



**REKONSTRUKSI FASIES DAN LINGKUNGAN  
'ENGENDAPAN BATUBARA FORMASI MALLAWA  
PROVINSI SULAWESI SELATAN**

***RECONSTRUCTION OF COAL FACIES AND DEPOSITIONAL  
ENVIRONMENT OF MALLAWA FORMATION SOUTH  
SULAWESI PROVINCE***

**DISERTASI**

**ANSHARIAH**

**D033181001**



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI KEBUMIHAN DAN LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
G O W A  
2023**



# **REKONSTRUKSI FASIES DAN LINGKUNGAN PENGGENDAPAN BATUBARA FORMASI MALLAWA PROVINSI SULAWESI SELATAN**

**DISERTASI**



**ANSHARIAH**

**D033181001**

**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI KEBUMIHAN DAN LINGKUNGAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**G O W A**

**2023**



## **PENGAJUAN DISERTASI**

# **REKONSTRUKSI FASIES DAN LINGKUNGAN PENGENDAPAN BATUBARA FORMASI MALLAWA PROPINSI SULAWESI SELATAN**

**Disertasi**  
**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor**  
**Program Studi Ilmu Teknik Geologi**

**Disusun dan diajukan oleh**

**ANSHARIAH**  
**D033181001**

**Kepada**

**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS HASANUDDIN**  
**GOWA**  
**2023**



## DISERTASI

# REKONSTRUKSI FASIES DAN LINGKUNGAN PENGENDAPAN BATUBARA FORMASI MALLAWA PROPINSI SULAWESI SELATAN

ANSHARIAH  
NIM. D033181001

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Teknologi Kebumihan dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 27 Desember 2023 Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,  
Promotor

Prof. Dr. rer. nat. Ir. A. M. Imran  
NIP. 196306051989031005

Kopromotor I

Kopromotor II

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

Dr. Ulva Ria Irfan, ST., MT  
NIP. 197006061994122001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

Ketua Program Studi S3  
Teknologi Kebumihan dan lingkungan



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli,  
ST., MT., IPM., ASEAN Eng

Dr. Ulva Ria Irfan, ST., MT  
NIP. 197006061994122001

**PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI  
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Anshariah  
Nomor mahasiswa : D033181001  
Program studi : Teknologi Kebumihan dan Lingkungan

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul "Rekonstruksi Fasies Dan Lingkungan Pengendapan Batubara Formasi Mallawa Propinsi Sulawesi Selatan" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. rer. nat. Ir. A. M. Imran sebagai Promotor, Dr. phil. nat. Sri Widodo, ST., MT., sebagai co-promotor 1, Dr. Ulva Ria Irfan, ST., MT., sebagai co-promotor 2, Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Indonesian Journal on Geoscience (IJOG) dengan judul artikel: Reconstruction of Coal Forming Based on Organic Geochemistry and Petrography Analysis, Coal From Bone Regency, South Sulawesi Province, Indonesia (on reviewed); Prosiding IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, DOI: 10.1088/1755-1315/575/1/012169) sebagai artikel dengan judul "Correlation of total sulfur content to the percentage of pyrite content by microscopy in Mallawa formation coal, South Sulawesi Province, Indonesia" dan di (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, dan DOI 10.1088/1755-1315/921/1/012054) sebagai artikel dengan judul "The influence of intrusion on change characteristic of coal in Mallawa Formation of South Sulawesi Province".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 01 Desember 2023

Yang menyatakan



Anshariah



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas berkah dan Rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi ini. Tentu saja bukan hal yang mudah untuk bisa mencapainya, namun selalu ada saja pertolongan Allah SWT kepada penulis melalui orang-orang baik yang senantiasa diberi izin untuk berbuat kebaikan kepada sesama. Suka duka tentu saja ada, terlebih lagi ketika memasuki tahap pengambilan dan analisis data di lapangan dan laboratorium yang bertepatan dengan dimualinya masa *lock down* akibat pandemi covid-19, sehingga membuat seluruh aktivitas terasa sangat lamban bahkan berhenti oleh kondisi pandemi. Dengan segala kerendahan hati, izinkan penulis menghaturkan ucapan terimakasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

1. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., sebagai Rektor Unhas Makassar.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT, sebagai Dekan Fakultas Teknik UNHAS.
3. Bapak Dr. Eng. Hendra Pachri, ST., MT., sebagai Ketua Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik UNHAS.
4. Dr. Ulva Ria Irfan, ST., MT sebagai Ketua Program Studi Teknologi Kebumian dan Lingkungan Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Ir. A. M. Imran, sebagai Promotor, Bapak Dr. Phil. nat. Sri Widodo, ST., MT., sebagai Co-Promotor I, Ibu Dr. Ulva Ria Irfan, ST., MT, sebagai Co-Promotor II.
6. Bapak Bapak Prof. Dr. Dahlang Tahir, S.Si., M.Si., Ph.D., Bapak Dr. Sufriadin, S.T., M.T., Ibu Dr. Ir. Hj. Ratna Husain L, M.T., Ibu Dr. Eng. Meutia Farida, S.T., M.T., sebagai anggota tim penguji
8. Bapak Dr. Sufriadin, ST, MT., sebagai Kepala Laboratorium Analisis Departemen Teknik Geologi Universitas Hasanuddin.
9. Seluruh dosen pengampu mata kuliah beserta seluruh dosen serta staf yang berada pada lingkup Program Studi Kebumian dan Lingkungan,
10. Rektor Universitas Muslim Indonesia Makassar.



0. Dekan FTI UMI Periode 2022-2026, Bapak Dr. Ir. Lamatinulu, ST., MT., IPM., Asean Eng, dan Dekan Fakultas Teknologi Industri Periode 2018-2022 Bapak Prof. Dr. Ir. H. Zakir Sabara HW, ST., MT., IPM., Asean Eng., dan jajarannya.
11. Rekan sejawat para dosen dalam lingkup FTI UMI, beserta seluruh staf.
12. Rekan-rekan mahasiswa lintas angkatan Prodi S3 TKL FTUH.
13. Seluruh Staf Tata Usaha Fakultas Teknik dan staf Unhas, pada umumnya
14. Ir. Harwan, ST., MT, IPP., Ir. Agus Adrianto Budiman, ST., MT., IPP., Dr. Rahmaniara Rahman, ST, MT., The Coal Team, (Bayu, Tholib, Fahmi dan Emin), Nong serta para mahasiswa yang pernah membantu penulis selama studi.
14. Kakak penulis, Prof. Dr. Hj. Masrurah Mokhtar, MA. dan Dr(HC). H. Mokhtar Noer Jaya, SE., MSi.,(alm) ; Dr. Ir. Hj. St. Maryam Hafram., MT. dan Maladi Amin, SH,; Dr. Ir. Hadiratul Kudsiah, M.P., dan Prof. Dr. Ir. Ahsin Rifa'i, M.Si.
15. Teriring Al-Fatihah setiap saat kepada kedua orangtua penulis, H. Abd. Hafid dan Hj. St. Ramlah, yang tak memiliki gelar akademik satu pun, namun sangat mendorong keempat putrinya untuk senantiasa menuntut ilmu setinggi-tingginya,
16. The biggest support system penulis, suami, Shahrir, SE., dan keempat putra-putri penulis (Aura Apatania Salsabila, Muhammad Ranggadewa, Muhammad Gilang Maraja, dan Ayla Dwika Rezkyta/Meyling Mappakacening), yang selalu kompak dengan slogan: Petualangan Abadi Adalah Keluarga. Tak ada kata yang mampu menggambarkan rasa terimakasih, cinta dan sayang. Terkhusus anak bungsu penulis yang selalu menyertakan dalam doa usai sholatnya agar sekolah S3-nya Bunda bisa selesai, dan penulis selalu berucap S3 Bunda adalah untuknya.

Akhir kata, tak ada gading yang tak retak, penulis menyadari bahwa penelitian disertasi ini masih belum sempurna yang diinginkan, masih perlu masukan dan perbaikan bagi, namun penulis tetap berharap agar tulisan ini akan memberi manfaat bagi pembacanya. Amin.

Makassar, 14 Desember 2023

Penulis



## ABSTRAK

**ANSHARIAH.** Rekonstruksi Fasies Dan Lingkungan Pengendapan Batubara Formasi Mallawa Propinsi Sulawesi Selatan (Promotor **A.M. Imran**, Ko-promotor **Sri Widodo** dan **Ulva Ria Irvan**).

Penelitian ini bertujuan Mengevaluasi karakteristik geokimia organik, maseral, polen, dan anorganik batubara Formasi Mallawa Sulawesi Selatan dan merekonstruksi fasies dan lingkungan pengendapan batubara pada Formasi Mallawa. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini adalah: petrografi, Palinologi, *Gas Chromatografi Mass Spektrometri* (GCMS), proksimat, ultimat, dan kalori.

Hasil penelitian yang didapatkan adalah Maseral penyusun batubara Formasi Mallawa adalah terusun oleh maseral vitrinit, liptinite dan inertodetrinit dan didominasi oleh vitrinite yaitu pada kisaran 27%-83,2%. Asal tumbuhan pembentuk batubara Formasi Mallawa berdasarkan geokimia organik dan polen adalah dari *Angiospermae*, *Gymnospermae* dan *pteridophyte*. Karakteristik geokimia organik pada batubara Formasi Mallawa ditunjukkan dengan tingkat kematangan yang masih rendah atau *immature* berdasarkan rasio Pr/Ph terhadap *Carbon Preference Index* (CPI), rasio Ts/(Ts+Tm) dan C31 22S/(22S+22R) homohopane. Berdasarkan pengukuran nilai *reflectance of Vitrinite* maka batubara Formasi Mallawa termasuk *subbituminous*. Lingkungan pengendapan batubara Formasi Mallawa adalah pada lingkungan *marsh-limnic* dengan perubahan gambut *low moor* yang eutrofi menjadi gambut pada moor antara yang mesotrophy. Sementara secara geokimia pengendapan batubara Formasi Mallawa berada pada tipe II/III Terogen pada lingkungan transisional dengan masukan tumbuhan yang bervariasi. Secara palinologi, batubara Formasi Mallawa dibagi kedalam *Zona freshwater Peat Swamp*, *Zona Mangrove*, dan *Zona Mountain Rain Forest*.

**Kata kunci:** Formasi Mallawa, maseral, palinologi, geokimia organik, *Angiospermae*



## ABSTRACT

**ANSHARIAH.** *Reconstruction of Facies and Coal Deposition Environment of Mallawa Formation of South Sulawesi Province (Promoter A.M. Imran, Co-promoters Sri Widodo and Ulva Ria Irvan).*

*This research aims to evaluate the geochemical characteristics of organic, maseral, pollen, and inorganic coal of Mallawa Formation of South Sulawesi and reconstruct the facies and of coal depositional environment in Mallawa Formation. The analysis conducted in this research are: petrography, Palynology, Gas Chromatography Mass Spectrometry (GCMS), proximate, ultimate, and calorific value.*

*The results of the research obtained are the Mallawa Formation coal macerals are composed of vitrinite, liptinite and inertodetrinite maserals and dominated by vitrinite in the range of 27%-83.2%. The origin of plants forming Mallawa Formation coal based on organic geochemistry and pollen is from Angiosperms, Gymnosperms and pteridophytes. The organic geochemical characteristics of Mallawa Formation coal are indicated by a low level of maturity or immature based on the Pr/Ph ratio of Carbon Preference Index (CPI),  $Ts/(Ts+Tm)$  ratio and  $C_{31} 22S/(22S+22R)$  homohopane. Based on the measurement of the reflectance value of Vitrinite, the Mallawa Formation coal is sub bituminous. The depositional environment of the Mallawa Formation coal is a marsh-limnic environment with changes in eutrophic low moor peat to mesotrophic intermediate moor peat. Meanwhile, geochemically, the Mallawa Formation coal is deposited in type II/III Terogen in a transitional environment with varied plant inputs. Palynologically, Mallawa Formation coal is divided into zone of Freshwater Peat Swamp Zone, Mangrove Zone, and mountain rain forest.*

**Keywords:** *Mallawa Formation, maceral, palynology, organic geochemical, Angiospermae*



## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Pengajuan Disertasi .....	ii
Persetujuan Disertasi .....	iii
Pernyataan Keaslian Disertasi .....	iv
Kata Pengantar .....	v
Abstrak .....	ix
<i>Abstract</i> .....	x
Daftar Isi .....	xi
Daftar Tabel .....	xv
Daftar Gambar .....	xvi
Daftar Lampiran .....	xxi
<b>BAB I</b> Pendahuluan .....	1
1.1       Latar Belakang .....	1
1.2       Perumusan Masalah .....	3
1.3       Tujuan Penelitian .....	3
1.4       Manfaat Penelitian .....	3
1.5       Ruang Lingkup/Batasan Penelitian .....	4
<b>BAB II</b> Kerangka Konseptual Dan Hipotesis Penelitian .....	6
2.1       Kerangka Konseptual .....	6
2.1.1.    Geologi Regional .....	6
2.1.1.1    Stratigrafi .....	6
2.1.1.2    Struktur Geologi .....	7
2.1.2.    Batubara .....	7
2.1.2.1.   Komponen organik penyusun batubara .....	7
2.1.2.2.   Fasies pembentukan gambut di iklim tropis .....	9
2.1.2.3    Karakteristik Batubara di Indonesia .....	14
2.1.2.4    Kematangan Batubara .....	15
2.1.2.5.   Geokimia Organik Batubara Tersier .....	17
2.1.2.6    Palinologi .....	20
2.2.       Hippotesis Penelitian .....	22



<b>BAB III</b>	<b>Karakteristik Batubara Formasi Mallawa .....</b>	<b>24</b>
3.1	Abstrak .....	24
3.2	Pendahuluan .....	24
3.3	Metodologi Penelitian .....	26
3.3.1	Analisis Proksimat .....	29
3.3.2	Analisis Petrografi .....	30
3.4	Hasil Penelitian .....	31
3.5	Pembahasan .....	37
3.5.1	Korelasi persentasi karbon padat terhadap nilai kalori pada batubara Mallawa Sulawesi Selatan .....	37
3.5.2	Korelasi Kandungan Total Sulfur Terhadap Persentasi Kandungan Mineral Pirit Secara Mikroskopi .....	39
3.5.3	Pengaruh Intrusi terhadap karakteristik batubara Formasi Mallawa.....	41
3.6	Kesimpulan .....	43
3.7	Daftar Pustaka .....	43
<b>BAB IV</b>	<b>Geokimia Organik, Petrografi Dan Palinologi Batubara Formasi Mallawa</b>	<b>45</b>
4.1	Abstrak .....	45
4.2	Pendahuluan .....	45
4.3	Metodologi Penelitian .....	46
4.4	Hasil Penelitian .....	47
4.4.1	Hasil Analisis Petrografi Formasi Mallawa .....	47
4.4.2	Hasil Analisis Geokimia Organik Formasi Mallawa .....	50
4.4.2.1	Hidrokarbon n-Alkana dan Isoprenoid .....	50
4.4.2.2	Triterpenoid .....	52
4.4.2.3	Steroids .....	53
4.4.2.4	Fraksi Hidrokarbon Aromatik .....	54
4.4.3	Hasil Analisis Palinologi Formasi Mallawa .....	59
4.5	Pembahasan .....	60
4.5.1	Geokimia Organik, Petrografi dan Palinologi Batubara Bantimala Kabupaten Pangkep Sulawesi Selatan Indonesia....	60
4.5.1.1	Analisis Petrografi .....	60
4.5.1.3	Palinologi .....	62
4.5.1.4	Analisis Proksimat, Ultimat, dan Kalori .....	63
4.5.2	Rekonstruksi Pembentukan Batubara Berdasarkan Analisis Geokimia Organik dan Petrografi; Batubara Massenrengpulu Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia .....	64
4.5.2.1	Analisis Petrografi Daerah Massenrengpulu .....	64
4.5.2.2	Analisis Geokimia Organik Massenrengpulu .....	66
4.5.4	Karakteristik Palinologi Batubara Formasi Mallawa .....	70



4.5.5	Penarikan Umur Batubara Formasi Mallowa .....	71
4.6	Kesimpulan .....	72
4.7	Referensi .....	73
<b>BAB V</b>	<b>Pembahasan .....</b>	<b>79</b>
<b>BAB VI</b>	<b>Kesimpulan dan Penutup .....</b>	<b>85</b>
4.1	Kesimpulan .....	85
4.2	Saran .....	85
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>86</b>
	<b>Lampiran .....</b>	<b>98</b>



## DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 1	Hubungan penelitian sebelumnya dengan penelitian yang dilakukan.....	5
Tabel 2	Hasil uji proksimat dan ultimat (sulfur) batubara daerah penelitian .....	31
Tabel 3	Hasil analisis Kalori Batubara daerah penelitian .....	32
Tabel 4	Hasil analisis petrografi batubara daerah penelitian .....	35
Tabel 5	Isoprenoid Pristane/Phytane, rasio Pristane/n-C17 dan Phytane terhadap n-C18 serta CPI batubara Formasi Mallawa .....	51
Tabel 6	Senyawa triterpenoid Formasi Mallawa .....	61
Tabel 7	Parameter untuk biomarker sterane berasal dari fragmenogram m/z 217 dari sampel batubara Formasi Mallawa .....	63
Tabel 8	Senyawa dimethilnaphthalene pada kromatogram m/z 156 .....	65
Tabel 9	Senyawa trimetilnaftalena pada Kromatogram m/z 170 .....	66
Tabel 10	Senyawa tetrametilnaftalena pada Kromatogram m/z 184 .....	57
Tabel 11	Senyawa kadalena pada Kromatogram m/z 198 .....	58
Tabel 12	Distribusi senyawa fenantrena dan alkilfenantrena pada batubara Formasi Mallawa .....	59
Tabel 13	Hasil analisis palinomorf pengapit batubara Formasi Mallawa	60
Tabel 14	Total Maseral dan Skalar Indikator Fasies .....	61
Tabel 15	Isoprenoid Pristane/Phytane, rasio Pristane/n-C17 dan Phytane terhadap n-C18 serta CPI .....	65
Tabel 16	Penentuan umur batubara Formasi Mallawa berdasarkan umur palinomorf .....	72



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Kerangka konseptual penelitian .....	23
Gambar 2	Lokasi Pengambilan sampel pada daerah Kabupaten Bone, Maros, Pangkep dan Barru .....	27
Gambar 3	Kenampakan lapangan sampel batubara Massenrengpulu pada bagian bawah seam (a), bagian tengah (b) dan bagian atas (c) .....	28
Gambar 4	Kenampakan lapangan sampel batubara Mallawa pada bagian bawah seam (a), bagian tengah (b) dan bagian atas (c) .....	28
Gambar 5	Kenampakan lapangan sampel batubara Bantimala pada bagian bawah seam (a), bagian tengah (b) dan bagian atas (c) .....	28
Gambar 6	Peralatan yang digunakan dalam laboratorium untuk analisis proksimat .....	30
Gambar 7	Grafik analisis proksimat batubara Daerah Massenrengpulu .....	32
Gambar 8	Grafik analisis proksimat batubara Daerah Mallawa .....	33
Gambar 9	Grafik analisis proksimat batubara Daerah Bantimala ....	33
Gambar 10	Grafik analisis proksimat batubara Daerah Pujananting	34
Gambar 11	Grafik analisis kandungan sulfur batubara Formasi Mallawa .....	34
Gambar 12	Grafik analisis nilai kalori batubara Formasi Mallawa .....	35
Gambar 13	Grafik korelasi karbon padat dan nilai kalori batubara Massenrengpulu .....	38
Gambar 14	Grafik korelasi nilai karbon padat dan nilai kalori .....	38
Gambar 15	Grafik hubungan antara kandungan total sulfur dan persentase pirit Batubara.....	43
Gambar 16	Kenampakan mikroskopi pirit Framboidal (a, b) dan massive (c, d), dengan perbesaran 500x .....	44



Gambar 17	Grafik perbandingan analisis proksimat Formasi Mallawa Daerah Mallawa, Daerah Bantimala dan Daerah Massenrengpulu .....	45
Gambar 18	Perbandingan total kandungan maseral vitrinite, liptinite dan inertinite kenampakan maseral vitrinite .....	449
Gambar 19	Kenampakan detrovitrinite dt dan pirit massive Pr dalam sinar halogen terhadap sampel MM01 .....	48
Gambar 20	Kenampakan semifusinite Sm, pirit z, dan (b) resinite r berassosiasi detrovitrinite dalam sinar halogen terhadap sampel MM02 .....	48
Gambar 21	Kenampakan sklerotinit Sc, pirit masif Pr, mineral matter mm pada detrovitrinite dalam sinar halogen terhadap sampel MM03 .....	48
Gambar 22	Kenampakan ulminite ul, funginite fg, mineral matter mm, dan densinite dn pada sampel MB01 .....	49
Gambar 23	Kenampakan textinite tx, corpohuminite ch, mineral matter mm, dan pada sampel MB02 .....	49
Gambar 24	Kenampakan gelinite ge, suberinite sb pada sampel MB03	49
Gambar 25	Kromatogram hidrokarbon n-Alkana Massenrengpulu ....	51
Gambar 26	Kromatogram m/z 191 triterpenoid Daerah Massenrengpulu (MM) .....	53
Gambar 27	Kromatogram m/z 217 sterane Daerah Massenrengpulu	54
Gambar 28	Kromatogram m/z156 dimetilnaftalena Daerah Massenrengpulu .....	55
Gambar 29	Kromatogram m/z170 trimetilnaftalena Daerah Massenrengpulu .....	56
Gambar 30	Kromatogram m/z184 Tetrametilnaftalena Daerah Massenrengpulu .....	57
Gambar 31	Kromatogram m/z198 Kadalena Daerah Massenrengpulu	58
Gambar 32	Kromatogram m/z178 fenantrena Daerah Massenrengpulu	58
Gambar 33	Plotting nilai TPI dan GI pada diagram Calder untuk penentuan lingkungan pengendapan .....	62
Gambar 34	Plotting nilai GWI dan VI pada diagram Calder dalam penentuan lingkungan pengendapan .....	62



Gambar 35	Kenampakan palinomorf pada batuan pengapit batubara Bantimala: (a) Monolete, (b) Proxapertites spp, (c) Vemicatosporite, (d) Proxapertites Cursus, (e) Tricolpate, (f) Malvaceae, (g) Triporate, (h) Trilete, (i) Graminae, (j) Palmae Pollenites Kutchences, (k) Palmae sp, (l) Spiniferites. ....	63
Gambar 36	Hasil plotting nilai TPI dan GI pada diagram Diessel (1986) .....	65
Gambar 37	plotting GWI dan VI pada diagram Calder et. al. (1991)...	66
Gambar 38	Rasio perbandingan Pr/n-C17 dan Ph/n-C18, dimodifikasi dari (Van Koeverden et. al., (2011).....	67
Gambar 39	Cross plotting rasio Pr/Ph terhadap CPI (modified after Meyers and Snowdon, 1993) .....	67
Gambar 40	Cross-plot antara rasio $Ts/(Ts+Tm)$ dan $C31\ 22S/(22S+22R)$ homohopane .....	68
Gambar 41	Ratio of parameter biomarker sterane $C29\ 20S/(20S+20R)$ terhadap $C29\ \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ (Waples and Machihara, 1990). ....	69
Gambar 42	Plotting triangle diagram of C27, C28, C29 (Peters and Moldowan, 1991). ....	69
Gambar 43	Palinomorf pada batubara daerah Mallawa (a) Monelete, (b) Trilete, (c) Pandaniites, (d) Podocarpus, (e) Tricolpate	71



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil lab analisis Geokimia Organik



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Batubara merupakan salah satu sumber energi primer yang penting dan merupakan komoditas perdagangan di Indonesia yang bernilai sangat ekonomis. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Badan Geologi, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi, sampai tahun 2021 sumber daya batubara Indonesia adalah sebesar 110.069,91 juta ton atau 110,069 miliar ton; sedangkan cadangan batubara Indonesia adalah sebesar 36.278,85 juta ton atau 36,278 miliar ton. Spesifikasi batubara menurut Hadiyanto, 1994, (dalam Ulum, dkk, 1997), beberapa batubara di daerah tertentu memiliki kandungan sulfur yang cukup tinggi, yaitu: Bojongmanik, Jawa Barat; Nanga Tabidah, Kalimantan; Mallawa dan Patuku, Sulawesi Selatan.

Batubara pada Formasi Mallawa di Sulawesi Selatan tersebar di Daerah Kabupaten Maros, Pangkep, Barru, Bone, dan Soppeng. Batubara tersebut dijumpai sebagai bentuk sisipan dan berbentuk lensa dengan ketebalan 1-2 meter yang terbentuk pada lingkungan *back barrier* pada kondisi lingkungan *limnic-marsh* (Anshariah, dkk, 2018). Batubara pada Formasi Mallawa umumnya memiliki nilai kalori yang cukup tinggi dan memenuhi syarat untuk bahan bakar. Namun pemanfaatannya belum optimal disebabkan oleh kandungan sulfur yang tinggi, yaitu di atas dua persen (Anggayana dkk., 2003; Widodo, dkk. 2017; Anshariah, dkk., 2018). Batubara dengan kandungan sulfur yang tinggi jika dimanfaatkan, akan menimbulkan pencemaran lingkungan. Disamping itu, alat yang digunakan akan mengalami proses korosi (Ulum, dkk, 1997).

Parameter lain yang digunakan untuk menentukan pemanfaatan atau kualitas batubara adalah dari kandungan abu, kadar air, *volatile matter*, *fixed carbon*, dan nilai kalori (Sukandarrumidi, 2009; Widodo, dkk. 2014; Anshariah, dkk. 2018). Parameter tersebut berhubungan dengan komposisi maseral dan kandungan mineral serta kondisi lingkungan pembetukan batubara (Anggayana, 2007; Widodo, 2008; Widodo, dkk. 2009; Widodo, dkk. 2010; Anshariah, dkk.



2018). Analisis proksimat dilakukan untuk mengetahui karakter dari parameter batubara tersebut. Sedangkan untuk menafsirkan lingkungan pengendapan dapat diketahui dari komposisi maseral (Heryanto, 2009). Komposisi maseral batubara dapat diketahui dari analisis petrografi. Selain itu, dalam analisis petrografi juga diketahui peringkat batubara, berdasarkan nilai *rerlektance of vitrinite* (Amijaya dan Littke, 2004; Widodo, 2008; Widodo, dkk. 2009; Widodo, dkk. 2010; Widodo, dkk., 2014; Widodo, dkk. 2016; Anshariah, dkk. 2018).

Penelitian mengenai karakteristik dan lingkungan pengendapan batubara telah dilakukan pada batubara di beberapa formasi pembawa batubara (*coal bearing formation*) di daerah lain di Indonesia. Misalnya, berdasarkan kajian fasies organik batubara Formasi Mengkarang Sumatera Tengah, diketahui bahwa batubara terendapkan pada Zona “*wet limnic-telmatic*” sampai “*telmatic wet forest swamp*”. Konsep fasies organik ini dapat diterapkan dalam konteks kajian cekungan, dan merupakan salah satu parameter untuk penafsiran lingkungan pengendapan (Suwarna, 2006).

Kandungan maseral pada beberapa penelitian batubara di Indonesia (Daulay, 1994; Nas, 1994; Anggayana, 1996; Amijaya, 2004; Anggayana dan Widayat, 2007; Widodo, 2008; Anggayana dan Rahmad, 2009; Rahmad, 2012; Anshariah, dkk, 2018) menunjukkan nilai vitrinit yang dominan (78%-91,4%), maseral liptinit (1,9%-16,39%), dan maseral inertinit (3,0%-20,1%).

Dalam Anggayana, dkk., 2011, dituliskan bahwa terdapatnya variasi komposisi maseral secara mikroskopi menunjukkan adanya perubahan komunitas tumbuhan atau fasies batubara yang mengakibatkan terdapatnya ketidakhomogenan kualitas batubara.

Suarez-Ruiz dan Crelling (2008) menjelaskan bahwa faktor mendasar dalam kontrol kualitas batubara adalah komponen organik pembentuk batubara (maseral). Kandungan komponen organik dari tumbuhan asal pembentuk batubara bersifat heterogen, sehingga pendekatan evaluasinya dapat dilakukan dengan mengetahui tipe batubara melalui pengamatan mikroskopi.

Penelitian tentang kandungan maseral batubara pada Formasi Mallawa masih sangat kurang sementara kandungan maseral merupakan hal yang menarik untuk mengetahui fasies dan lingkungan pengendapan dihubungkan dengan



karakteristik batubara pada Formasi Mallawa. Demikian pula halnya dengan penelitian mengenai biomarker tumbuhan asal pembentuk batubara masih sangat kurang atau bahkan belum ada. Untuk itu diharapkan data hasil penelitian ini dapat membantu dalam mengungkap lebih banyak informasi tentang batubara Formasi Mallawa khususnya, dan batubara Indonesia pada umumnya. Satu hasil penelitian tentu akan menghasilkan data terbaru. Semakin banyak data tersedia akan semakin membantu didalam menjawab pertanyaan-pertanyaan geologi dimasa-masa mendatang, serta dapat mendukung berkembangnya ilmu pengetahuan, khususnya karakteristik, fasies, lingkungan pengendapan serta biomarker tumbuhan asal pembentuk batubara.

## 1.2. Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dipecahkan dalam penelitian ini, yaitu:

- a. Bagaimana karakteristik batubara, maseral, geokimia organik, polen, dan mineral pada Formasi Mallawa berdasarkan hasil analisis petrografi, geokimia organik dan anorganik, dan palinologi.
- b. Bagaimana fasies dan lingkungan pengendapan batubara berdasarkan karakteristik geokimia organik dan anorganik.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Adapun yang menjadi tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Mengevaluasi karakteristik geokimia organik, maseral, polen, dan anorganik batubara Formasi Mallawa Sulawesi Selatan.
- b. Merekonstruksi fasies dan lingkungan pengendapan batubara pada Formasi Mallawa.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan memberikan kontribusi dalam penyajian data bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam mengetahui fasies dan lingkungan pengendapan batubara serta kaitannya dengan karakteristik batubara (kualitas). Sebagai data pembanding kualitas batubara dengan formasi lainnya, khususnya di Indonesia, berdasarkan analisis organik dan anorganik yang belum banyak publikasi sebagai referensi, terutama dari analisis geokimia dan organiknya.



Kedepannya data penelitian ini dapat dijadikan acuan dalam melakukan strategi dan pentahapan eksplorasi serta pemanfaatan batubara.

### 1.5. Ruang Lingkup/Batasan Penelitian

Penulis membatasi ruang lingkup penelitian sebagai berikut:

1. Penentuan karakteristik batubara Formasi Mallawa berdasarkan hasil analisis proksimat analisis kandungan total sulfur, penentuan tingkat kematangan (*rank*) batubara, analisis anorganik (XRD).
2. Merekonstruksi fasies pengendapan batubara berdasarkan persentase kandungan maseral dan mineral menggunakan diagram Dissel (1986) dan diagram Calder, *et. al.*, (1991).
3. Analisis biomarker menggunakan *GC-MS* dan analisis polen untuk mengetahui *precursor* dan *species* tumbuhan asal pembentuk batubara





## BAB II

### KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN

#### 2.1 Kerangka Konseptual

##### 2.1.1 Geologi Regional

Secara regional, daerah penelitian termasuk dalam Peta Geologi Lembar Pangkajene dan Watampone Bagian Barat Sulawesi, skala 1:250.000 yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung (Sukamto dan Supriatna, 1982).

##### 2.1.1.1 Stratigrafi

Daerah penelitian terletak pada daerah Doi-doi Kabupaten Barru dan daerah Massenrengpulu Kabupaten Bone. Batubara pada daerah penelitian secara regional termasuk pada Formasi Malawa. Formasi Mallawa merupakan formasi batuan yang bersusunan batupasir, konglomerat, batulanau, batulempung, dan napal, dengan sisipan lapisan atau lensa batubara dan batulempung; batupasirnya sebagian besar batupasir kuarsa, adapula yang arkosa, graywake, dan tufaan, umumnya berwarna kelabu muda dan coklat muda; pada umumnya bersifat rapuh, kurang padat; konglomeratnya sebagian kompak; batulempung, batugamping dan napalnya umumnya mengandung moluska yang belum diperiksa, dan berwarna kelabu muda sampai kelabu tua; batubara berupa lensa setebal beberapa sentimeter dan berupa lapisan sampai 1,5 m. (Sukamto dan Supriatna, 1982).

Berdasarkan fosil yang dijumpai pada daerah ini, diperkirakan umur dari formasi ini adalah Eosen (Wolcott, USGS, 1973., dalam Sukamto dan Supriatna, 1982) dengan lingkungan pengendapan paralis sampai laut dangkal. Tebal formasi ini tidak kurang 400 m; tertindih selaras oleh batugamping Formasi Tonasa (Temt), dan menindih tak selaras batuan sedimen Formasi Balangbaru (Kb) dan batuan gunungapi terpropilitkan (Tpv). (Sukamto dan Supriatna, 1982).

Berdasarkan hasil penelitian lokal terhadap lokasi penelitian diketahui, bahwa umur dari batulempung yang tersingkap disekitar lokasi penelitian (Massenrengpulu) adalah Eosen Tengah dengan lingkungan pengendapan transisi-laut dangkal (Harahap, 2009), yang berdasarkan kesamaan ciri fisik di



lapangan dan letak geografis yang relatif dekat maka batulempung pada daerah penelitian memiliki kesamaan ciri dengan Formasi Malawa, yang terendapkan di lingkungan paralis-laut dangkal dan berumur Eosen.

### 2.1.1.2 Struktur Geologi Regional

Pada Kala Eosen Awal, daerah di barat berupa tepi daratan yang dicirikan oleh endapan darat serta batubara di dalam Formasi Mallawa; sedangkan di daerah timur, berupa cekungan laut dangkal tempat pengendapan batuan klastika bersisipan karbonat Formasi Salo Kalupang. Pengendapan Formasi Mallawa kemungkinan hanya berlangsung selama Eosen Awal, sedangkan Formasi Salo Kalupang berlangsung sampai Oligosen Akhir.

Proses tektonik di bagian barat ini berlangsung sampai Miosen Awal; sedangkan di bagian timur kegiatan gunungapi sudah mulai lagi selama Miosen Awal, yang diwakili oleh Batuan Gunungapi Kalamiseng dan Soppeng (Tmkv dan Tmsv). Akhir kegiatan gunungapi Miosen Awal itu diikuti oleh tektonik yang menyebabkan terjadinya permulaan Terban Walanae yang kemudian menjadi cekungan tempat pembentukan Formasi Walanae. Sesar utama yang berarah utara - barat laut terjadi sejak Miosen Tengah, dan tumbuh sampai setelah Pliosen (Sukanto dan Supriatna, 1982).

## 2.1.2 Batubara

### 2.1.2.1 Komponen Organik Penyusun Batubara

Komponen organik (*organic matter*) dalam batubara adalah satu-satunya komponen batubara yang menghasilkan kalori pada proses pembakaran. Secara umum, komponen organik penyusun batubara yakni maseral (analog dengan mineral dalam batuan) atau bagian komponen organik terkecil dari batubara yang bisa teramati dengan mikroskop. Pembentukan maseral tergantung pada tipe dari komunitas tumbuhan, iklim dan kontrol ekologi serta kondisi lingkungan pengendapan (Stach, *et. al.*, 1982). Maseral batubara dapat diklasifikasikan menjadi tiga grup, yakni vitrinit (huminit), liptinit, dan inertinit, berdasarkan *the International Committee for Coal and Organic Petrology (1995)*, *the Australian Standard System of Nomenclature (AS, 1995)*, dan *the American Society for Testing*



and Materials (ASTM, 1996), dalam *American Association of Petroleum Geologist (AAPG, 1998)*.

Menurut Teichmuller, 1989, (dalam Anggayana dan Widayat, 2007), Pembentukan vitrinit memerlukan suatu proses yang relatif cepat dari akumulasi sisa tanaman dipermukaan gambut melalui zona oksidasi dimana bakteri anaerob mengubah sisa lignin dan selulosa ke dalam gel humit sebagian dengan sifat yang homogen. Hal ini membuat vitrinit, khususnya telovitrinite dapat mempertahankan beberapa struktur sel. Sub-grup maseral detrovitrinit (humodetrinit) merupakan komponen yang berbentuk pecahan-pecahan (detrital) dari maseral huminit (vitrinit). Maseral ini merupakan komponen yang berasal dari tumbuhan perdu dan kayu yang mudah terdekomposisi.

Perubahan kandungan karbon, zat terbang dan peringkat pada batubara berhubungan secara langsung dengan jumlah cahaya reflektan dari permukaan vitrinit. Pengaruhnya adalah makin tinggi kadar karbon, makin tinggi pula reflektan vitrinit. Oleh karena itu peringkat batubara dapat langsung ditetapkan dengan pengukuran reflektan vitrinit. Batubara yang mengandung lebih dari 80% vitrinit, peringkat batubara dapat juga ditetapkan berdasarkan kandungan zat terbang dan karbon (Bustin *et al.*, 1983).

Liptinit dalam batubara menghasilkan lebih banyak zat terbang apabila dipanaskan dibandingkan dengan grup lainnya. Disamping itu, liptinit menghasilkan bitumen yang tinggi terutama dalam batubara sub-bituminus dan bituminus (Bustin *et al.*, 1983; Diessel, 1986; Taylor, et al., 1998).

Grup maseral inertinit sangat sedikit berubah sifat fisika dan kimianya dibandingkan dengan vitrinit atau liptinit pada batubara peringkat rendah. Pada umumnya inertinit mempunyai kandungan oksigen tinggi dan hidrogen rendah, akan tetapi kandungan oksigen akan menurun cepat seiring dengan naiknya peringkat pada suatu batubara. Struktur inertinit (semifusinit dan fusinit) yang berasal dari vegetasi kayu, terbentuk dalam kondisi yang relatif kering menyebabkan jaringan teroksidasi. (Bustin *et al.*, 1983). Maseral inertinit merupakan komponen yang teroksidasi oleh karena berkurangnya kelembaban gambut. Kandungan inertinit yang relatif rendah dapat menunjukkan batubara



berasal dari lingkungan pengendapan yang basah dan tingkat oksidasi yang rendah (Stach et.al., 1982).

Komposisi maseral batubara di Indonesia menurut beberapa peneliti antara lain adalah; pada daerah Sangata (Formasi Balikpapan), vitrinit 91%, liptinit 6,0%, inertinit 3,0% (Daulay, 1994); Daerah Ombilin (Formasi Sawahlunto), Formasi Tanjung Enim (Sumatera Selatan), vitrinit 91,4%, liptinit 3,9%, inertinit 4,7% (Anggayana., 1996); Seam Manggus (A1 dan A2), Suban (B1 dan B2), Formasi Tanjung Enim, vitrinit 77,66%, liptinit 16,39%, inertinit 5,95% (Amijaya, 2005); Seam R, Berau (Formasi Latih), vitrinit 90,58%, liptinit 4,13%, inertinit 5,29% (Anggayana,K., Widayat,A.H., 2006); Embalut, Kalimantan Timur (Formasi Balikpapan, Formasi Pulau Balang), vitrinit 90,18%, liptinit 5,21%, inertinit 3,63% (Widodo, 2008).

Maseral batubara sebagai representasi komponen jenis tumbuhan asal pembentuk batubara sangat menentukan karakteristik batubara, terutama kualitas batubara. komposisi mikroskopi batubara khususnya komponen maseral batubara menunjukkan bahan dasar penyusun batubara. setiap grup maseral batubara mempunyai sifat dan komposisi kimia yang berbeda (Anggayana, dkk., 2011).

### 2.1.2.2 Fasies Pembentukan Gambut di Iklim Tropis

Indonesia merupakan negara yang terletak di garis khatulistiwa dan beriklim tropis. Iklim tropis ditandai dengan tedapatnya dua musim sepanjang tahun, yaitu musim hujan dan kemarau. Terdapatnya dua musim ini memberi kontribusi yang besar terhadap akumulasi pembentukan gambut, terutama fluktuasi perubahan muka air rawa gambut sebagai kontrol utama dalam akumulasi gambut (Dehmer, 1995). Fluktuasi muka air menyebabkan perubahan dari kondisi *oxic* ke *anoxic* (sebaliknya) sehingga membentuk keanekaragaman flora yang mempengaruhi komposisi maseral batubara (Anggayana, *et. al.*, 2010).

Umumnya gambut pada iklim tropis diinterpretasikan dengan melimpahnya kandungan vitrinit dalam batubara (Esterle and Ferm, 1994) Gambut pada iklim tropis dengan temperatur yang tinggi sepanjang tahun sangat berpotensi sebagai pemicu tingginya laju dekomposisi dan akumulasi biomassa dibanding pada gambut *boreal* pada temperatur dingin.



Anggayana, 1996, meneliti fasies batubara di Sumatra pada dua lokasi berbeda. Lokasi pertama pada Formasi Muara Enim di Tanjung Enim (Sumatera Selatan), terdiri dari *seam* Manggus (A2) dan *seam* Suban (B1). Lokasi kedua pada Formasi Sawah Lunto di Ombilin (Sumatera Barat). Berdasarkan komposisi maseral dilakukan perhitungan nilai TPI (*Tissue Preservation Index*) dan GI (*Gelification Index*) pada kedua lokasi tersebut, Dari perthitungan diperoleh hasil bahwa nilai TPI (*Tissue Preservation Index*)  $< 1$  dan GI (*Gelification Index*)  $> 7$ , artinya batubara dari kedua lokasi tersebut tingkat preservasinya rendah dan tingkat gelifikasinya tinggi. Hasil plotting pada nilai TPI (*Tissue Preservation Index*) dan GI (*Gelification Index*) pada diagram Diessel (1986) dan pada diagram Lambersen *et. al.* (1991) menunjukkan lingkungan pengendapan batubara terletak pada lingkungan *Marsh*. Dari hasil tersebut memberikan indikasi bahwa lingkungan *marsh* mempunyai pengaruh klastik yang terbatas. Berdasarkan plotting titik sampel pada diagram Calder *et. al.* (1991) untuk nilai GWI (*Groundwater Index*) dan VI (*Vegetation Index*) maka diperoleh nilai GWI  $< 0,2$  dan VI  $< 2$ , artinya batubara dari kedua lokasi tersebut index muka airnya rendah dan indeks vegetasinya juga rendah. Kondisi ini akan menghasilkan tipe gambut ombrotrofik dengan tumbuhan asalnya adalah herbaceous.

Amijaya (2005), meneliti fasies batubara pada *seam* Manggus (A1 dan A2) dan *seam* Suban (B1 dan B2) pada Formasi Muara Enim (Sumatra Selatan). Secara umum kedua *seam* tersebut nilai TPI (*Tissue Preservation Index*) rendah dan GI (*Gelification Index*) tinggi, dan terletak pada kondisi *limno-telmatic*. Sedangkan nilai GWI (*Groundwater Index*) dan VI (*Vegetation Index*) rendah, dan secara umum terletak di lingkungan *marsh* pada kondisi *limno-telmatic* (Diessel, 1986, yang telah dimodifikasi oleh Lamberson *et. al.*, 1991), dengan tipe gambutnya adalah *ombrotrophic* (Calder, *et. al.*, 1991) dengan jenis tumbuhan *herbaceous*.

Widodo, 2008, meneliti fasies batubara pada Formasi Balikpapan dan Formasi Palubalang di daerah Loa Janan, Tenggarong, Kalimantan Timur. Secara umum nilai TPI (*Tissue Preservation Index*) rendah (0,3-1,9) dan GI (*Gelification Index*) tinggi (1,6-20,6) terletak pada kondisi *limnic-fen-wet forest swamp* (Diessel, 1986). Sedangkan GWI (*Groundwater Index*) rendah dan VI (*Vegetation Index*)



rendah, dimana tipe gambutnya adalah ombrotrophic (Calder, *et. al.*, 1991) dengan jenis tumbuhan herbaceous.

Rahmad, 2012, meneliti fasies batubara Muara Wahau, Kalimantan Timur. Dari hasil penelitian didapatkan nilai TPI (*Tissue Preservation Index*) antara 0,18-1,33; nilai GI (*Gelification Index*) 3,99-15,17; nilai GWI (*Groundwater Index*) 0,05-4,16; dan nilai VI (*Vegetation Index*) 0,12-1,54. Hasil plotting titik sampel pada diagram TPI (*Tissue Preservation Index*) dan GI (*Gelification Index*) menurut Diessel (1986) dan Lambersen *et.al.* (1991), secara umum titik sampel batubara Muara Wahau terletak pada kondisi *limnic* pada lingkungan *back barrier-lower delta plain*. Sedangkan GWI (*Groundwater Index*) rendah dan VI (*Vegetation Index*) rendah, dimana tipe gambutnya adalah ombrotrophic (Calder, *et. al.*, 1991) dengan jenis tumbuhan herbaceous.

Dehmer (1993), Anggayana (1996), Amijaya (2006), Widodo (2008), dan Rahmad (2012), berpendapat bahwa nilai GI tinggi merupakan tipikal batubara dan gambut di Indonesia, baik yang berumur Tersier dan Kuarter, *Herbaceous* merupakan tumbuhan pembentuk batubara di Kalimantan dan Sumatera, nilai GWI rendah merupakan ciri khas untuk tipe gambut ombrotrofik dengan sumber nutrisi berasal dari air hujan. *Herbaceous* merupakan vegetasi yang kaya selulosa yang direpresentasikan sebagai bagian dari desmocolinit, inertodetrinit, dan liptodetrinit (Teichmuller, 1989; Mukhopadhyay, 1989; dalam Calder, *et.al.*, 1991).

Hasil analisis petrografi batubara berupa kandungan maceral direpresentasikan dalam persamaan scalar yang dapat digunakan sebagai indikator facies batubara. Indikator facies yang digunakan adalah berdasarkan indeks pengawetan struktur jaringan (*Tissue Preservation Index / TPI*) dan indeks gelifikasi (*Gelification Index/GI*); (Diessel, 1986). Model ini telah diaplikasikan di beberapa lapangan batubara di Indonesia dan dunia. Diessel menggunakan persamaan dari perbandingan beberapa maseral guna mendapatkan GI (*Gelification Index*) dan TPI (*Tissue Preservation Index*). Untuk mengetahui facies lingkungan pengendapan batubara, nilai GI dan TPI digambarkan pada diagram lingkungan pengendapan dari Diessel (1986), dengan persamaannya adalah sebagai berikut:



$$GI = \frac{\text{Vitrinite} + \text{Geloinertinite}}{\text{Teloinertinite} + \text{Detroinertinit}}$$

$$TPI = \frac{\text{Telo -vitrinite} + \text{Telo -inertinite}}{(\text{Detro} + \text{Gelovitrinite}) + (\text{Detro} + \text{Geloinertinite})}$$

Diessel (1986) menjelaskan bahwa, dengan sumber material yang sama, maka TPI diukur berdasarkan derajat humifikasi karena humifikasi akan berjalan dengan cepat pada kondisi iklim yang sejuk sehingga banyak jaringan sel yang dihasilkan di dalam sebuah lahan gambut dan salah satunya adalah teloinertinite (*fusinit atau semifusinite*) yang dapat bertahan dalam gambut yang kering, atau telovitrinite (telinite atau telocolinite) yang dapat bertahan dalam kondisi lembab atau basah. Proses humifikasi yang sudah lanjut akan menyebabkan terjadinya perusakan jaringan, dimana hal ini dinyatakan dalam tingkatan pengawetan jaringan struktur tumbuhan (*Tissue Preservation Index / TPI*) dengan menggunakan perhitungan secara kuantitatif. Sedangkan indeks gelifikasi (*Gelification index / GI*) akan berhubungan dengan kontinuitas kelembaban. Hasil penurunan secara lambat (*intermittent*) pada kondisi tepi cekungan gambut (*marginal peat-forming*), seperti pada kondisi kering dari lahan gambut akan menyebabkan oksidasi dan perubahan - perubahan lainnya dalam jaringan tumbuhan yang terhumifikasi baik dalam jumlah sedikit atau banyak, kondisi seperti ini dinyatakan dalam indeks gelifikasi (*Gelification Index / GI*).

Dalam penentuan fasies batubara, selain berdasarkan indikator TPI dan GI (Diessel, 1986), maka digunakan juga indikator *Groundwater Index (GWI)* dan *Vegetation Index (V)*. Calder dkk. (1991), menjelaskan bahwa *GWI* merupakan perbandingan antara jaringan material yang tergelifikasikan kuat (*gelocolinite, desmocolinite, dan corpocolinite*) dengan jaringan material yang tergelifikasikan lemah (*telinite dan telocolinite*) yang ditetapkan sebagai ukuran relatif gelifikasi. termasuk suplai air serta pH. *Gelocolinite* merupakan produk gelifikasi biokimia yang sebagian besar berupa lignin yang berasal dari humin, sedangkan *desmocolinite* berasal dari bagian terkecil dari tumbuhan perdu (*herbaceous*) yang kaya selulosa (Calder dkk., 1991). Selulosa menunjukkan peningkatan ke



arah atas dalam jumlah banyak di dalam sebuah lahan gambut hutan di iklim tropis di Sarawak ( *Esterle dkk . , 1994* ) dan meskipun selulosa di dalam lapisan gambut bagian atas akan tereduksi akibat degradasi ( *Calder dkk.,199*). Jaringan yang tergelifikasi cenderung relatif lebih kuat dalam *desmocolinite* dan *gelocolinite* , dan masing - masing bisa saling berlawanan disebabkan oleh sifat refleksinya , antara lain karena terdapat perbedaan dalam unsur asli tumbuhan. Perubahan ke tumbuhan perdu (*herbaceous*) seharusnya memunculkan modifikasi hidrologi pada permukaan gambut dan oleh karena itu posisi muka air tanah sangat berpengaruh , meskipun tidak secara langsung. Oleh karena adanya kecenderungan dalam penentuan tipe vegetasi adalah pengaruh derajat fungsi air tanah secara luas dan indeks air tanah (*groundwater*) dan vegetasi yang saling berhubungan . Intensitas kondisi *rheotrophic* dapat dievaluasi dengan menggunakan perbandingan dalam persamaan GWI :

$$GWI = \frac{\text{Gelocolinite} + \text{corpocolinite} + \text{mineral matter}}{\text{Telinit} + \text{Telocolinit} + \text{desmocolinit}}$$

Vegetasi dengan kandungan lignin tinggi dan berasal dari lingkungan forest direpresentasikan oleh hadimya asosiasi maseral : *telocolinite* , *fusinite* dan *semifusinite*, *suberinite*, dan *resinite*. Herba merupakan vegetasi yang kaya selulosa yang direpresentasikan sebagai bagian dari *desmocolinite* , *inertodetrinite* , dan *liptodetrinite* ( *Teichmueller , 1989 ; Mukhopadhyay,1989* dalam *Calder dkk.,1991*). Rasio Vegetasi Index (VI) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$VI = \frac{\text{Telinit} + \text{telocolinite} + \text{fusinite} + \text{semifusinite} + \text{suberinite} + \text{resinite}}{\text{desmocolinite} + \text{inertodetrinite} + \text{alginite} + \text{liptodetrinite} + \text{sporinite} + \text{cutinite}}$$

Menurut Diessel (1986), sebagian besar komponen maseral dalam TPI adalah unsur tumbuhan dan vegetasi yang berafinitas dengan akuatik. Diessel, (1982) mempertimbangkan bahwa *gelocolinite* menjadi kontributor yang tidak begitu penting untuk batubara Australia yang berumur Perm, meskipun kemudian Diessel (1986) memilih untuk memasukan *macrinite*, sebagai gel yang terfusinitkan ( *Teichmueller, 1982* dalam *Calder dkk .,1991*) di dalam persamaan TPI.



Secara rinci parameter nilai GWI dari Calder (1991) dapat dikorelasikan dengan fasies batubara dari Diessel (1986) dan Lamberson (1991) terhadap pembentukan tipe gambut seperti berikut:

- Nilai GWI  $< 0,5$  tingkat gelifikasi lemah ( $GI < 1$ ) muka air surut (pendangkalan) terletak di rawa (Diessel, 1986; Lamberson, 1991) membentuk gambut rawa *ombrotrophic* (Calder, 1991)
- Nilai GWI  $0,5 - 1$  tingkat gelifikasi menengah ( $GI +1$ ) muka air mulai pasang (air semakin dalam) terletak di fen (Diessel, 1986; Lamberson, 1991) membentuk gambut *fen mesotrophic*.
- Nilai GWI  $> 1$  tingkat gelifikasi kuat ( $GI > 1$ ) muka air semakin pasang (air lebih dalam) terletak di wet forest swamp (Diessel, 1986; Lamberson, 1991) membentuk gambut *rheotrophic* (Calder, 1991). Nilai  $GI > 1$  akan ditandai dengan adanya *limited influx clastic* di lingkungan *marsh*, dimana kondisinya terbatas terhadap input air dan klastik dari luar gambut.

Fluktuasi muka air pasang dan surut sangat tergantung dari frekuensi, variasi besaran dan jangka waktu terjadinya fluktuasi muka air (Calder et al. 1991). Fluktuasi muka air dapat mempengaruhi keanekaragaman paleoflora dan lingkungan diagenesa

### 2.1.2.3 Karakteristik Batubara di Indonesia

Batubara merupakan material yang cukup kompleks yang terdiri atas zat organik dan anorganik. Proporsi dan variasi antara komponen organik dan anorganik akan menentukan sifat fisik dan kimia batubara sehingga dapat mempengaruhi karakteristik penggunaannya (Anggayana, dkk., 2011). Karakteristik batubara perlu dilakukan menyeluruh guna optimalisasi dalam pemanfaatannya. Sebagai contoh, pemanfaatan batubara untuk kokas memiliki persyaratan antara lain, kadar air total 5%-10% ar, kadar abu yang relatif rendah (adb), *volatile matter* yang bervariasi (16%-31%) dmmf (low-high *volatile coal*), total sulfur yang rendah. Sedangkan pemanfaatan batubara untuk industri semen mensyaratkan komposisi batubara untuk kadar air total 4%-8%, kadar abu  $< 15\%$ , total sulfur  $< 2\%$  adb. Variasi karakteristik batubara dapat dimanfaatkan sebagai



pencampur terhadap jenis batubara yang mempunyai kualitas dan komposisi mikroskopi yang lain (Anggayana, dkk., 2011).

Ulum, dkk., 1997, melakukan karakterisasi batubara Bojongmanik berdasarkan analisis proksimat dan mendapatkan bahwa batubara Bojongmanik memiliki kandungan air 6,41%, Zat terbang 38,12%, Kadar abu 15,10%, kadar karbon tertambat 41,29%, dan Kandungan sulfur 2,17%. Hasil ini menunjukkan bahwa kandungan zat terbang dan kandungan sulfur batubara cukup tinggi, sehingga untuk pemanfaatannya perlu dilakukan desulfurisasi terlebih dahulu.

Anggayana, dkk., 2011, melakukan penelitian mengenai karakteristik batubara Muara Wahau dan Berau Kalimantan Timur, serta batubara Tanjung Enim Sumatra Selatan. Hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa batubara Muara Wahau memiliki kandungan zat terbang 41,76%-45,21%; karbon padat 36,15%-39,35%; kandungan abu 2,43%-6,63%; kandungan air 12,7%-16,55%, dan nilai kalori 5.148-5.549 kal/gr. Hasil analisis proksimat pada batubara Berau menunjukkan kandungan zat terbang 32,69%-39,69%; karbon padat 38,05%-44,70%; kandungan abu 1,073%-6,37%; kandungan air 17,17%-20,97%, dan nilai kalori 5.228-5.651 kal/gr. Sedangkan pada batubara Tanjung Enim menunjukkan kandungan zat terbang 33,65%-42,48%; karbon padat 38,24-41,49%; kandungan abu 3,88%-8,79%; kandungan air 5,29%-9,34%, dan nilai kalori 5.295-5.505 kal/gr.

#### 2.1.2.4. Kematangan Batubara

Anggayana dan Widayat, 2007, mengemukakan bahwa salah satu sifat fisik batubara yang dapat dipergunakan sebagai indikator peringkat batubara adalah nilai reflektansi maseral grup vitrinit. Reflektans vitrinit dapat dipergunakan sebagai indikator peringkat karena selalu ada korelasi yang kuat antara dua variabel tersebut (Hoffmann dan Jennifer, 1932, dalam Stach *et. al.* 1982.)

Diessel dan Gammidge, (1998). Menuliskan bahwa peningkatan intensitas sinar pantul pada maseral vitrinit berbanding lurus dengan pertambahan tingkat proses pembatubaraan pada lapisan batubara. Semakin besar nilai sinar pantul maseral, semakin tinggi peringkat batubara, dan demikian pun sebaliknya.

Menurut Taylor *et. al.* 1998, reflektansi maseral grup liptinit dan inertinit tidak dipergunakan sebagai standar penentuan peringkat dikarenakan butiran



maseral yang umumnya kecil dibandingkan vitrinit. Disamping itu, kedua grup maseral tersebut tidak menunjukkan relief yang baik dalam sayatan poles.

Penelitian yang dilakukan oleh Ulum, dkk (1997) pada daerah Bojongmanik Jawa Barat, menunjukkan bahwa nilai reflektans vitrinit batubara pada daerah Bojongmanik Jawa Barat adalah 0,38 sehingga menurut Klasifikasi Coock, AC, batubara Bojongmanik termasuk *sub bituminous*.

Penelitian yang dilakukan oleh Anggayana dan Widayat (2007), diketahui bahwa batubara *seam R* pada daerah Lati, Tarakan, Kalimantan Timur, memiliki nilai *reflektans vitrinit* rata-rata 0,50%, sehingga peringkat batubara berada pada *sub-bituminous*, menurut klasifikasi peringkat batubara Amerika Utara (Stach, *et. al.*, 1982)

Penelitian yang dilakukan oleh Heryanto (2009) pada batubara daerah Binuang Formasi Tanjung Kalimantan Selatan, ditemukan bahwa pada batubara Lajur Barat memiliki nilai reflektans vitrinit 0,43%-0,47%, di Lajur Tengah 0,45% dan Lajur Timur 0,45%-0,50%, dimana peringkat seluruh batubara tersebut adalah *sub-bituminous B*, berdasarkan klasifikasi ASTM, 1981.

Anggayana, dkk., (2011), melakukan penelitian batubara di daerah Muara Wahau dan Berau (Kalimantan Timur), serta daerah Tanjung Enim (Sumatra Selatan), dan menemukan bahwa nilai reflektans vitrinit batubara Muara Wahau adalah 0,43%-0,46% dengan peringkat *sub-bituminous*. Sedangkan nilai reflektans vitrinit pada batubara Berau adalah 0,44%-0,48%, dengan peringkat berada pada *sub-bituminous*. Nilai reflektans vitrinit pada batubara Tanjung Enim adalah 0,37%-3,87% dengan peringkat batubara *bituminous* dan sebagian kecil *semi-anthracite*.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Kristian dan Ditia (2011) pada batubara Formasi Muara Enim Sumatra Selatan adalah 0,4%-0,6% dengan peringkat pada *sub-bituminous*.

Rahmad, dkk. 2012, meneliti batubara Muara Wahau Kalimantan Timur dan menemukan bahwa nilai reflektans vitrinit 0,43%-0,46% dengan peringkat batubara *sub-bituminous*.

Pada umumnya peringkat batubara Indonesia adalah *sub-bituminous* (Ulum, dkk, 1997; Anggayana dan Widayat, 2007; Heryanto, 2009; Anggayana, dkk.,



2011; Kristian dan Ditia, 2011; dan Rahmad, dkk. 2012), dan sebagian kecil (pada batubara Tanjung Enim) peringkat batubara adalah semi antrasit.

#### 2.1.2.5. Geokimia Organik Batubara Tersier

Penelitian mengenai petrologi dan geokimia organik pernah dilakukan oleh Dehmer (1993, 1995) di daerah Palangkaraya Kalimantan Tengah dari *raised bog* di Sungai Sebayu. Hasil penelitian menunjukkan terjadinya perbedaan lingkungan pengendapan pada bagian bawah dan bagian atas, yaitu dari kondisi gambut mesotrofi menjadi oligotofi dalam lingkungan asam. Dekomposisi yang kuat pada gambut Palangkaraya menghasilkan humodetrinite sebesar 79,8%, hal ini konsisten terhadap derajat perusakan yang tinggi dari jaringan tumbuhan termasuk dengan kandungan inertinite yang relatif tinggi. Jaringan yang teroksidasi akan berdampak pada tingginya aktifitas bakteri mikrobial dan berlimpahnya jamur sclerotinite yang berasosiasi dengan humodetrinite, semifusinite, dan inertodetrinite. Menurut penelitian oleh Teichmueller dan Teichmueller, 1979, Pembentukan asam *humic* akan meningkat oleh suplai oksigen, hasil penurunan muka air, temperature gambut dan lingkungan yang *alkaline* dan menyebabkan asam *fulvic* lebih *oxygenated* dibanding asam *humic*, hal itu kemungkinan merupakan representasi produk degradasi oksidasi dari asam *humic* (Dehmer, 1995). *Gas chromatogram* dari fraksi alifatik yang diperoleh dari conto: MSF menunjukkan kisaran n-alkane dari n-C16 hingga n-C40. Berat molekul yang rendah dari n-alkane dari n-C16 hingga n-C22 bisa menunjukkan bukti dari aktifitas mikrobial/bakteri, hal ini juga terlihat dalam gambut *Mariscus* dan *A/nus*. Dominasi n-alkane termasuk n-C21, n-C29 dan n-C31, lebih menunjukkan pada tumbuhan tingkat tinggi sebagai input dari lilin kutikula dan alkohol (Dehmer,1995). Dehmer (1993) menjelaskan bahwa conto gambut dari Palangkaraya mengandung rantai panjang dari n-alkane dari n-C36 hingga n-C40. Didalam kisaran ini, faktanya adalah n-C38 merupakan n-alkane yang dominan dalam kisaran tersebut.

Volkman dkk., 1979 mengemukakan bahwa n-C31, n-C3s dan n-C39 merupakan *marker* biologi untuk *coccolith*, *Emiliana huxleyi* dan tipe *algae* (Cranwell, 1985). Bukti tersebut untuk mendukung bahwa asal-usul *algae* dapat mendeteksi *alginite* oleh analisis maseral serta terjadinya *algal cysts* di bagian dasar endapan gambut Morley (1981), kemungkinan lain adalah kontribusi lilin tumbuhan



secara spesifik. Gambut Palangkaraya mengandung berlimpah sejumlah *hopanoids*, hampir 20% dari fraksi alifatik mengandung *biomarker* terutama bakteri mikro-organisma (Dehmer, 1995). Senyawa-senyawa triterpenoid juga terekam di dalam fraksi alifatik dan dapat merefleksikan ditemukannya resinite dalam analisis petrografi. *Triterpenoid* tersebut adalah tipe oleanane tidak jenuh (*unsaturated*).

Van Dorselaer, dkk. (1975) telah mengusulkan bahwa pembentukan dari  $17\alpha,21\beta$ -(H)-*homohopane* adalah akibat reaksi oksidasi dan yang berikut adalah reaksi *decarboxylation* dari *bacteriohopan-tetrol* dengan isomer katalisasi pada posisi 17 dicapai oleh lingkungan asam di dalam *mire*. Dehmer, (1995) mengemukakan bahwa isomerisasi mungkin merupakan mediasi mikrobiologi. Hal ini berkorelasi dengan Quirk dkk. (1984) yang menemukan bahwa proporsi relatif dan konsentrasi dari  $17\alpha,21\beta$ -(H)-*homohopane* meningkat dengan peningkatan derajat dekomposisi.

Amijaya (2006) meneliti geokimia organik lapisan batubara Suban bagian bawah yang berumur Miosen Akhir - Pliosen Awai di Cekungan Sumatra Selatan, dijelaskan bahwa *pentacyclic* hidrokarbon aromatik berhubungan dengan  $\alpha$  dan  $\beta$  - *amyrin* dari beberapa sampel yang ada didominasi oleh *tricyclic* jenuh serta hidrokarbon aromatik dari gymnosperm, dimana strukturnya tidak bisa terdefinisi dan hanya terdeteksi dari latar belakang konsentrasi jejak *chromatogram*.

Widodo, dkk. (2009) meneliti geokimia batubara di daerah Embalut, Kalimantan Timur, berdasarkan jumlah total ion *chromatogram* (GC-MS) maka fraksi hidrokarbon aromatik batubara Formasi Balikpapan yang diwakili oleh 2 conto batubara KTD-43 dan KTD-35 dari total conto sebanyak 9 conto (2 conto Formasi Pulau Balang dan 7 conto Formasi Balikpapan), maka telah ditetapkan beberapa puncak (*peaks*) untuk mengidentifikasi biomarkernya. Dalam *chromatogram* tersebut terdapat tiga kelompok senyawa yang teridentifikasi yaitu kelompok pertama turunan *naphtalene* termasuk beberapa *sesquiterpenoid*, kelompok kedua turunan *phenanthrene* (*diterpenoid*) dan kelompok ketiga adalah senyawa *pentacyclic* dengan kerangka karbon *picene* (*triterpenoid*). Kelompok turunan *naphtalene* termasuk *sesquiterpenoid* senyawa-senyawa yang teridentifikasi adalah *2,2,7,8-tetramethyl-1,2,3,4-*



*tetrahydronaphthalene*; 1,1,5,6-tetramethyl-1,2,3,4 tetrahydronaphthalene; 5,6,7,8-tetrahydrocadalene; norcadalene; calamenene; dan cadalene. Kelompok turunan *phenanthrene* senyawa-senyawa yang teridentifikasi adalah *simonelite* dan *retene*. Kelompok turunan *picene* terdiri dari senyawa-senyawa lingkaran-A-monokromatik *triterpenoid* dan 2,2,4 $\alpha$ ,9-tetramethyl-1,2,3,4,4  $\alpha$ ,5,6,14 $\beta$  -*octahydropicene*; 1,2,4 $\alpha$ ,9-tetramethyl-1,2,3,4,4 $\alpha$ ,5,6,14 $\beta$ -*octahydropicene*; 1,2-dimethyl-1,2,3,4*tetrahydropicene*; 2,2-dimethyl-1,2,3,4-tetrahydropicene; 1,2,9-trimethyl-1,2,3,4- *tetrahydropicene*.

Penelitian terhadap susunan biomarker (penanda biologis) batubara dari Embalut menyingkap variasi vertikal fraksi-fraksi hidrokarbon aromatik. *Sesquiterpenoid* seperti *cadalene*, *tetrahydrocadalene* dan *calamenene* yang ditemukan bersama *cadalene* dan muncul dalam konsentrasi tinggi pada hampir semua conto. Senyawa-senyawa ini merupakan karakteristik *angiosperm* (kebanyakan berupa getah damar). Getah damar dapat dikaitkan dengan kontribusi *Dipterocarpaceae*, *family* tumbuhan yang khusus ditemukan pada rawa gambut dataran rendah tropis *ombrogenous* Indonesia.

*Diterpenoid* seperti *simonelite* dan *retene* ditemukan dalam proporsi yang rendah. Senyawa ini dianggap berasal dari *gymnosperm* (konifer) yang berkontribusi pada vegetasi pembentuk batubara yang dominan selama masa pertengahan dan awal Miosen Akhir. Turunan *picene* mendominasi senyawa-senyawa *pentacyclitc* fraksi hidrokarbon aromatik pada sampel batubara. *Biomarker* dalam fraksi aromatik mencakup *triterpenoid* poliaromatik diturunkan dari  $\alpha$ -*amyrin* dan  $\beta$ -*amyrin*. Menurut hasil *biomarker* dalam penelitian ini, *seam* batubara Embalut berasal dari hutan *angiosperm* dan bercampur dengan hutan *angiosperm-konifer* (dominan *angiosperm*).

Widodo (2008) menjelaskan bahwa berdasarkan fraksi saturasi dari conto-conto batubara Embalut Kalimantan Timur telah ditemukan seri rantai panjang n-alkane berkisar dari n-C<sub>23</sub> hingga n-C<sub>35</sub> (seri-1) yang didominasi oleh tingginya nomor carbon ganjil melebihi carbon genap. Seri-2 (kedua) dari n-alkane berkisar dari n-C<sub>36</sub> hingga n-C<sub>40</sub> dengan dominasi carbon genap melebihi carbon ganjil dengan puncak pada n-C<sub>38</sub> yang terdeteksi dalam 5 dari 9 conto batubara yang ada. Rantai panjang nomor genap n-alkane telah terdeteksi hanya dalam sampel itu



dengan reflektansi rendah berkisar 0,36-0,43 Rr(%). Rantai panjang nomor karbon genap *n*-alkanes ditemukan pada batubara *rank* rendah dengan *huminite reflectance* 0,36-0,43 Rr (%). Konsentrasi rantai panjang  $C_{38}$  *n*-alkanes sampel batubara bervariasi dari 0,27-9,25 g/gTOC. Rantai panjang *n*-alkanes tersebut tidak terdeteksi dalam sampel kayu/wood dan kulit *kayulbark* dari *angiosperm* yang berumur resen. Namun demikian dalam sampel kulit *kayulbark Ficus elastica* rantai panjang  $C_{34}, C_{36}, C_{38}$  dan  $C_{40}$  *aldehydes* terdeteksi dengan konsentrasi 4.50 g/gTOC dalam kasus  $C_{38}$  *n*-aldehydes. Terjadinya seri ke-2 rantai panjang *n*-alkanes dari *n*- $C_{36}$  sampai *n*- $C_{40}$  dengan dominasi karbon genap melebihi karbon ganjil dengan puncaknya pada *n*- $C_{38}$  dalam conto batubara dapat menjelaskan adanya kontribusi *angiosperm "Ficus elastica" (Moraceae)* terhadap vegetasi pembentuk batubara. Hal ini memerlukan sebuah transformasi dari rantai panjang *n*-aldehydes kepada *n*-alkanes selama atau setelah pengendapan gambut yang mana hanya kemungkinan terjadi di bawah kondisi *anoxic*.

#### 2.1.2.6. Palinologi

##### Analisis Polen

Interpretasi lingkungan pengendapan dapat dilakukan dengan menganalisis fasies lingkungan pengendapan yang dapat dilakukan berdasarkan kesamaan fisik, kesamaan kandungan biologi, dan kesamaan karakteristik kimia. Analisis palinologi merupakan salah satu cara dalam menganalisis fasies lingkungan pengendapan berdasarkan kesamaan kandungan biologi pada batuan. Analisis palinologi meliputi penentuan genus dan spesies spora dan polen yang terdapat dalam conto batuan sedimen untuk penentuan umur berdasarkan biostratigrafi. Penentuan lingkungan pengendapan berdasarkan analisis palinologi dilakukan dengan mengidentifikasi dominasi komposisi palynomorph (palinofasies) dan kumpulan spesies penciri lingkungan tertentu (Morley, 1990; Traverse, 2007; Bercovici dan Vellecoop, 2017).

Dengan melakukan pengelompokan spora dan polen yang terkandung dalam batuan, dapat diketahui zona vegetasi. Zona vegetasi yang digunakan yaitu berdasarkan tipe hutan hujan tropis. Zona vegetasi dibagi berdasarkan interval elevasi, yaitu; Lowland Forest (LF) pada ketinggian 0 – kurang dari 750 m dpl,



Lower Montane Forest (LMF) pada ketinggian 750 – 1500 m dpl, dan Upper Montane Forest (UM) pada ketinggian lebih dari 1500 m dpl. Dalam penelitian ini data spora tidak masuk dalam perhitungan presentase zona vegetasi karena spora dapat muncul baik di lowland forest maupun montane forest. Interpretasi iklim dilakukan dengan mengidentifikasi polen dan spora yang merupakan spesies indikator yang dibatasi oleh kondisi iklim tertentu. Interpretasi iklim didasarkan pada kurva perbandingan iklim basah dan iklim kering untuk menggambarkan fluktuasi kelembaban dan kurva fluktuasi beberapa takson yang mencerminkan iklim tertentu. Selama kondisi iklim kering, polen hutan savana dan pegunungan mendominasi (Adojoh dkk, 2015). Fluktuasi jumlah polen Gramineae dapat dijadikan dasar interpretasi kelembaban. Podocarpus dari suku Podocarpaceae, Juniperus dari suku Cupressaceae, dan Taxodiaceae merupakan polen dari tumbuhan hutan konifer yang mendominasi di lingkungan dengan elevasi tinggi/pegunungan dan merupakan karakteristik vegetasi subtropis. Polypodiaceae merupakan tumbuhan jenis Pteridophyta yang sebagian besar hidup di lingkungan tropis dengan kondisi iklim sedang yaitu relatif hangat dan lembab. Sebagai tambahan, zonasi polen yang diusulkan oleh Lelono (2007) digunakan untuk membagi zonasi polen dan interpretasi umur daerah penelitian.

Determinasi polen dan spora yang terdapat di preparat dilakukan dengan menggunakan mikroskop transmisi binokular dengan perbesaran 400x hingga 1000x. Perbesaran 1.000x sangat berguna untuk mendeskripsi polen dan spora, yaitu dalam mengenali struktur, ornamentasi, jumlah dan posisi apertur. Untuk menentukan nama serta jenis polen dan spora, dilakukan dengan cara mengidentifikasi ciri khas dari setiap butir polen dan spora, seperti eksin, apertur, ornamentasi, ukuran serta bentuk butir. Pengambilan data polen dan spora dilakukan dengan metode semi kuantitatif, yaitu semua polen pada slide preparat dihitung untuk mendapatkan tingkat kelimpahan setiap sampelnya. Penelitian palinologi di kawasan Asia dilakukan oleh Morley (1990), di Indonesia pertama kali dilakukan oleh Polak (1933) di daerah Rawalakbok dan Sumatra.

Penerapan data palinologi telah dijadikan sebagai standar nilai dalam menginterpretasikan masalah yang terkait dengan migrasi, evolusi flora seperti yang berhubungan dengan stratigrafi, paleoekologi, arkeologi (Morley, 1990).



Eksplorasi flora didunia telah dilakukan di Amerika (Clokey, 1951), di Asia (Backer & Bakhuizen van der Brink, 1965; Cronquist , 1972; Heyne, 1987) Paling banyak didasarkan atas tumbuhan hidup pada waktu itu, sedangkan eksplorasi flora didasarkan atas fosil lebih sedikit diantaranya oleh Erdtman (1952); Flenley (1979); Faegri & Iversen (1989); Morley (1990); Semah (1990); Stuijts (1993) dan Rahardjo (1993). Sejarah flora dan vegetasi di suatu daerah dapat diungkap melalui pendekatan palinologi. Analisis polen dan spora yang terendapkan dalam suatu sedimen dapat mengungkapkan latar belakang perubahan flora dan vegetasi pada periode tertentu. Perubahan tersebut sebagian hasil dari perubahan iklim baik iklim lokal, regional maupun global (Faegri & Iversen, 1989; Moore & Webb, 1990).

Palinologi adalah material organik yang sangat resisten, berdingding *sporopollenin*, *chitin*, atau *seudochitin* yang berukuran 5 – 500  $\mu\text{m}$  (Traverse, 2007; Proborukmi, 2021). Secara umum palinomorf terdiri dari tiga sub kelompok besar yaitu *sporomorf* (polen, spora dan spora jamur); *zoomorf* (*foraminifera test lining*, *chitinozoa* dan *scelodont*) serta *fitoplankton* (*dynocyst*, *meroplankton*, *Acritarch*, *Rhodofita* dan *Cyanobakteria*) (Tyson, 1955; Nugroho, 2014). Aplikasi palinologi dalam bidang geologi antara lain digunakan untuk penentuan umur relatif (pemunculan awal takson, pemunculan akhir takson, takson diagnostik, takson index) (Rahardjo, dkk. 1994), penentuan lingkungan pengendapan, analisis kuantitatif takson penciri lingkungan (rawa air tawar, rawa gambut, *mangrove* dsb) (Haseldonckx, 1974), penentuan tingkat kematangan termal organik berdasarkan indeks standar warna polen dan spora (Traverse, 1988), serta palinostratigrafi, paleoekologi dan paleoklimatologi (Yulianto, dkk.2019). Analisis polen dan spora yang terendapkan pada suatu sedimen juga dapat mengungkapkan latar belakang perubahan vegetasi dan bentang alam suatu daerah pada satu periode waktu tertentu (Morley, 1990).

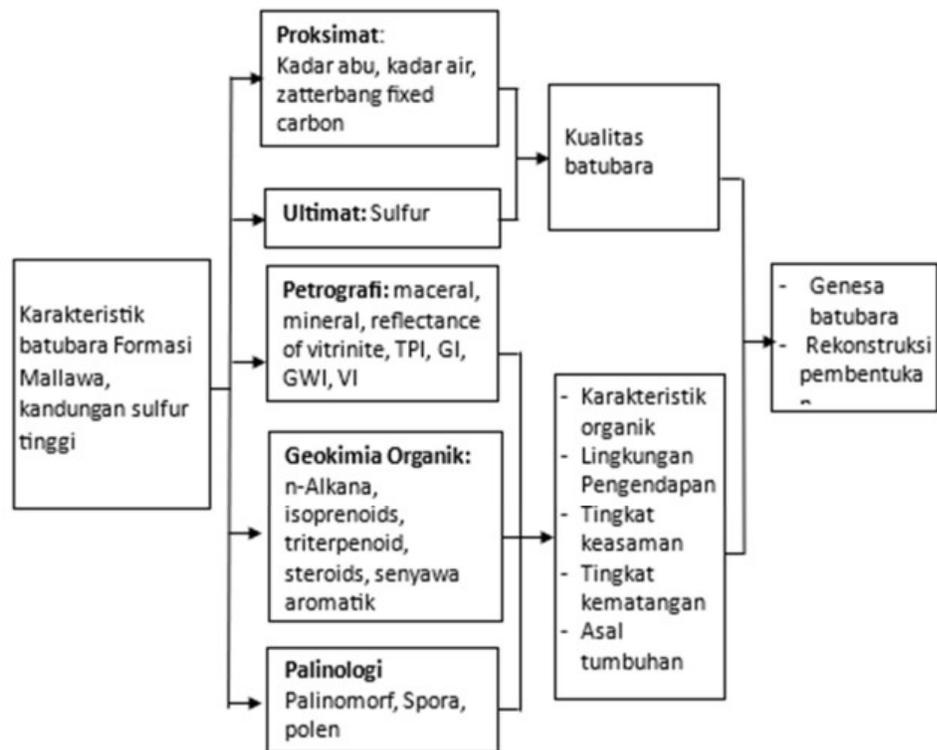
Kerangka konseptual merupakan kerangka pikir dalam pemecahan masalah penelitian. Kerangka pikir berdasarkan landasan teori dan hasil dari penelitian sebelumnya dapat dilihat pada **Gambar 1**.

## 2.2. Hipotesis Penelitian

Hipotesis yang dapat disusun berdasarkan kerangka konseptual penelitian adalah sebagai berikut:



1. Tumbuhan asal pembentuk batubara (*precursor* dan *species*) ditentukan dari hasil analisis *biomarker* dan *polen* pada batubara Formasi Mallawa.
2. Fasies batubara Formasi Mallawa dikontrol oleh maseral, mineral
3. Lingkungan pengendapan batubara Formasi Mallawa terendapkan pada kondisi *limnic marsh*, ditentukan berdasarkan komposisi maseral, senyawa organik, mineral, dan jenis tumbuhan.



**Gambar 1.** Kerangka konseptual penelitian