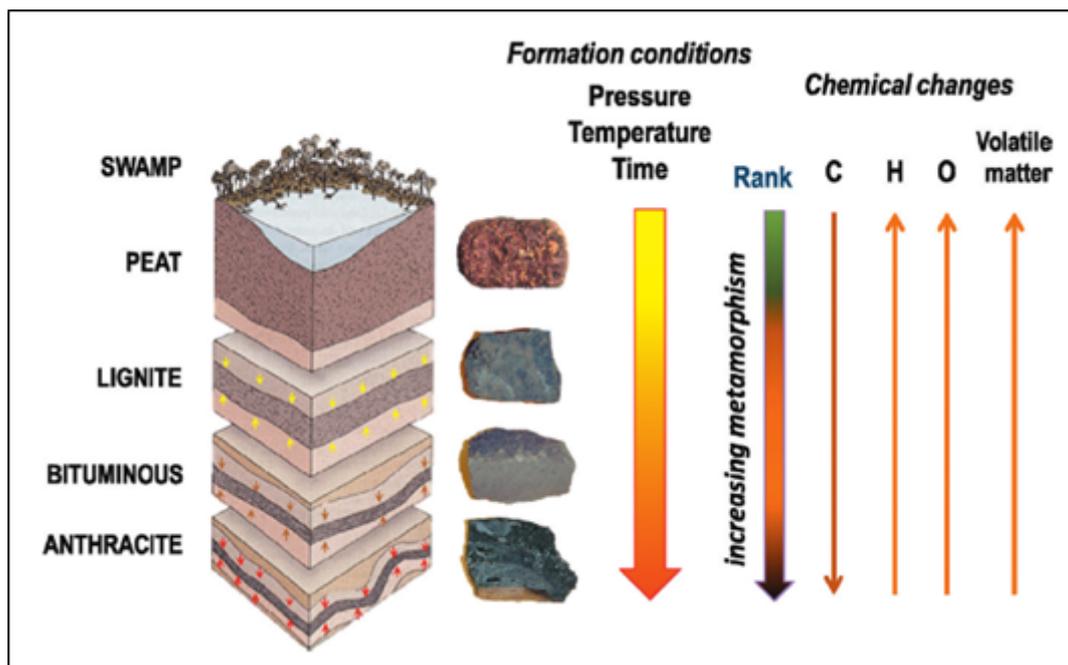
Batubara dapat dianggap sebagai batuan sedimen yang mudah terbakar. Sedangkan mayoritas batuan sebagian besar berasal dari anorganik, batubara sebagian besar terdiri dari bahan organik, sebagian besar berasal dari berbagai sisa tumbuhan (tumbuhan tingkat tinggi, pakis, jamur, dan alga) dan jaringan yang berbeda (daun, batang, batang kayu, kulit kayu, serbuk sari, spora, sklerotia, resin, dll.) dengan konstituen mineral terkait (Pajares *and* Díez., 2014)

2.2 Proses Pembentukan Batubara

Pajares *and* Díez (2014) menuliskan pada tahap pertama evolusi batubara dari material tumbuhan, diagenesis atau *coalification* biokimia, perubahan komposisi melibatkan degradasi dalam lingkungan lembab dari struktur seluler dan kompleks organik tumbuhan melalui aktivitas jamur dan bakteri. Perubahan lebih lanjut adalah tahap geokimia, katagenesis atau *coalification* geokimia, kombinasi dari efek tekanan (akibat sedimen di atasnya) dan terutama panas (penurunan permukaan menyebabkan kenaikan suhu) dalam periode yang lama. Selama *coalification*, temperatur terutama mempengaruhi tingkat transformasi/evolusi yang dialami bahan organik tumbuhan, sedangkan tekanan geologi merupakan faktor utama dalam perkembangan sifat fisik seperti anisotropi dan porositas. Sepanjang proses *coalification* (Gambar 2.1), sisa-sisa tumbuhan asli secara

bertahap diubah menjadi gambut, lignit, batubara subbituminus, batubara bituminus, semiantrasit, dan antrasit.

Tahap alterasi batubara memunculkan konsep *rank* batubara dimana semakin besar alterasinya, semakin tinggi *rank* batubara tersebut. Jadi, lignit dan subbituminus disebut batubara peringkat rendah, bituminus disebut batubara peringkat menengah, sedangkan semiantrasit dan antrasit disebut batubara peringkat tinggi. Batubara dengan kadar yang lebih tinggi dari lignit sering disebut sebagai batubara keras. Selama koalifikasi, evolusi dalam komposisi kimia menyebabkan hilangnya air dan gas (CH₄ dan CO₂) dan, akibatnya, penurunan kandungan hidrogen dan oksigen, penurunan kandungan zat yang mudah menguap, dan pengayaan progresif dalam kandungan karbon (Gambar 2.1).

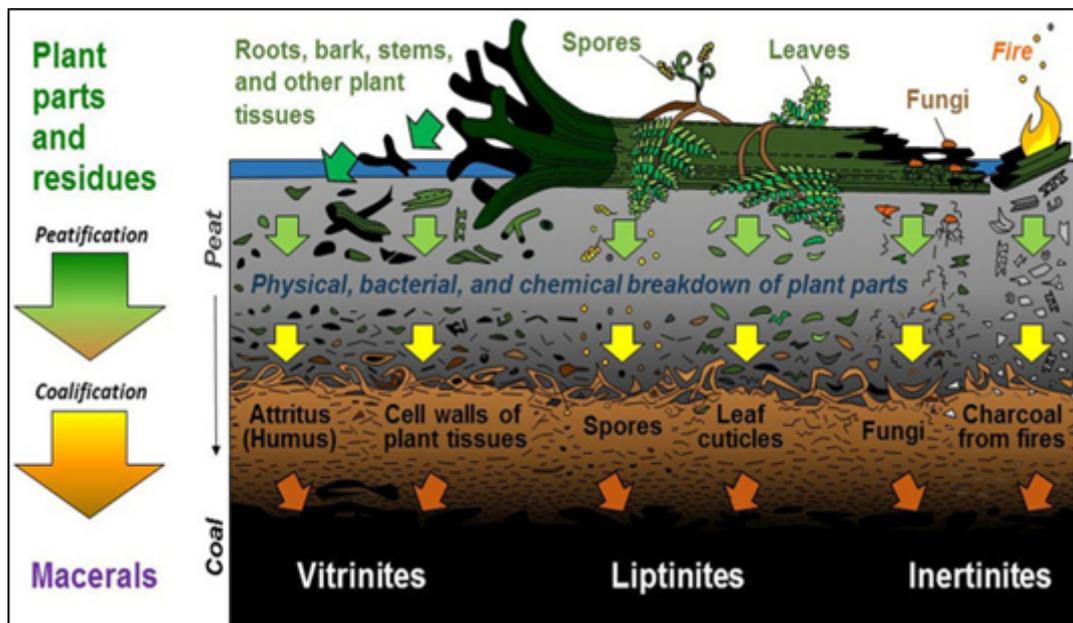


Gambar 2.1 Skema pembentukan batubara (Pajares and Díez, 2014).

2.3 Maseral

Dai *et al* (2020) mengemukakan metode utama kedua untuk mengkarakterisasi biomassa gambut adalah studi tentang maseral. Sisa-sisa organik gambut, terutama yang bersifat botani, disebut maseral. Penampakkannya terdiri dari jaringan tumbuhan yang mendekati aslinya hingga yang telah diubah secara

signifikan oleh transformasi kimia, fisik, dan biologis sebelum, selama, dan setelah penggabungannya ke dalam gambut, serta selama tahap peatifikasi dan pembentukan batubara (Gambar 2.1). Secara umum maseral dapat diperhatikan dan digunakan untuk mendemonstrasikan pengelompokan batubara pada berbagai skala, mulai *macroscopic* (litotipe batubara), *mesoscopic* hingga *microscopic* (penyebaran maseral).



Gambar 2.2 Ilustrasi Perkembangan jaringan tanaman dan jamur serta material yang terbakar dari permukaan gambut melalui peatifikasi dan batubara untuk menghasilkan kelompok maseral (Dai et al.,2020)

Maseral memiliki ciri-ciri batas reflektivitas tertentu sejauh reflektivitas skala abu-abu, dan sebagian didasarkan sesuai dengan afinitas tanaman dari bagian biotik tanaman asli yang tersisa (Taylor *et al.*, 1998). Struktur huminit dan vitrinit dari jaringan berkayu, yang sebagian besar mungkin dalam kondisi utuh atau tergelifikasi, dan menunjukkan rangkaian reflektif rendah hingga sedang (Sýkorová *et al.*, 2005; ICCP., 1998), istilah huminit biasanya digunakan untuk menggambarkan maseral dalam batubara lignit atau subbituminus dan istilah vitrinit digunakan untuk menggambarkan maseral dalam batubara bituminous atau peringkat antrasit. Maseral liptinite, umumnya reflektivitas sangat rendah, meskipun fakta bahwa mereka menjadi lebih pintar dengan peringkat yang

meningkat, diperoleh dari jaringan tanaman yang kaya lipid, seperti kulit kuku, gabus, spora, debu, dan pitches (Pickel *et al.*, 2017). Maseral Inertinit terbentuk dari berbagai jaringan tumbuhan yang terbakar, diubah, dan teroksidasi dari jamur dan bakteri (ICCP., 2001). Bahan tanaman juga dapat teroksidasi oleh bahan jamur selama tahap penggabutan, yang selanjutnya merusak dan mungkin membuat butiran bahan organik (Moore *et al.*, 1996a, b).

Kompleksitas jaringan tumbuhan atau maseral ini dapat terlihat jelas dalam penyelidikan endapan gambut saat ini. Struktur tanaman gambut dapat terlihat secara makroskopis, namun khususnya pada struktur gambut yang sangat padat, pengamatan dengan analisis petrografi adalah hal yang umum dan efektif dilakukan. Segmen tipis dan area mikrotom yang diamati dengan menggunakan cahaya yang ditransmisikan memungkinkan jaringan tanaman dapat diidentifikasi dengan tingkat ketelitian yang tinggi (Cohen *et al.*, 1984, 1999a,b). Pengamatan ini memungkinkan penilaian insitu terhadap sisa-sisa tanaman gambut yang halus, tetapi hasilnya sulit dibandingkan dengan yang diperoleh melalui petrografi cahaya pantul (Dai *et al.*, 2020).

Perbedaan antara maseral jauh lebih mudah dikenali pada peringkat lignit batubara *low rank* dan batubara *subbituminous* daripada pada batubara *high volatile bituminous*. Pada batubara *low volatile bituminous* dan peringkat yang lebih tinggi, maseral liptinite tidak dikenali secara efektif; perbedaan dalam reflektansi *random* antara inertinite, vitrinite, dan liptinite berkurang; dan permukaan maseral vitrinit dan subkelompok maseral bisa sulit untuk dilihat. Akan tetapi, liptinit terlihat dalam antrasit, seperti yang terlihat oleh sporinit di antrasit Pennsylvania (Dai *et al.*, 2020).

Menurut Taylor *et al.*, (1998) semua maseral diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok maseral (Tabel 2.1), yang biasanya digunakan untuk memberikan gambaran umum tentang komposisi maseral. Pengelompokan ini didasarkan pada bentuk, morfologi, ukuran, relief, struktur (*internal struktur*), kesamaan komposisi kimia, warna pantulan, dan intensitas refleksi serta tingkat pembatubaraan (*degree of coalification*) (Widodo dan Antika, 2012).

Tabel 2.1 Klasifikasi maseral pada batubara (AS 2856, 1986)

<i>Group Maseral</i>	<i>Subgroup Maseral</i>	<i>Maseral</i>
<i>Vitrinite</i>	<i>Telo-vitrinite</i>	<i>Texnite</i>
		<i>Texto-ulminite</i>
		<i>Eu-ulminite</i>
	<i>Detro-vitrinite</i>	<i>Telocolinite</i>
		<i>Atninite</i>
		<i>Desinite</i>
		<i>Desmocolonite</i>
	<i>Gelo-vitrinite</i>	<i>Corpogelinite</i>
		<i>Porigelinite</i>
		<i>Eugilinite</i>
<i>Liptinite</i>	<i>Sporinite</i>	
	<i>Cutinite</i>	
	<i>Resinite</i>	
	<i>Suberinite</i>	
	<i>Fluorinite</i>	
	<i>Liptodetrinite</i>	
	<i>Exsudatinite</i>	
	<i>Bituminite</i>	
<i>Inertinite</i>	<i>Telo-inertinite</i>	<i>Fusinite</i>
		<i>Semifusinite</i>
		<i>Sclerotinite</i>
	<i>Detro-inertinite</i>	<i>Inertodetrinite</i>
		<i>Micrinite</i>
	<i>Gelo-inertinite</i>	<i>Macrinite</i>

2.4 Geologi Daerah Penelitian

Berdasarkan hasil penyelidikan terdahulu yang telah dilakukan oleh Ibrahim dan Fatimah (2015) menggambarkan keadan geologi daerah penelitian sebagai berikut:

2.3.1 Geomorfologi

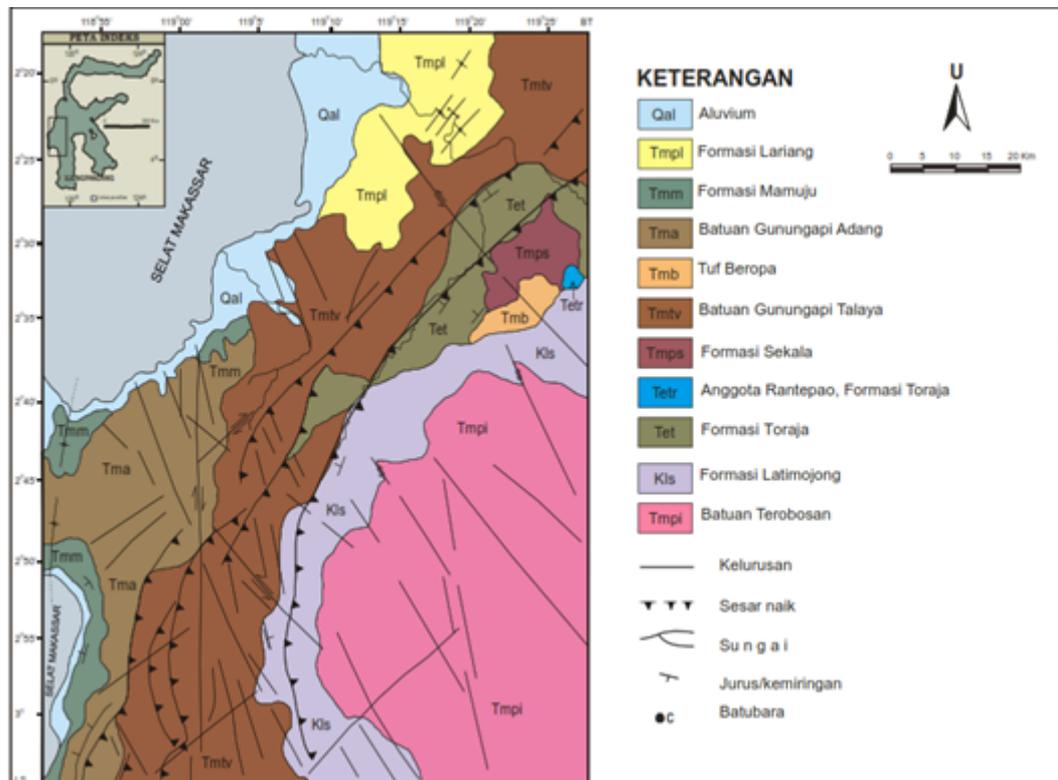
Sebagian besar daerah penelitian merupakan dataran tinggi dan memiliki morfologi dataran dan berbukit. Antara 50 dan 2,050 meter di atas permukaan laut, ketinggiannya bervariasi. Menurut Klasifikasi Bentuk Bumi (Brahmantyo dan Bando., 2006), wilayah studi dibagi menjadi tiga satuan geomorfologi:

- a. Satuan dataran banjir yang mencakup 30 persen wilayah studi dicirikan oleh sungai-sungai besar dengan pola persegi empat dan garis kontur yang longgar. Ketinggian sungai berkisar antara 50 sampai 250 meter di atas permukaan laut, dan sungai ini berbentuk U karena merupakan tahap geomorfik tua yang didominasi oleh erosi lateral.
- b. Satuan bukit vulkanik yang tersisa, yang merupakan 30% dari wilayah studi, ditandai oleh sungai-sungai yang bermuara di sungai-sungai besar berbentuk persegi panjang pada ketinggian 250 hingga 1,050 meter di atas permukaan laut. Sungai-sungai ini berada dalam tahap geomorfik muda dengan banyak erosi vertikal, membuat sungai terlihat seperti huruf V.
- c. Satuan bukit pada zona sesar, yang merupakan 40% wilayah penelitian memiliki pola aliran sungai subdendritik, garis kontur yang agak rapat sampai padat, dan ketinggian 250 sampai 2,050 meter di atas permukaan laut. Ini adalah tahap geomorfik muda dengan banyak erosi vertikal, yang membuat sungai terlihat seperti V.

2.3.2 Struktur Geologi

Sesar normal dan sesar anjak berarah timur laut-barat daya merupakan struktur geologi di daerah penelitian yang mengontrol pengendapan formasi berumur Tersier. Bagian selatan daerah penelitian dipengaruhi oleh Batuan Terobosan dan batuan Pra-Tersier berumur sesar berarah barat laut-tenggara.

Di wilayah Tamalea Lama, lapisan batubara dikelilingi oleh lipatan-lipatan antiklin dan berbentuk sinklin. Lipatan tersebut relatif berorientasi timur laut-barat daya. Beberapa singkapan batuan, seperti batupasir, jelas menunjukkan tanda-tanda struktur geologi. Formasi bantalan batubara di daerah penelitian adalah Formasi Toraja Eosen (Gambar 2.3). Lapisan batubara umumnya berjalan timur laut-barat daya atau barat laut-tenggara. Lapisan batubara memiliki kemiringan 15 sampai 80 derajat.



Gambar 2.3 Peta Geologi Daerah Mamuju (Sumber Hermiyanto, 2010. modifikasi dari Ratman dan Atmawinata, 1993).

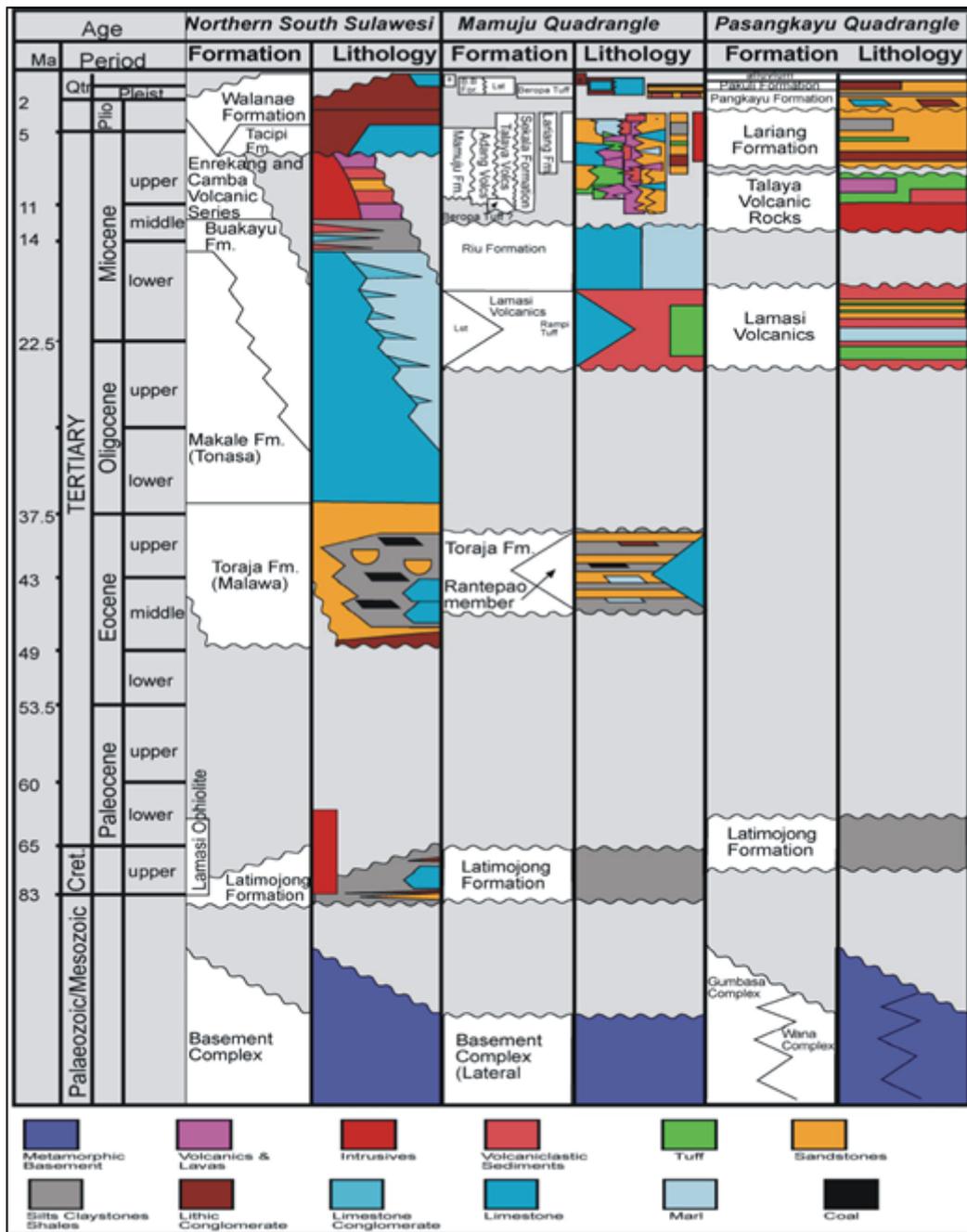
2.3.3 Stratigrafi

Pada batuan sedimen berumur Tersier, penelitian lapangan lebih diutamakan. Pusat pengejaran didedikasikan untuk pengembangan transporter batubara. Di daerah penelitian, ditemukan Formasi Toraja Eosen yang mengandung batubara. Sebaran Formasi Toraja di Bonehau dan sekitarnya diperluas untuk mencocokkan temuan penyelidikan dengan peta geologi regional yang dihasilkan oleh Ratman dan Atmawinata (1993). Batuan Vulkanik Talaya mengandung batubara lokal, yang diinterpretasikan oleh Ratman dan Atmawinata (1993) sebagai batubara dari Formasi Toraja.

Peta geologi Lembaran Mamuju (Gambar 2.3), berfungsi sebagai acuan stratigrafi batuan daerah penelitian, yang berkisar dari purba hingga modern (Ratman dan Atmawinata, 1993), terdapat beberapa Formasi, yaitu:

- a. Formasi Latimajong (Kls), terdiri dari batusabak, kuarsit, *phyllite*, batupasir malih kuarsa, batulanau malih, dan marmer batu lempung lokal malih semuanya yang berasal dari Zaman Kapur.
- b. Formasi pembawa batubara, Formasi Toraja (Tet) terbuat dari batuan sedimen klastik dari Eosen. Batubara, batupasir, dan batulempung ditemukan pada penyelidikan sebelumnya.
- c. Anggota Formasi Rantepo Toraja (Tetr), yang berasal dari Eosen dan terdiri dari batugamping numulit yang tererosi sebagian dan batugamping yang pecah.
- d. Anggota Formasi Sekala (Tmps), yang berasal dari Miosen-Pliosen dan terdiri dari batupasir hijau, growake, napal, batulempung, dan tufa.
- e. Batuan Vulkanik Talaya (Tmtv) yang bercampur dengan Formasi Sekala dari Miosen hingga Pliosen. Basal, tuf, dan batupasir ditemukan di daerah tersebut melalui pengamatan lapangan. Lapisan batubara di bawah ini tertutup batuan beku dari Gunung Api Talaya. Menurut interpretasi Ratman dan Atmawinata (1993) atas temuan penyelidikan, batubara bukan merupakan komponen dari Batuan Vulkanik Talaya melainkan Formasi Toraja di bawahnya.
- f. Tuf Beropa (Tmb), berumur Miosen, terdiri dari perselingan tuf dan batupasir tufan bersisipan breksi gunungapi dan batupasir wake.
- g. Tuf Beropa (Tmb), yang berasal dari Miosen, terdiri dari batupasir, breksi vulkanik, dan perselingan batupasir dan tufa
- h. Granit, granodiorit, riolit, diorit, dan aplite membentuk Batuan Terobosan (Tmpi), yang berumur Miosen hingga Pliosen.
- i. Formasi Budong-Budong (Qb) berumur Kuartar dan tersusun atas konglomerat dan batupasir dengan sisipan batugamping dan batulanau pada lokasi tertentu.

Berdasarkan penjelasan mengenai formasi batuan yang ada di mamuju, dan penyelidikan yang telah dilakukan, beberapa peneliti menggambarkan maupun menginterpretasi stratigrafi regional Sulawesi Barat (Gambar 2.4), sehingga dapat membantu sebagai referensi tambahan untuk melakukan penelitian yang baru pada formasi batuan yang sama. Dalam Formasi Toraja anggota Rantepao yang didominasi oleh *limestone*, sehingga dalam penelitian daerah Formasi Toraja terkadang ditemukan batu gamping (*limestone*).



Gambar 2.4 Kolom Stratigrafi Regional Sulawesi Barat (Calvert, 1999)

2.5 Tipe Lingkungan Pengendapan

Lingkungan pengendapan gambut, lokasi di mana dan kondisi gambut terakumulasi, secara signifikan mempengaruhi sifat fisik batubara, komposisi kimia yang dihasilkan dan pemanfaatan batubara. Penentuan lingkungan pengendapan gambut menjadi batubara merupakan proses yang menarik, karena sifat komposisi

batubara yang diamati tidak hanya dihasilkan dari berbagai proses geologi yang terjadi selama akumulasi gambut, tetapi juga mencerminkan pengaruh lingkungan pengendapan eksternal dan alterasi selama diagenesis dan epigenesis. Komposisi maseral atau mikrolitofip dari setiap satu lapisan gambut dapat menjadi produk dari tahun atau dekade tumbuh dan matinya tanaman, proses pembusukan, dan infiltrasi pasca penguburan oleh akar di samping hubungan simbiosis, mutualistik, parasit, dan saprofit dengan non biota tumbuhan, seperti artropoda, jamur, dan bakteri (Dai *et al.*, 2020).

Menurut Moore (1987; dalam Dai *et al.*, 2020) dalam ada empat cara mengkarakterisasi lingkungan pembentuk gambut yang terawetkan dalam pengamatan fosil tumbuhan:

- a. ketersediaan air melalui air permukaan dan air tanah
- b. Pengaruh iklim oleh suhu, curah hujan, dan evapotranspirasi
- c. Pasokan nutrisi dari substrat dan udara
- d. Sifat lingkungan eksternal, menurut Flores (2014) faktor ini adalah pengaruh sungai, danau, dan laut, yang mempengaruhi semua parameter lainnya.

Martini *and* Glooschenko (1984) dalam Diessel., (1992) dan Quadaryati dkk., (2019) mengklasifikasikan lahan gambut menjadi empat kategori berdasarkan jenis tanaman pembentuknya:

- a. *Bog* adalah rawa yang ditumbuhi lumut atau tanaman yang kekurangan nutrisi.
- b. *Fenogeni*, rawa-rawa dengan banyak pohon dan semak yang tumbuh di atasnya. Lingkungan ini dapat basah atau kering pada waktu yang berbeda.
- c. *Marsh*, rawa dengan banyak tanaman merambat dan semak yang umum di dekat danau atau laut.
- d. *Swamp*, rawa yang tidak pernah berhenti basah dari musim panas hingga musim dingin. Ada banyak tanaman berkayu di lingkungan ini.

Teichmüller (1989; dalam Monita 2021) *Wetforest swamp* adalah rawa gambut yang selalu basah dari musim kemarau hingga musim dingin. Proses pengendapan batubara terjadi di rawa gambut yang relatif lembab atau basah atau yang selalu tergenang air; dengan kata lain, pembentukan batubara terjadi di

lingkungan yang menguntungkan. Tanaman berkayu dengan kandungan kelompok maseral huminit yang tinggi mendominasi tanaman pengisi gambut.

Menurut Diesel (1992), ada enam lingkungan pengendapan utama untuk pembentukan batubara: *gravelly braid plain*, *sandy braid plain*, *alluvial valley and upper delta plain*, *lower delta plain*, *backbarrier strand plain*, dan *estuary*. Karakter batubara berbeda dan berhubungan dengan setiap lingkungan pengendapan (Tabel 2.2)

Tabel 2.2 Lingkungan pengendapan utama pembentuk batubara (Diessel, 1992).

No	Lingkungan	Sub-lingkungan	Karakteristik Batubara
1	<i>Gravelly braid plain</i>	<i>Bars, channels, overbank plains, swamps, raised bogs</i>	Sebagian besar batubara kusam dengan TPI sedang hingga rendah, GI rendah, dan kandungan sulfur rendah.
2	<i>Sandy braid plain</i>	<i>Bars, channels, overbank plains, swamps, raised bogs</i>	Sebagian besar batubara kusam dengan TPI sedang hingga tinggi, GI rendah hingga sedang, dan kandungan sulfur rendah.
3	<i>Alluvial valley and upper delta plain</i>	<i>Channels, point bars, flood plains, and basins, swamps fens, raised bogs</i>	Sebagian besar batubara cerah dengan TPI tinggi, GI sedang hingga tinggi, dan kandungan sulfur rendah.
4	<i>Lower delta plain</i>	<i>Delta front, mouth bar, splays, channels, swamps, fens, and marshes</i>	Sebagian besar batubara cerah dengan TPI rendah hingga sedang, GI tinggi, dan sulfur tinggi.
5	<i>Backbarrier stand plain</i>	<i>Off, near, and backshore, tidal inlets, lagoons, fens, swamps, and marshes</i>	Transgresif: Sebagian besar batubara cerah dengan TPI sedang, GI tinggi, dan sulfur tinggi; regresif: Batubara sebagian besar kusam dengan sulfur rendah dan TPI dan GI rendah.
6	<i>Estuary</i>	<i>Channels, tidal flats, fens and marshes</i>	Sebagian besar batubara cerah dengan TPI sedang dan GI tinggi.

Enam klasifikasi lingkungan pengendapan menurut Diessel (1992), dijelaskan dalam Qadaryati dkk., (2019) yaitu:

- a. *Braid Plain*, Dataran aluvial di antara pegunungan, yang merupakan daerah aluvial intramountana. Diagenetik gambut ombrogenik, juga dikenal sebagai

gambut yang hanya terbentuk oleh air hujan, diendapkan sebagai material sedimen kasar di lingkungan ini.

- b. *Alluvial valley and upper delta plain* adalah lingkungan pengendapan yang memiliki litofasies yang sama. Transisi lembah dan dataran aluvial menjadi dataran delta yang berjalan melalui sungai stadia dewasa dengan banyak liku-liku menciptakan lingkungan tersebut. Jika dibandingkan dengan lingkungan pengendapan lainnya, lapisan batubara memiliki ketebalan yang bervariasi, warna hitam kusam, dan komposisi sulfur dan abu yang lebih rendah.

Upper delta plain didefinisikan sebagai dataran yang berada di atas tingkat pasang tinggi, kurangnya gerakan datau gelombang laut dan dikeringkan oleh saluran distribusi yang dipengaruhi oleh fluvial atau sungai (Dai *et al.*, 2020).

- c. *Lower delta plain*, dampak pasang surut pada sedimentasi membuat dataran delta bawah berbeda dari dataran delta atas. Efek pasang surut lebih besar di dataran delta bawah daripada di dataran delta atas. Material sedimen klastik halus juga diendapkan di lingkungan ini, yang mempengaruhi peningkatan mineral pengotor selama proses gambut menjadi batubara. Pasang surut air laut akan membawa nutrisi ke rawa untuk mendorong pertumbuhan yang lebih baik.

Dalam Dai *et al* (2020) dataran delta bawah yang sebagian *subaqueous* didefinisikan sebagai terjadi antara tingkat air pasang dan surut; dengan demikian, ditandai dengan masuknya air laut yang dikendalikan oleh kemiringan dan debit air laut (Coleman *and* Prior., 1982; Elliott., 1986; Bhattacharya., 2006). Dataran delta bawah terkena pengaruh laut (misalnya gelombang dan pasang surut) yang ditandai dengan air payau di teluk interdistributary. Batas antara dataran delta bawah dan atas adalah garis teluk (Posamentier *et al.*, 1988).

- d. Gambut yang terbentuk di *Backbarrier strand plain* dipengaruhi oleh pasang surut air laut. Laju sedimentasi yang disebabkan oleh gelombang, pasang surut, dan arus mengendalikan garis pantai. Jika laju sedimentasi tinggi, akan terbentuk delta; jika laju sedimentasi rendah, sedimen akan tersebar di sepanjang garis pantai.

- e. *Estuary* tanpa delta karena tingkat sedimentasi yang rendah dan energi pantai yang rendah. Batubara yang dihasilkan di lingkungan ini sangat tipis dan terdistribusi dengan buruk

Menentukan lingkungan pengendapan berdasarkan klasifikasi keadaan hidrologi menurut kedalaman muka air terdiri dari: *limnic*, *limno-telmatic*, *telmatic* dan *terrestrial* (Mitsch dan Gosselink., 1986; dalam Pratama dkk., 2020; Monita dkk., 2021). *Limnic* didefinisikan sebagai kondisi *subaqueous* (basah) dengan kondisi sangat lembab selalu berada di bawah permukaan air, *limno-telmatic* adalah kondisi antara ketinggian air tertinggi hingga terendah, lingkungan yang selalu digenangi air baik saat pasang surut maupun keadaan biasa bersifat mesotrofik (mengandung pencampuran air tawar dan air laut), *Telmatic* atau lingkungan yang berada di daerah pasang surut air tawar maupun air laut, dengan kondisi ketinggian air tertinggi (Stach *et al.*, 1982), sedangkan *terrestrial* adalah kondisi di atas permukaan air, dalam lingkungan yang selalu kering. Perubahan tinggi muka air rawa gambut dari kondisi basah ke kondisi kering atau sebaliknya akan mempengaruhi pertumbuhan jamur sclerotinia di rawa gambut seperti jenis rumpun tanaman pembentuk gambut, ketersediaan oksigen di bagian atas rawa gambut. lapisan gambut dan konsentrasi jamur sclerotinia di gambut akibat dekomposisi selektif yang akan membentuk jamur seperti sclerotinia tunggal dan sclerotinia ganda (Mitsch and Gosselink, 1986).

Pengaruh transgresi dan regresi air laut pada lapisan batubara merupakan menunjukkan kedekatan lingkungan pengendapan batubara dengan lingkungan marjinal laut, secara umum atau dekat dengan garis pantai, artinya, batubara yang terbentuk paling dekat dengan garis pantai lebih terpengaruh oleh pergeseran lateral daripada yang terakumulasi jauh dari garis pantai (Dai *et al.*, 2020). Variasi ketinggian air tanah mengatur efek potensi redoks seperti degradasi dan penguraian bahan organik. Pengukuran batubara yang terbentuk di paralic, rawa dataran rendah cenderung dipengaruhi oleh fluktuasi permukaan laut selama transgresi (Diessel *et al.*, 2000).

2.6 Penentuan Lingkungan Pengendapan

Diessel (1986, 1992) mengusulkan metode untuk analisis fasies berdasarkan indeks petrografi kuantitatif, dengan mencoba untuk menyimpulkan lingkungan pengendapan batubara. Diessel menggunakan diagram fasies hubungan antara nilai GI dan TPI untuk menentukan fasies lingkungan pengendapan. Kedua parameter tersebut adalah *Tissue Preservation Index* (TPI) dan *Gelification Index* (GI). Menurut Diessel (1992), TPI adalah perbandingan antara struktur jaringan yang tidak berubah dan struktur jaringan yang berubah, sedangkan GI adalah perbandingan antara komponen gelifikasi dan komponen oksidasi (*fusinification*). Pada penelitian Toprak *et al.*, (2015) menyatakan bahwa nilai TPI juga dapat mengalami degradasi tingkat tinggi dan gelifikasi. Nilai GI menunjukkan bahwa muka air tanah terus menerus berubah selama pengendapan lapisan batubara bawah. Perubahan permukaan air mungkin sering terjadi sebagai akibat pergerakan tektonik atau variasi musiman.

Penggunaan data kelompok maseral digunakan untuk mengidentifikasi tren fasies batubara, baik secara vertikal maupun lateral di dalam lapisan batubara, dan telah menjadi subyek dari banyak penelitian. Indeks maseral batubara, yang berasal dari proporsi maseral dan dikembangkan untuk memberikan penilaian yang lebih baik terhadap kondisi dan sifat lingkungan pengendapan batubara (Dai *et al.*, 2020).

Diagram fasies pengendapan telah banyak digunakan untuk merekonstruksi kondisi lingkungan pembentukan batubara, seperti (Ogala *et al.*, 2012; Widodo dan Antika, 2012; Purnama dkk., 2018; Qadaryati dkk., 2019). Nilai TPI dihitung dengan membandingkan maseral dengan struktur sel yang terawetkan dengan baik (desmocolinite, Makrinit, dan inertodeffinit) dengan maceral yang struktur selnya kurang terjaga (tellinit, telocolinit, fusinit, dan semifusinit). Tumbuhan yang banyak mengandung selulosa seperti perdu dan angiospermai akan mudah dimusnahkan oleh organisme, sedangkan tanaman yang banyak mengandung lignin seperti tanaman kayu akan lebih sulit untuk dibasmi. Harga TPI menunjukkan peningkatan proporsi tanaman berkayu yang ada. Jika banyak fusinit atau semifusinit, ini berarti oksidasi cepat (pembakaran hutan) menjadi penyebab tingginya harga TPI. TPI mencerminkan kontribusi dan pelestarian bahan kayu

(misalnya, batang, akar, batang, daun, spora, serbuk sari, dan biji) versus degradasinya, yaitu rasio maseral dengan struktur seluler terhadap maseral tanpa struktur seluler (Dai *et al.*, 2020).

Gelification Index (GI) merupakan perbandingan antara maseral yang dihasilkan dari proses oksidasi (fusinit, semifusinit, dan inertodetrinit) dengan yang dihasilkan dari proses gelifikasi (makrinit). Jika gambut selalu basah dan suplai oksigen terbatas, vitrinit dan makrinit dapat terbentuk (Lamberson *et al.*, 1991) Dengan kata lain, jika muka air tanah berada pada atau sedikit di atas permukaan gambut. Oleh karena itu, dari harga GI dapat ditarik kesimpulan bahwa muka air tanah relatif tinggi dibandingkan dengan permukaan gambut. Laju akumulasi tanaman dan derajat dekomposisi dapat diperkirakan dengan menggunakan kombinasi TPI dan GI. Menurut Dai *et al* (2020) GI dispekulasikan untuk menyimpulkan tingkat muka air tanah dalam rawa, yaitu rasio massa lingkungan basah seperti vitrinit dan makrinit terhadap massa lingkungan kering seperti inertinit.

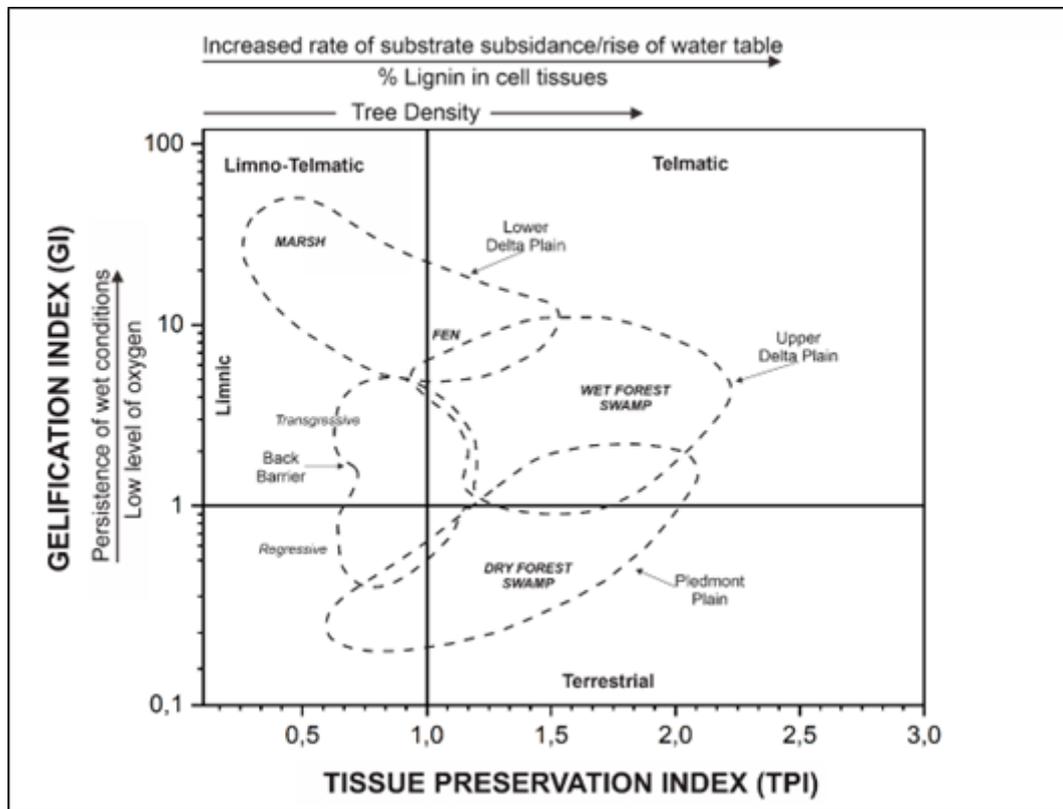
Hasil analisis petrografi selanjutnya diinterpretasikan dalam persamaan skalar yang dapat digunakan sebagai indikator fasies batubara. Indikator yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang disebutkan pada penjelasan di atas yaitu indikator TPI dan GI. Diessel menggunakan persamaan dari perbandingan beberapa maseral guna mendapatkan *Gelification Index* (GI) dan *Tissue Preservation Index* (TPI) untuk mengetahui lingkungan pengendapan batubara (Rahmad., 2013). Nilai TPI dan GI digambarkan pada diagram lingkungan pengendapan dari Diessel (1986) ditentukan berdasarkan formula sebagai berikut:

$$TPI = \frac{(Telovitrinite + telo-inertinite)}{Detro- + gelovitrinite + detro- + gelo-inertinite} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$GI = \frac{(Vitrinite +gelo-inertinite)}{Telo-inertinite + detro-inertinite} \dots\dots\dots(2.2)$$

Penelitian batubara yang dilakukan oleh Lamberson *et al.* (1991) telah menunjukkan bahwa lingkungan pengendapan yang berkelanjutan terwakili dari hutan rawa (baik basah maupun kering) hingga kering, rumput - rumputan dan / atau semak belukar (Kalkreuth *et al.* 1991). Lingkungan diinterpretasikan dari

diagram fasies batubara Diessel yang dimodifikasi dalam Lamberson *et al.* (1991) (Gambar 2.5).



Gambar 2.5 Diagram fasies pengendapan batubara menggunakan indeks GI dan TPI (Diessel., 1986).

2.7 Analisis Batubara

Pada analisis batubara terdapat beberapa metode analisis yang dapat dilakukan yaitu analisis proksimat, analisis ultimat, analisis maseral, dan Pengukuran reflektansi vitrinit:

2.6.1 Analisis Proksimat

Analisis proksimat batubara umumnya untuk menentukan kadar air, kandungan abu, zat terbang, dan karbon tetap, sebagaimana ditentukan oleh berbagai metode pengujian. distandarisasi atau ditentukan (ASTM D3172). Metode ini dikembangkan sebagai cara langsung untuk menentukan distribusi produk yang dihasilkan dari pemanasan sampel batubara dalam kondisi tertentu. Selain itu,

analisis batubara proksimat mengategorikan produk ke dalam empat kategori menurut definisi: (1) kelembaban (*moisture*); (2) zat terbang (*volatile matter*) gas dan uap yang dilepaskan selama proses pemanasan; (3) karbon tetap (*fixed carbon*) fraksi batubara yang tidak mudah menguap; dan (4) abu (*ash*) residu anorganik yang tersisa setelah pembakaran (Speight., 2015).

Speight (2015) menjelaskan ke empat hasil produk yang dihasilkan dalam analisis proksimat yaitu:

a. *Moisture* (kelembaban) ialah kandungan air yang terdapat dalam batubara, kelembaban dalam batubara berkisar dari 2% hingga 15% menurut beratnya dalam batubara bituminus hingga hampir 45% berat dalam lignit. Perbandingan kadar air dari berbagai peringkat batubara dari lignit ke antrasit dapat dilihat pada tabel 2.3.

Ada beberapa sumber air yang terjadi pada batubara dan semua batubara ditambang dengan air, seperti: (1) *adventitious moisture*, yang terdiri dari air tanah dan uap air asing lainnya dan dapat diuapkan, (2) *inherent moisture*, yang terjadi dalam sistem pori batubara dan dianalisis secara kuantitatif, dan (3) *dventitious moisture*, yang dihilangkan dengan penguapan di udara. Selanjutnya, uap air dalam batubara juga dapat diklasifikasikan menjadi empat kemungkinan bentuk di dalam batubara: (1) *surface moisture*, yaitu air yang tertahan di permukaan partikel atau mineral batubara, (2) *hygroscopic moisture*, yaitu air yang ditahan oleh aksi kapiler dalam struktur mikro batubara, (3) kelembaban yang dihasilkan oleh dekomposisi termal dari matriks organik batubara dan merupakan bagian dari prekursor organik asli, dan (4) *mineral moisture*, dimana terdiri dari bagian struktur kristal hidrous silikat seperti mineral lempung.

b. *Volatile matters* adalah kandungan batubara yang terbebaskan pada temperature tinggi tanpa keadaan oksigen, materi yang mudah menguap dalam batubara mengacu pada komponen batubara, kecuali kelembaban, yang dibebaskan pada suhu tinggi tanpa adanya udara. Secara singkat, *volatile matter* terdiri dari berbagai hidrokarbon tipe parafin, hidrokarbon aromatik, serta senyawa yang mengandung sulfur (dan yang mengandung heteroatom lainnya). Metode

pengujian membutuhkan penggunaan suhu tinggi (di urutan $900 \pm 5^\circ \text{C}$, $1650 \pm 10^\circ \text{F}$).

- c. *Fixed carbon* (karbon tetap) adalah bahan yang tersisa setelah penentuan kadar air, bahan mudah menguap, dan abu. Karbon tetap ditentukan dengan mengurangi massa volatil, yang ditentukan sebelumnya, dari massa asli sampel batubara.
- d. *Ash* (abu) adalah residu tidak mudah terbakar yang tersisa setelah batubara dibakar dan mewakili sebagian besar materi mineral setelah karbon, oksigen, belerang, dan air (termasuk dari mineral tanah liat) dihilangkan selama pembakaran. Metode pengujiannya langsung, dengan cara batubara dibakar secara menyeluruh dalam kondisi tertentu dan hasil abu dinyatakan sebagai persentase dari berat asli (ASTM D3174).

2.6.2 Analisis Ultimat

Persentase berat karbon, belerang, nitrogen, dan oksigen dalam batubara semuanya diukur selama analisis ultimat. Karbon organik zat batubara dan karbon apa pun yang ditemukan dalam mineral karbonat termasuk dalam penentuan karbon. Penentuan hidrogen mencakup hidrogen di semua batubara terkait air serta hidrogen dalam bahan organik. Diasumsikan bahwa matriks organik batubara mengandung nitrogen. Namun, batubara mengandung sulfur dalam tiga bentuk: sebagai (1) sulfur organik dan (2) Pirit sulfur, sulfida anorganik yang dominan hadir, (3) Sulfat sulfur.

Metode standar untuk analisis ultimat batubara dan kokas (ASTM D3176) meliputi penentuan unsur karbon, hidrogen, sulfur, dan nitrogen, bersama dengan abu dalam material secara keseluruhan. Hasil penentuan unsur dan komposisi lainnya dapat digunakan untuk melihat peringkat batubara (Tabel 2.3). Metode pengujian yang direkomendasikan untuk analisis unsur meliputi penentuan karbon, hidrogen, dan nitrogen (ASTM D5373), sulfur (ASTM D4239).

Tabel 2.3 Komposisi untuk peringkat batubara (Speight, 2015)

<i>Parameter</i>	<i>Anthracite</i>	<i>Bituminous</i>	<i>Subbituminous</i>	<i>Lignite</i>
<i>Moisture (%)</i>	3 – 6	2 – 15	10 – 25	25 – 45
<i>Volatile matter (%)</i>	2 – 12	15 – 45	28 – 45	24 – 32
<i>Fixed carbon (%)</i>	75 – 85	50 – 70	30 – 57	25 – 30
<i>Ash (%)</i>	4 – 15	4 – 15	3 – 10	3 – 15
<i>Sulfur (%)</i>	0.5 – 2.5	0.5 – 6	0.3 – 1.5	0.3 – 2.5
<i>Hydrogen (%)</i>	1.5 – 3.5	4.5 – 6	5.5 – 6.5	6 – 7.5
<i>Carbon (%)</i>	75 – 85	65 – 80	55 – 70	35 – 45
<i>Nitrogen (%)</i>	0.5 – 1	0.5 – 2.5	0.8 – 1.5	0.6 – 1.0
<i>Oxygen (%)</i>	5.5 – 9	4.5 – 10	15 – 30	38 – 48
<i>Btu/lb</i>	12,000–13,500	12,000–14,500	7500–10,000	6000–7500
<i>Density (g/ml)</i>	1.35 – 1.70	1.28 – 1.35	1.35 – 1.40	1.40–1.45

2.6.3 Analisis Total Sulfur

Menghitung kandungan sulfur total batubara, dilakukan analisis sulfur total. Sulfur standar ASTM D4239 biasanya digunakan dalam prosedur pengujian sulfur batubara. Sulfur tersedia dalam struktur anorganik dan organik dalam batubara. Sulfur anorganik sebagian besar ditemukan sebagai senyawa sulfida (pirit) dan terkadang sulfat. Sulfur organik adalah komponen atau senyawa sulfur yang terikat dalam rantai hidrokarbon bahan alam. Ada berbagai cara untuk pengaturan sulfur di gambut, termasuk dari dampak lapisan batuan pengapit yang terendapkan dalam lingkungan laut (Horne *et al.*, 1978), dampak air laut selama siklus pengendapan jaringan tumbuhan (Casagrande *et al.*, 1977), siklus mikroba dan perubahan PH (Casagrande, 1977; dalam Widayat., 2005), perkembangan dan keberadaan sulfur dalam batubara dan gambut dapat diringkas sebagai berikut:

1. Secara umum batubara sulfur rendah (<1%)
2. Batubara sulfur tinggi berasosiasi dengan batuan tanah penutup yang berasal dari endapan laut.
3. Kandungan sulfur batubara umumnya paling tinggi pada bagian atas (*roof*) dan pada bagian dasar (*floor*) lapisan batubara.

Berbagai studi mengenai persentase total sulfur tinggi yang berasal dari air laut dalam batubara telah berhasil digunakan sebagai indikator lingkungan

pengendapan yang efektif (Dai *et al.*, 2020). Chou (2012) meninjau secara komprehensif kelimpahan sulfur dalam batubara dan lingkungan pengendapan dengan contoh kasus dari lokasi batubara di seluruh dunia. Secara keseluruhan, Chou (2012) menyimpulkan bahwa dua hal yaitu: (1) kandungan sulfur dalam batubara bergantung pada pengaruh air laut dan tingkat pengaruh air laut selama akumulasi gambut serta diagenesis pasca pengendapan; dan (2) batubara berkadar sulfur rendah umumnya terbentuk pada lingkungan fluvial dan batubara berkadar sulfur tinggi masing-masing diendapkan pada lingkungan yang dipengaruhi air laut.

Sulfur dalam batubara sangat bervariasi, untuk menentukan tinggi rendahnya kandungan sulfur dalam batubara dicirikan menjadi tiga bagian, yaitu batubara dengan kandungan sulfur di bawah 1% disebut sebagai batubara dengan kandungan sulfur rendah, dan kandungan sulfur 1% - 3% dikategorikan sebagai batubara dengan kandungan sulfur sedang, dan batubara dengan kandungan sulfur lebih dari 3% dikategorikan sebagai batubara dengan kandungan sulfur tinggi (Chou., 2012; Widodo *et al.*, 2010; 2016; 2019 dalam Taliding *et al.*, 2022).

Terdapat 3 (tiga) jenis sulfur yang terdapat dalam suatu batubara, yaitu:

1. Sulfur piritik

Pirit dan markasite adalah mineral sulfida paling terkenal yang ditemukan dalam batubara. Kedua jenis mineral ini memiliki bagian senyawa yang sama (FeS_2), namun berbeda dalam sistem kristalnya. Pirit berbentuk isometrik sedangkan markasite berbentuk ortorombik. Pirit (FeS_2) merupakan mineral yang memberikan kontribusi cukup besar terhadap kandungan sulfur dalam batubara, atau disebut juga sulfur pirit. Berdasarkan ganesanya, pirit dalam batubara dipisahkan menjadi dua, yaitu:

- a. Pirit *syngenetic*, khususnya pirit yang terbentuk selama siklus peatifikasi (penggambutan). Jenis pirit ini biasanya berbentuk framboidal dengan butiran yang sangat halus dan tersebar di bahan pembentuk batubara.
- b. Pirit *epigenetic*, yaitu pirit yang terbentuk setelah proses pembatubaran. Pirit jenis ini biasanya terendapkan dalam kekar, rekahan atau *cleat* pada batubara serta biasanya bersifat masif. *Cleat* merupakan rekahan alami batubara hasil

dehidrasi, devolitisasi, dan aktivitas tektonik selama proses pematuration (Ting., 1977; dalam Anggayana dkk., 2003).

Struktur pirit dalam cekungan dekat dengan lautan yang terpengaruh gerakan pasang surut air laut. gelombang pasang surut dari air laut mengendapkan material yang kaya akan sulfat (SO_4^{2-}), di sisi lain cekungan tersebut mengandung besi oksida (FeO) berlimpah yang berasal dari batuan dasar, pada cekungan tersebut terdapat bahan organik sebagai sumber energi bakteri pereduksi sulfat. Proses respirasi bakteri yang menggunakan ion sulfat sebagai sumber elektron menghasilkan sulfida yang kemudian menjadi pirit FeS_2 .

Pirit dapat dihasilkan dari reduksi sulfur primer oleh mineral yang mengandung besi. Ketika sumber sulfur tereduksi, maka sulfur tersebut dapat ditemukan dalam material yang diendapkan bersama batubara. Jenis pirit tereduksi ini biasanya dalam bentuk framboidal. Karena kation terlarut (dalam hal ini, ion Fe) diangkut ke dalam batubara oleh aliran air tanah melalui *cleat* dan kemudian bereaksi dengan sulfur yang tereduksi untuk menghasilkan pirit, perkembangan pirit epigenetik terkait erat dengan frekuensi rekahan (Demchuk., 1992; dalam Anggayana dkk., 2003).

2. Sulfur organik

Kehadiran sulfur organik, suatu unsur dalam struktur makromolekul batubara, sedikit banyak dipengaruhi oleh jumlah unsur lain yang berasal dari sumber tumbuhan. sulfur anorganik dapat diubah menjadi belerang organik, yang kemudian dapat terakumulasi dari berbagai sumber organik melalui proses penguraian dan oksidasi biokimia, dalam keadaan geokimia dan mikrobiologis yang sesuai. Namun, mekanisme yang paling penting dalam pembentukan sulfur organik biasanya adalah penguraian biokimia, dengan proses pembentukan yang bergerak lebih lambat di lingkungan yang lembab atau jenuh air. Sebagian besar kandungan sulfur keseluruhan diasumsikan berasal dari sumber selain komponen pembentuk batubara. Sulfur anorganik yang biasanya melimpah dalam lingkungan laut atau payau kemungkinan besar akan berubah membentuk

hidrogen sulfida dan senyawa sulfat dalam kondisi dan proses geokimia. Reaksi yang terjadi merupakan reduksi sulfat oleh material organik menjadi hidrogen sulfida (H_2S). Reaksi reduksi ini dipicu oleh adanya bakteri desulfovibrio (sebuah genus bakteri Gram-negatif yang memiliki sifat pereduksi sulfat, artinya, menggunakan sulfat untuk oksidasi) dan desulfotomaculum (sebuah genus bakteri Gram-positif yang memiliki sifat pereduksi sulfat, artinya, menggunakan sulfat untuk oksidasi).

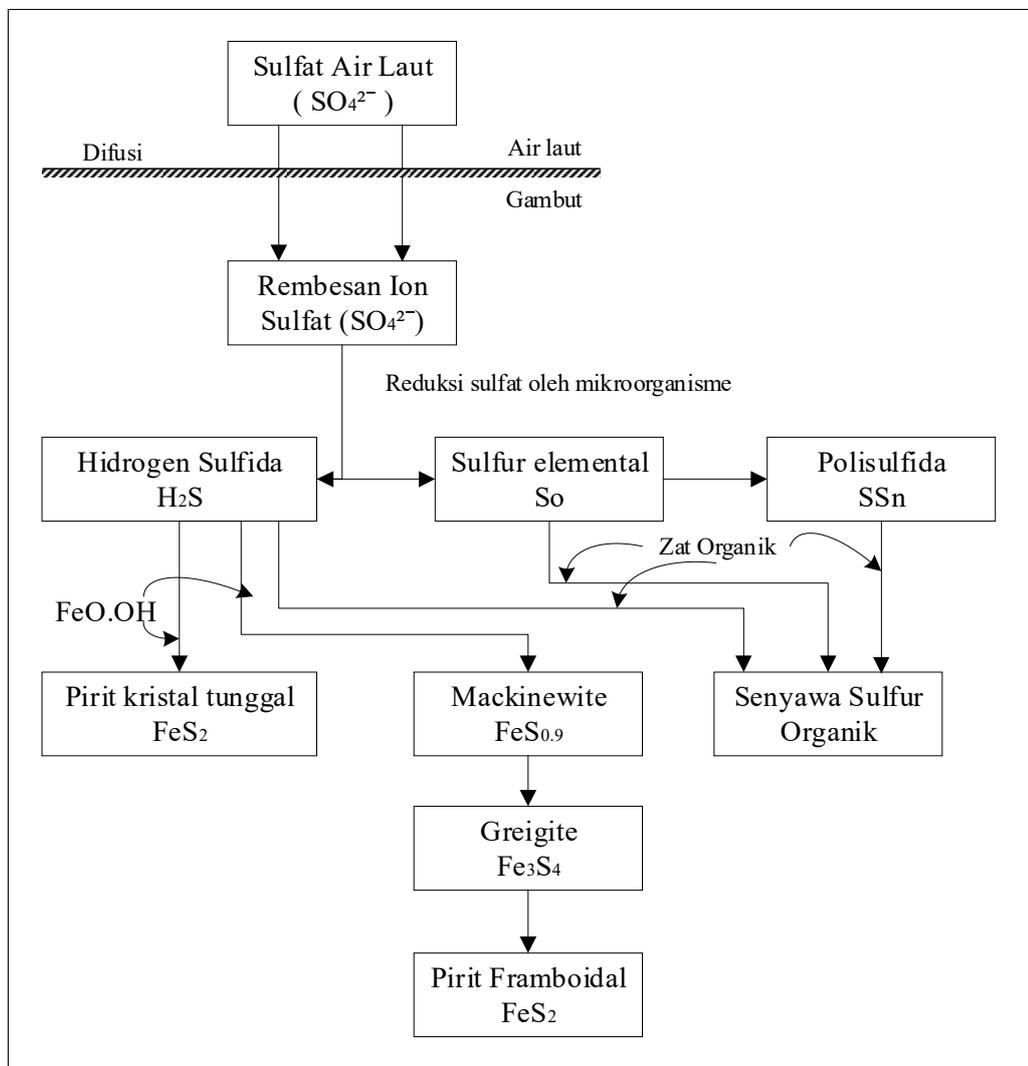
3. Sulfur Sulfat

Sulfat dalam batubara umumnya ditemukan sebagai besi sulfat, kalsium dan barium. Kandungan sulfat biasanya sangat rendah atau tidak ada kecuali jika batubara mengalami kelapukan dan sebagian mineral pirit teroksidasi menjadi sulfat. Sulfur sulfat juga dapat berasal dari reaksi garam laut atau air asin yang mengisi lapisan dasar terdekat di atas atau di bawah lapisan batubara. Biasanya, kandungan sulfur organik lebih tinggi di bagian bawah lapisan, sedangkan kandungan sulfur pirit dan sulfat akan tinggi di bagian atas dan bawah lapisan batubara.

Sulfat sebagian besar berasal dari residu laut dangkal yang kemudian akan direduksi oleh campuran karbon organik menjadi hidrogen sulfida (H_2S) (Gambar 2.6). Hidrogen sulfida yang terbentuk kemudian dioksidasi oleh *goethite* ($FeO.OH$), atau hidrogen sulfida yang terbentuk dapat *ferric iron* menjadi *ferrous iron*. Siklus oksidasi belerang ini juga dapat terjadi dengan media *ferric iron*.

Terlepas dari pembentukan pirit, sulfur organik juga dapat bereaksi dengan sulfida untuk membentuk polisulfida, selanjutnya polisulfida ini dapat bereaksi dengan FeS atau Fe_3S_4 untuk membentuk pirit. Cara pembentukan sulfur pirit yang paling umum sangat dipengaruhi oleh kondisi pH, atau semakin tinggi pH, semakin cepat proses reaksi karena pada suasana basa akan dihasilkan banyak ion besi. Selain itu, komponen sulfur atau polisulfida juga dapat bereaksi dengan komponen organik batubara untuk membentuk senyawa sulfur organik.

Pirit framboidal berasosiasi dengan batuan pengapit bagian atas (*roof*) yang terendapkan pada lingkungan laut sampai payau. Gambut yang mengandung sulfur tinggi (bentuk pirit framboidal) terbentuk pada lingkungan pengendapan yang dipengaruhi oleh transgresi air laut atau payau, kecuali apabila terdapat dalam batuan sedimen yang cukup tebal dan terendapkan sebelum fase transgresi (Taylor *et al.*, 1998; dalam Annisa., 2016). Kandungan sulfur pada batuan pengapit batubara dapat mempengaruhi atau mendistribusikan sulfur pada batubara secara vertikal (Taliding *et al.*, 2022).



Gambar 2.6 Mekanisme pembentukan pirit framboidal dan sulfur organik pada batubara yang dipengaruhi oleh air laut (Speight, 2013).

2.6.4 Nilai Kalori

Nilai kalor batubara diukur untuk hampir semua sampel batubara. Kalori batubara adalah ukuran kemampuan pemanasan batubara dan diperlukan untuk memperkirakan jumlah batubara yang dibutuhkan untuk menghasilkan jumlah panas yang diinginkan. Nilai kalor juga digunakan untuk mendefinisikan peringkat batubara dalam batubara peringkat rendah dan menengah di bawah peringkat bituminus volatil sedang dalam sistem klasifikasi ASTM (Gambar 2.7).

Nilai Kalori (CV) biasanya dinyatakan sebagai *gross calorific value* (nilai kalor yang lebih tinggi) atau *net calorific value* (nilai kalor yang lebih rendah). Selisih antara *gross calorific value* (GCV) dan *net calorific value* (NCV) adalah kalor diserap atau dilepaskan dari kondensasi uap air yang dihasilkan selama proses pembakaran. GCV mengasumsikan bahwa semua uap yang dihasilkan dari uap air batubara selama proses pembakaran terkondensasi sepenuhnya. NCV mengasumsikan bahwa air dihilangkan dengan produk pembakaran tanpa sepenuhnya terkondensasi.

Peat	Low-rank coal					Medium-rank coal					High-rank coal			Method for determining rank (dmmf) (U.S. ASTM)	
	Lignite		Sub-bituminous			Bituminous					Anthracitic				
	B	A	C	B	A	high volatile C	high volatile B	high volatile A	medium volatile	low volatile	Semi-anthracite	Anthracite	Meta-anthracite		
						11,500	13,000	14,000	Less distinct for changing rank	14					8	2
5,000	6,300	8,300	9,500	10,500	11,500	13,000	14,000	Less distinct for changing rank					Calorific value (Btu/lb.)		
		Less distinct for changing rank							31	22	14	8	2	0	Volatile matter (%)
		Less distinct for changing rank												100	Fixed Carbon (%)

Gambar 2.7 Sistem peringkat batubara (UN-ECE, 1998, modifikasi dari Kentucky Geological Survey).

Metode standar untuk menentukan kalori batubara menggunakan kalorimeter dan membakar batubara dalam oksigen di bawah tekanan dalam sistem tertutup. (Zhu, 2014). Reprodusibilitas untuk CV adalah $\pm 0,3$ MJ/kg (ISO 1928). CV biasanya dinyatakan sebagai MJ/kg, Kcal/kg atau BTU/lb. Ringkasan faktor

konversi dirinci dalam Tabel 2.4. Untuk mengubah satuan yang ada menjadi satuan yang diinginkan, kalikan satuan yang ada dengan faktor yang relevan (Miller., 2013).

Tabel 2.4 Konversi satuan nilai kalori (Miller, 2013)

CV	Desired units			
	Existing units	MJ/kg	Kcal/kg	Btu/lb
	MJ/kg		238.846	429.923
	Kcal/kg	0.004187		1.8
	Btu/lb	0.002326	0.5555	

Nilai kalori batubara yang pada umumnya dihitung dalam keadaan sesuai pada waktu diterima dilaboratorium termasuk kadar air total atau sesuai keadaan sampel yang dilapangan, dalam hal ini kadar air total dan mineral-mineral dalam batubara juga ikut terakumulasi dalam perhitungan analisis yang dilakukan biasa disebut dalam basis *as-received (ar)*. Untuk melihat seberapa besar nilai kalori batubara jika tidak memperhitungkan atau menghilangkan nilai mineral-mineral dalam batubara tersebut namun tetap memperhitungkan nilai kadar air total yang biasa disebut dalam basis *moisture, mineral matter free (m,mmf)*, bisa dihitung dengan persamaan dalam standar ASTM D388:

$$GCV_{im,MMf} = \frac{100(GCV_{im} - 50S_{im})}{(100 - (1,08A_{im} + 0,55S_{im}))}$$

Keterangan:

$GCV_{im,MMf}$ = Gross calorific value, inherent-moisture basis, mineral-matter-free basis.

GCV_{im} = Gross calorific value, inherent-moisture basis

S_{im} = Total sulfur, inherent-moisture basis

A_{im} = Ash, inherent-moisture basis

2.6.5 Analisis Maseral

Beberapa analisis petrografi awal batubara dilakukan dengan menggunakan tahap integrasi atau integrator jalur kontinu untuk melakukan analisis linier. Instrumen ini (Chayes., 1956; Van Krevelen., 1981, dalam Taylor *et al.*, 1998) membawa sejumlah spindel ulir vernier, yang masing-masing menggerakkan bidang mikroskop ke arah lintasan dan menjumlahkan panjang potongan untuk satu konstituen. Rasio panjang titik potong yang dihitung untuk konstituen tersebut terhadap total panjang lintasan memberikan perkiraan proporsi areal komponen tersebut dalam batubara (Taylor *et al.*, 1998).

Analisis maseral mengkategorikan konstituen mikroskopis batubara menurut morfologi dan reflektansi. Kemudian digunakan untuk menentukan proporsi mineral reaktif terhadap inert untuk prediksi berbagai parameter kualitas batubara. Pada prinsipnya sampel batubara yang dipasang dan dipoles diamati secara visual dengan hitungan titik untuk menentukan komposisi maseral. Mineral dibedakan berdasarkan sifat optiknya, seperti warna, morfologi, tekstur, dan anisotropi. (Miller., 2013).

2.6.6 Reflektansi Vitrinit

Laju koalesensi dalam lapisan batubara berbanding lurus dengan peningkatan intensitas cahaya yang dipantulkan pada maseral vitrinit. Estimasi reflektansi vitrinit diselesaikan di bawah media minyak genangan (minyak imersi). Indeks bias minyak imersi dapat berfluktuasi dengan suhu, mempengaruhi hasil pengukuran reflektansi. Akibatnya, reflektansi standar yang diketahui pada kondisi suhu standar (23°C hingga 25°C) harus digunakan sebagai faktor koreksi. Menurut Widodo dan Antika (2012), reflektansi maseral vitrinit akan meningkat pada proporsi terhadap peringkat batubara. Tabel 2.6 memperhitungkan hubungan antara peringkat batubara dan reflektansi vitrinit.

Meskipun batubara selalu terlihat sebagai massa hitam, berlapis dan bertekstur, namun dalam analisis reflektansi batubara dapat menunjukkan berbagai

warna perbedaan, warna ini digunakan untuk itu membedakan jenis maseral, selain itu nilai reflektansi batubara bervariasi menurut peringkatnya (Speight, 2015).

Tabel 2.5 Peringkat batubara berdasarkan nilai reflektansi vitrinit (Ward, 1984; dalam Widodo dan Antika, 2012; Thomas L., 2013)

Reflektansi Vitrinit (% RVmax)	Peringkat Batubara
< 0,37	<i>Lignite</i>
0,37 - 0,47	<i>Subbituminous</i>
0,47 - 0,57	<i>High volatile bituminous C</i>
0,57 - 0,71	<i>High volatile bituminous B</i>
0,71 - 1,10	<i>High volatile bituminous A</i>
1,10 - 1,50	<i>Med. Volatile bituminous</i>
1,50 - 2,05	<i>Low volatile bituminous</i>
2,05 - 3,00	<i>Semi anthracite</i>
> 3.00	<i>Anthracite</i>

2.6.7 Analisis Mineralogi

Stach *et al.*, (1982), menyatakan bahwa bahan anorganik dapat dibagi menjadi tiga kelompok menurut dari mana mereka berasal:

- a. Mineral tumbuhan asli.
- b. Mineral yang terbentuk pada tahap awal proses coalification atau mineral yang terbawa ke dalam akumulasi gambut oleh media air dan angin.
- c. Mineral yang masuk ke dalam retakan, rekahan, dan rongga sebagai akibat reaksi larutan atau alterasi mineral lainnya atau terbentuk pada tahap kedua proses coalification, setelah konsolidasi.

Mineral yang berasal dari luar rawa atau sedimen dan kemudian diangkut ke dalam cekungan pengendapan batubara melalui air atau angin disebut sebagai *extraneous* atau *adventitious mineral matter*, dan tumbuhan pembentuk batubara dapat mengandung unsur anorganik yang dikenal sebagai mineral bawaan (Ward., 1986). Mineral lempung, sulfida, dan oksida adalah mineral yang paling umum ditemukan di batubara. Dengan kelimpahan antara 60% hingga 80% dari total

bahan mineral, mineral lempung adalah mineral yang paling banyak ditemukan di batubara. Batubara mengandung mineral lempung karena media air menghilangkan mereka selama proses akumulasi. Kaolinit, illit, dan serisit adalah mineral lempung yang paling khas sebagai pengisi untuk rekahan batubara, mineral ini diproduksi oleh batubara selama proses gambut dan *coalification*.

Mineral lempung kemungkinan berasal dari detrital (batuan sedimen fragmental atau batuan sedimen klastik) atau diagenetik dalam batubara dan dapat dibagi lagi menjadi mineral lempung yang terbentuk melalui transformasi mineral yang sudah ada sebelumnya dan mineral yang diendapkan insitu (neoformasi). Kaolinit singenetik biasanya terjadi sebagai pengisi pori dan sel dalam bahan organik (Kemezyz and Taylor, 1964; Permana *et al.*, 2013).

Lingkungan yang dipengaruhi laut akan mendukung pembentukan illit (Ward, 1989). NH_4 -illite dalam batubara dalam beberapa kasus dapat berasal dari terrigenous (berasal dari erosi batuan di darat; yaitu berasal dari lingkungan terestrial) (Dai *et al.*, 2020), di tempat lain dapat berasal dari syngenetic autigenik jika ion yang dibutuhkan untuk pembentukannya (misanya K^+ untuk illit dalam lingkungan yang dipengaruhi air laut) tersedia di rawa gambut yang basa lemah. Dalam kebanyakan kasus mereka berasal dari bahan mineral kaya kaolinit yang sudah ada sebelumnya dan mewakili produk alterasi selama tahap diagenetik atau epigenetik (Dai *et al.*, 2020).

Mineral sulfida yang paling banyak ditemukan di batubara adalah pirit, markasit, dan melnikovit-pirit. Pada kondisi ini sfalerit, galena, dan kalkoprit ditemukan dalam jumlah besar pada ukuran kecil (Stach., 1941, Mackowsky., 1943, Balme., 1956 dalam Stach *et al.*, 1982). Ada dua jenis pirit yaitu pirit singenetik dan pirit epigenetik. Sedangkan pirit epigenetik adalah pirit yang terbentuk setelah proses pematubaraan, dan pirit singenetik adalah pirit yang terbentuk selama proses pengambutan. Pirit terbentuk sebagai hasil reduksi sulfur primer oleh organisme dan air tanah yang mengandung ion besi, dan reaksi ini menghasilkan pirit framboidal (Annisa., 2016). Dalam hal ini, pirit epigenetik dikaitkan dengan sejumlah besar rekahan pada batubara. Hal ini disebabkan karena sulfur primer dan ion besi dalam bentuk larutan dapat mengisi celah pada batubara atau rekahan dan

bereaksi membentuk pirit masif pada batubara (Widodo *et al.*, 2010), Konsentrasi pirit yang tinggi menunjukkan ketersediaan besi (Fe) pada sampel batubara.

Dalam kebanyakan kasus, air yang kaya sulfat adalah air laut dan dengan demikian, keberadaan pirit singenetik sering digunakan sebagai indikator lingkungan pengendapan di bawah pengaruh laut. Batubara yang disimpan di bawah pengaruh air laut biasanya mengandung proporsi pirit yang lebih tinggi daripada yang terkena air tawar (Rao *and* Gluskoter., 1973; Chou., 2012; Ward., 2002, 2016; dalam Dai *et al.*, 2020). Pirit yang dihasilkan dari invasi air laut ke dalam rawa gambut menunjukkan kondisi agak asam (yaitu, pH > 4,5), melalui kondisi netral, hingga basa.

Tipe-tipe pirit dapat dibedakan sebagai berikut dijelaskan dalam (Win *et al.*, 2013):

- a. *Framboidal pyrite*, menurut beberapa penulis, dihasilkan oleh piritisasi bakteri sulfur. Framboid adalah bentuk pirit yang biasanya ditemukan di lingkungan anoksik seperti rawa, lingkungan danau, dan lingkungan laut.
- b. Pirit dengan bentuk *euhedral*, juga disebut pirit kristal. Selama pengendapan gambut atau pada awal humifikasi, sebagian besar pirit *euhedral* bersifat *syngenetic*. Kristal pirit *euhedral* biasanya berukuran kecil dan tersebar di batubara.
- c. *Massive pyrite: cleat, cellfillings, framboids coating*, dan mineral detrital adalah contoh mineral pirit masif. Banyak mineral juga mengandung pirit masif sebagai pengganti bahan organik. Selama proses kristalisasi, pirit homogen masif biasanya diisi dengan mineral lempung dan residu bahan organik, sehingga berpori dan tidak padat.
- d. Pirit *anhedral*, yang dibuat dengan mengubah pirit masif dan terbentuk dari mineralisasi sisa-sisa tanaman selama proses gambut menjadi koalesensi.

Kuarsa adalah mineral oksida yang ditemukan di sebagian besar tempat. Kuarsa dapat terbentuk dalam batubara dengan dua cara: kuarsa klastik, yaitu kuarsa yang terbawa oleh air atau udara, dan kuarsa kristal halus, yaitu kuarsa yang terbentuk dari larutan pengendapan batubara.

Jumlah *mineral matter* dalam batubara bervariasi dari lapisan ke lapisan, bahkan sepanjang lapisan yang sama, dan umumnya merupakan bagian yang signifikan dari komposisi batubara. Meskipun nilai yang wajar untuk jumlah rata-rata *mineral matter* jauh lebih rendah, batubara ditemukan mengandung *mineral matter* hingga 32% dari berat yang diidentifikasi. Konsentrasi dan komposisi metode yang dipilih menentukan seberapa efektif dapat digunakan dalam persiapan batubara, yang bertujuan untuk mengurangi jumlah *mineral matter*. Namun, terlepas dari seberapa efisien metode preparasi batubara, akan selalu ada sejumlah besar *mineral matter* yang tersisa; ini sangat penting untuk pemanfaatan batubara (Speight., 2005).

Metode analisis mineralogi yang dapat digunakan dalam menganalisis mineral dalam batubara, yaitu:

a. Analisis *X-Ray Diffraction (XRD)*

Analisis *XRD* menggunakan prinsip difraksi dan menggunakan difraktometer. Teknik yang sangat penting untuk menentukan struktur kristal material adalah analisis *XRD*. Parameter kisi kristal tunggal, fase, tekstur, dan bahkan analisis tegangan bahan polikristalin (seperti bubuk) adalah aplikasi khas dari metode ini (Loye., 2013).

Metode untuk analisis non-destruktif berdasarkan pengukuran jumlah radiasi sinar-X yang didifraksikan oleh bidang kristal ketika suatu bahan dan radiasi elektromagnetik sinar-X berinteraksi. Jarak antara bidang kristal (d) menentukan kisi kristal kristal (Loye., 2013).

Dengan menentukan parameter struktur kisi dan ukuran partikel, alat *XRD* digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal material. Mineral dalam sampel batubara dan sampel batuan olahan atau bubuk lainnya akan diidentifikasi melalui penyelidikan ini.

Difraktometer dapat menghasilkan data baik dalam bentuk digital maupun analog sebagai outputnya. Perekaman data analog adalah grafik garis yang direkam per menit sinkron dengan detektor pada sudut 2θ per menit, sehingga sumbu X setara dengan sudut dari 2θ ; perekaman data digital adalah grafik jumlah intensitas cahaya yang dihasilkan per detik. Kumpulan puncak difraksi

dengan intensitas yang bervariasi sepanjang nilai 2θ tertentu merupakan pola difraktogram yang dihasilkan. Jumlah atom atau ion yang ada dan distribusinya dalam sel satuan material menentukan intensitas relatif dari deret puncak. Setiap padatan kristal memiliki pola difraksinya sendiri yang berbeda, yang ditentukan oleh kisi kristal, satuan parameter, dan panjang gelombang sinar-X. Akibatnya, sangat tidak mungkin terjadi perbedaan padatan kristal akan menghasilkan pola difraksi yang sama (Suharyana., 2012).

b. Analisis Mikroskopis

Analisis mikroskopis adalah analisis yang dilakukan dalam studi mineralogi untuk mengamati mineral-mineral yang terkandung dalam bijih atau batubara yang tidak dapat dilihat secara langsung karena bentuknya kecil dan halus. Mikroskop optik digunakan untuk analisis mikroskopis untuk melihat kristal mineral dalam batubara atau bijih sebagai rangkaian nodul, lentikel, urat, dan pengisi sel dan pori-pori, serta lapisan halus dan konsentrasi lain yang terkait erat dengan komponen maseral.

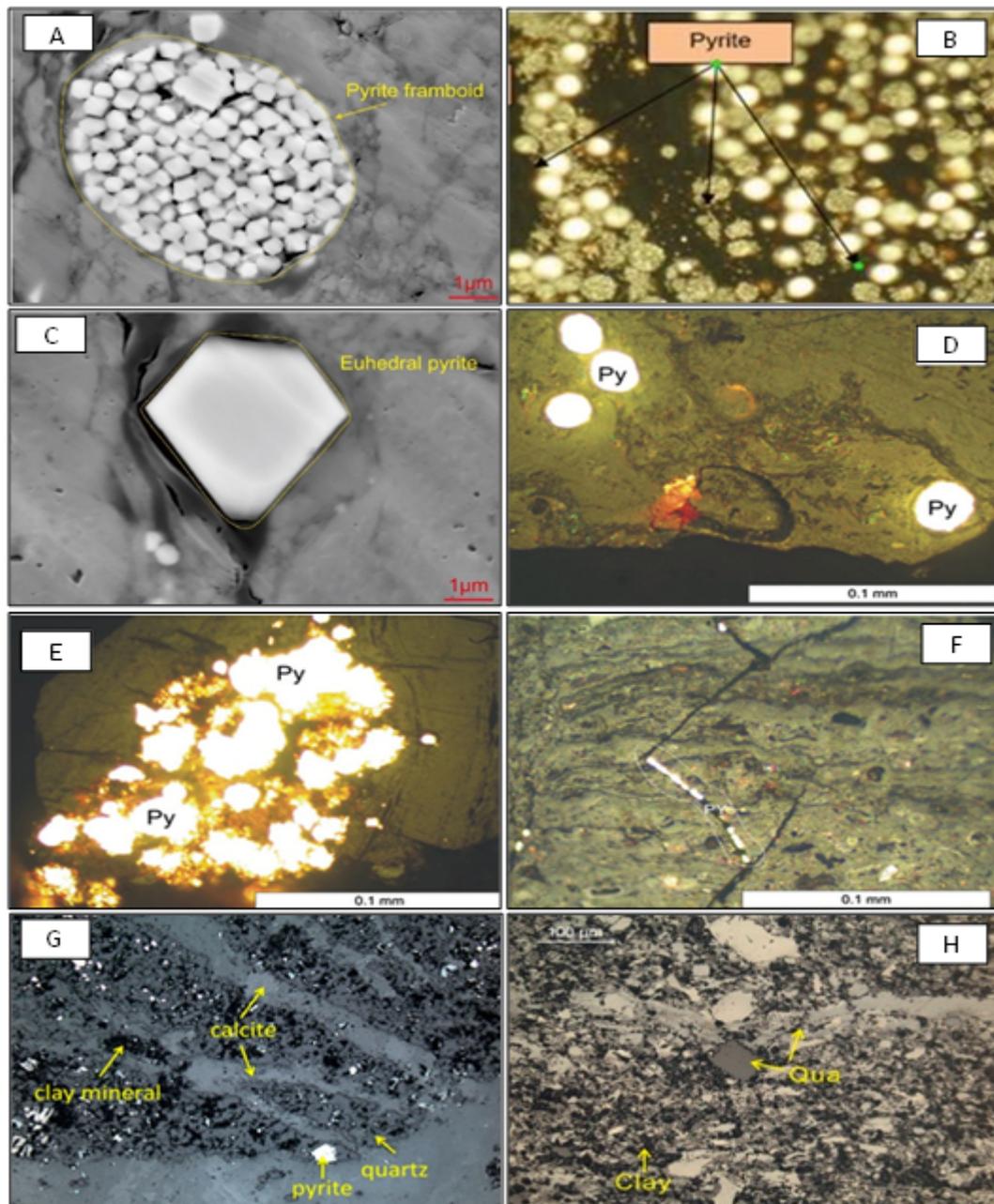
Mikroskop optik (sinar pantul), yang menggunakan mikroskop refleksi dan lampu standar atau lampu fluoresen, adalah metode analisis mineral untuk batubara saat ini. Ketika menjelaskan jenis dan jumlah mineral dalam batubara, metode ini sangat membantu. jenis mineral dan hubungannya dengan maseral adalah contoh informasi yang dapat dikumpulkan dengan cara ini. Tabel 2.7 (Nursanto dkk., 2011) menampilkan karakteristik mikroskopis dari beberapa mineral yang sering ditemukan di batubara.

Pengamatan mineragrafi dilakukan untuk mengamati sampel yang telah dipreparasi kemudian dibentuk menjadi lingkaran/silinder dengan menggunakan resin dengan cetakan diameter 3 cm hingga 5 cm dengan ketebalan 3 cm untuk melakukan pengamatan sayatan poles. Sifat optik dan sifat fisik merupakan bentuk identifikasi mineral yang mana sifat optik itu sendiri meliputi anisotropisme, warna, refleksi ganda, dan refleksi dalam sedangkan sifat fisik termasuk bentuk kristal, belahan dan kembaran (Craig *and* Vaughan., 1981).

Tabel 2.6 Sifat-sifat optik beberapa mineral yang umum terdapat pada batubara (Falcon and Snyman., 1986)

Mineral	Intensitas sinar pantul	Warna	Anisotropism	Ciri-ciri khusus
<i>Kaolinite, Illite, Mntmorilonite</i>	Tidak ada	Kelabu hitam	Isotropik	Lunak
<i>Calcite, dolomite, ankerite</i>	Sedang	Tidak berwarna-putih-kuning kecoklatan	Anisotropik tinggi, refl. dalam	Belahan rombik, kembaran, kekerasan sedang
<i>Siderite</i>	Tinggi	Kuning–coklat	Intern refl.	Kompak, nodular, keras
<i>Pyrite</i>	Sangat tinggi	Kuning perunggu	Isotrop	Berbutir masif, keras
<i>Marcasite</i>	Sangat tinggi	Kuning perunggu	Anisotrop tinggi	Tabular, keras
<i>Hematite</i>	Tinggi	Abu-abu	Anisotropik, refl. dalam	Tabular, berbutir, keras
<i>Limonite-Geothite</i>	Sedang	Abu-abu	Anisotropik lemah, refl. dalam	Masif, kompak, granular
<i>Quartz</i>	Rendah	Kelabu-hitam	Anisotropik lemah, refl. dalam	Granular, keras

Pengamatan sampel batubara menggunakan mikroskop telah banyak dilakukan sehingga dapat menggambarkan kenampakan mineral yang terdapat dalam batubara, beberapa contoh hasil pengamatan dengan *optical microscopy* dan *SEM (scanning electron microscopy)* berupa mineral pirit, lempung dan kuarsa (Gambar 2.8).



Gambar 2.8 Contoh Fotomikrograf Sampel Batubara (a) *framboidal pyrite*, (b) *framboidal pyrite*, (c) *Euhedral Pyrite* (Py), (d) *Euhedral Pyrite*, (e) *massive pyrite* (Py), (f) *epigenetic pyrite* (Py) dalam *cleats/fractures*; (a, c) menggunakan analisis *scanning electron microscopy* (SEM) (Khan et al, 2022); (b) menggunakan analisis *optical microscopy* (Anshariah et al, 2020); (d, e, & f) menggunakan analisis *optical microscopy* (Widodo et al, 2010); (g) menggunakan analisis *optical microscopy* (Zheng et al, 2017); (h) menggunakan analisis *optical microscopy* (Xie et al, 2016).

2.8 Klasifikasi batubara berdasarkan peringkat menurut *ASTM D388*

Klasifikasi ini dikembangkan di Amerika oleh Bureau of Mines yang akhirnya dikenal dengan klasifikasi menurut *ASTM (America Society for Testing and Material)*. Standar ini mencakup klasifikasi batubara berdasarkan peringkat, yaitu, menurut derajat metamorfosisnya, atau perubahan progresifnya, dalam rangkaian alamiah dari lignit ke antrasit. Untuk menentukan rank batubara diperlukan data *fixed carbon (dmmf)*, *volatile matter (dmmf)* dan nilai kalor dalam Btu/lb dengan basis *mmmf (moist, mmf)*. Klasifikasi *ASTM (America Society for Testing and Material)* sangat umum dilakukan dalam setiap penentuan peringkat batubara, kebanyakan peneliti di seluruh dunia menggunakan *ASTM* dalam menunjang penelitiannya, tidak hanya dalam menentukan peringkat batubara, namun juga dalam analisis lain mengenai batubara, dan hal ini efektif untuk digunakan. Penentuan peringkat batubara dilakukan untuk mengetahui jenis batubara tersebut, apakah lignit, sub-bituminus, bituminus, hingga antrasit.

Batubara peringkat menengah ke atas digunakan data karbon padat '*dmmf*' dan kadar zat terbang '*dmmf*'. Sedangkan untuk batubara peringkat menengah ke bawah digunakan data nilai kalori '*mmf*'. Menurut *ASTM* batubara peringkat rendah (*low rank coal*) adalah batubara yang mempunyai kadar karbon padat '*dmmf*' <69% atau kadar zat terbang '*dmmf*' > 31% dan nilai kalori '*mmf*' <10.500 Btu/lb atau < 8.333 Kcal/kg. Untuk klasifikasi batubara berdasarkan peringkat ini dimuat pada *ASTM D388* dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Pembatubaraan mengalami proses fisika dan kimia yang berlangsung dari gambut hingga batubara, Secara umum, kategori peringkat ditentukan berdasarkan perubahan nilai parameter batubara setelah dilakukan analisis. Adanya perbedaan tampilan fisik batubara tidak dapat menjadi bahan pertimbangan untuk mengklasifikasikan atau menentukan peringkat batubara. Pengujian parameter yang berbeda sering diperlukan untuk membedakan peringkat batubara. Setiap negara mempunyai perbedaan Kategori dan nilai parameter yang digunakan, tetapi secara umum, peringkat batubara berlanjut dalam peningkatan batubara lignit, sub-bituminus, bituminus, hingga antrasit.

Tabel 2.7 Klasifikasi batubara berdasarkan peringkat (ASTM D388-19a)

Class/Group	$FC_{d,MMf}$ Limits, %		$VM_{d,MMf}$ Limits, %		$GCV_{in,MMf}$ Limits ^B				Agglomerating Character
					Btu/lb		MJ/kg ^C		
	Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
<i>Anthracitic:</i>									
Meta-anthracite	98	2	} non - agglomerating
Anthracite	92	98	2	8	...	...	...	...
Semianthracite ^D	86	92	8	14	...	...	...	...
<i>Bituminous:</i>									
Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	} commonly agglomerating ^E
Medium volatile bituminous Coal	69	78	22	31	...	...	...	...
High volatile A bituminous Coal	...	69	31	...	14000	...	32.557	...	
High volatile B bituminous Coal	...	...	...	...	13000	14000	30.232	32.557
High volatile C bituminous Coal	...	...	...	...	11500	13000	26.743	30.232
					10500	11500	24.418	26.743		agglomerating
<i>Subbituminous:</i>									
Subbituminous A coal	10500	11500	24.418	26.743	} non - agglomerating
Subbituminous B coal	...	...	...	...	9500	10500	22.09	24.418
Subbituminous C coal	...	...	...	...	8300	9500	19.30	22.09
<i>Lignitic:</i>									
Lignite A	6300	8300	14.65	19.30	}
Lignite B	...	...	...	...	...	6300	...	14.65

A: This classification does not apply to certain coals, as discussed in Section 1.

B: Refers to coal containing its natural inherent moisture but not including visible water on the surface of the coal.

C: Megajoules per kilogram. To convert British thermal units per pound to megajoules per kilogram, multiply by 0.0023255

D: If agglomerating, classify in low volatile group of the bituminous class.

E: It is recognized that there may be nonagglomerating varieties in these groups of the bituminous class and that there are notable exceptions in the high volatile C bituminous group.