

BAB III DASAR TEORI

III.1 Proses Pembentukan Batubara

Batubara diketahui sebagai sedimen karbon. Batubara tersusun secara dominan oleh bahan organik yang mudah terbakar, tetapi mengandung jumlah abu atau pengotor yang tersusun dari material silisiklastik (Boggs, 2006). Menurut Schopf, (1956) dalam Boggs, (2006) batubara adalah batuan yang mudah terbakar, mengandung material karbon lebih dari 50% oleh berat dan lebih dari 70% oleh volume, terbentuk akibat kompaksi dari berbagai macam jenis tumbuhan dalam endapan gambut. Perbedaan jenis tumbuhan, tingkat metamorfisme, dan jumlah pengotor merupakan karakteristik dari batubara. Thomas, (2013) mendefinisikan batubara sebagai batuan sedimen, tersusun oleh sisa jaringan tumbuhan yang terlitifikasi, dan yang paling penting batubara merupakan material yang dapat dibakar. Komposisi dan karakteristik batubara ditentukan oleh (1) asal dari akumulasi material organik dan non organik penyusun batubara (2) tingkat diagenesis yang membentuk batubara.

Proses pembentukan batubara secara umum dapat dibagi menjadi dua tahapan, yaitu tahap penggabutan (*peatification*) dan tahap pembatubaraan (*coalification*).

1. Tahap penggabutan/biokimia (*peatification*)

Tahap penggabutan/biokimia adalah tahap ketika material sisa-sisa tumbuhan terakumulasi pada suatu rawa dan mengalami perubahan menjadi gambut (*peat*). Penggabutan meliputi proses biodegradasi oleh mikroba dan perubahan kimia (biokimia).

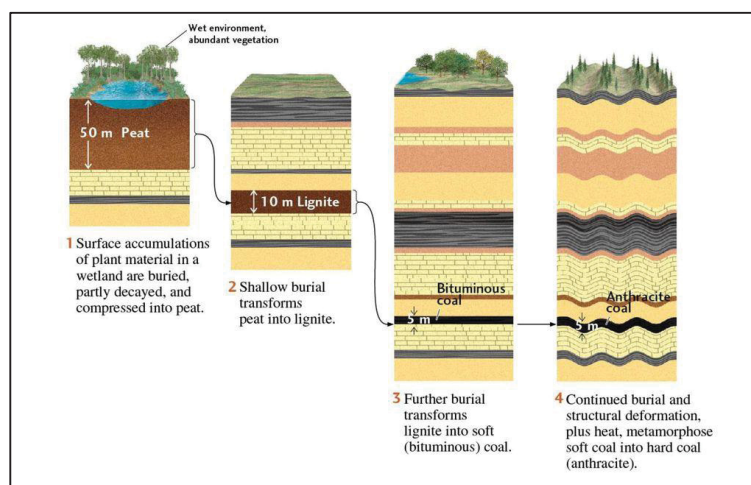
Proses biodegradasi oleh mikroba ini mengubah unsur tumbuhan yang terdiri dari C, H, O, dan N menjadi sisa-sisa tumbuhan, air, dan gas (CO₂, NH₃, CH₄, dan H₂O). Proses ini dapat dibagi menjadi dua, yaitu humifikasi dan gelifikasi. Humifikasi adalah proses perubahan material organik menjadi humus atau disebut membusuk. Akumulasi sisa-sisa tumbuhan yang tidak mengalami pembusukan disebut sebagai gambut (*peat*) yang akan mengalami proses gelifikasi pada kondisi terendam air dan miskin oksigen (*anaerob*).

2. Tahap pembatubaraan/geokimia (*coalification*)

Tahap pembatubaraan/geokimia berlangsung setelah tahap penggambutan. Tahap ini meliputi perubahan kimia dan fisik dari material organik dan non organik penyusun batubara dan dapat diklasifikasikan dan dideskripsi oleh peringkat batubara/*rank*. Peringkat batubara diurutkan dari nilai kalori terendah hingga tertinggi, yaitu lignit, subbituminus, bituminus, dan antrasit.

Faktor yang mengontrol tahap pembatubaraan adalah temperatur, waktu, dan tekanan. Faktor suhu/temperatur merupakan faktor terpenting pada tahap ini. Peningkatan temperatur dan tekanan dalam kurun waktu geologi yang disebabkan oleh pembebanan dan gradien geotermal pada tahap pembatubaraan mengakibatkan berkurangnya porositas, zat terbang, dan *moisture*, serta meningkatnya persentase kandungan karbon (C). Peristiwa peningkatan temperatur dan tekanan dalam kurun waktu geologi ini juga bersamaan dengan naiknya peringkat/*rank* batubara.

Proses pembatubaraan/*coalification* tidak dapat berlangsung jika gambut tidak terbentuk pada tahap penggambutan/*peatification*. Penggambutan/*peatification* ini dipengaruhi oleh dua kondisi, yaitu (a) kondisi iklim yang sesuai untuk perkembangan tumbuhan dan (b) lingkungan yang baik untuk tumbuhan terakumulasi dan terpreservasi. Dapat disimpulkan bahwa kondisi yang dibutuhkan untuk gambut terakumulasi adalah kondisi dimana antara laju akumulasi tumbuhan dan biodegradasi berlangsung seimbang.



Gambar III.1 Proses terbentuknya batubara (Grotzinger dan Jordan, 2014).

Teori pembentukan batubara menurut Sukandarrumudi, (1995) terbagi menjadi dua teori, yaitu:

1. Teori *insitu*

Teori ini menyatakan bahwa bahan-bahan organik pembentuk batubara, terbentuknya di tempat dimana tumbuh-tumbuhan asal itu berada. Pada saat tumbuhan tersebut mati sebelum mengalami proses transportasi segera tertutup oleh lapisan sedimen dan mengalami proses pembatubaraan (*coalification*). Jenis batubara yang terbentuk dengan cara ini mempunyai penyebaran luas dan merata, kualitasnya relatif baik karena kadar abunya relatif kecil.

2. Teori *drift*

Teori ini menyatakan bahwa bahan-bahan organik pembentuk batubara terbentuknya di tempat yang berbeda dengan dengan tumbuh-tumbuhan asal itu berada, dengan demikian tumbuhan yang telah mati diangkut oleh media air dan terakumulasi di suatu tempat, tertutup oleh batuan sedimen dan mengalami proses pembatubaraan (*coalification*). Batubara ini mempunyai penyebaran tidak meluas, tetapi dijumpai di beberapa tempat, serta kualitas yang kurang baik.

III.2 Karakteristik Batubara

Karakteristik batubara sangat berhubungan dengan tiga parameter, yaitu peringkat batubara (*rank*), tipe batubara (*type*), dan mutu batubara (*grade*). Setiap parameter menentukan aspek dari proses terbentuknya batubara (Ruiz dan Crelling, 2008).

1. Peringkat batubara (*rank*). Peringkat batubara mencerminkan tingkat pembatubaraan (*coalification*) pada akumulasi tumbuhan atau gambut sebagai hasil dari peristiwa pembebanan. Hal ini tergantung kepada faktor temperatur, waktu, dan tekanan yang mencerminkan kedalaman penimbunan dan gradien geotermal. Aliran panas dari intrusi terdekat juga berperan pada penentuan peringkat batubara (*rank*).
2. Tipe batubara (*type*). Tipe batubara mencerminkan jenis tumbuhan yang terakumulasi pada gambut (*peat*), termasuk jaringan-jaringan tumbuhan (kayu,

daun, alga, dll) dan juga tingkat degradasi jaringan tumbuhan sebelum pembatubaraan (*coalification*). Setiap jaringan tumbuhan yang terdapat pada batubara, termasuk fragmen dan material lainnya dikenal sebagai maseral; bentuk maseral ini menjadi hal mendasar pada petrologi batubara.

3. Mutu batubara (*grade*). Mutu batubara mencerminkan akumulasi tumbuhan pada gambut jauh dari kontaminasi non organik material (*mineral matter*), termasuk pada periode penggambutan (*peatification*) dan pada saat pembatubaraan (*coalification*), Peningkatan kadar abu berbanding terbalik dengan mutu batubara. Semakin rendah kadar abu, maka akan semakin baik mutunya dan semakin tinggi kadar abu, maka akan semakin kurang baik mutunya.

III.2.1 Peringkat Batubara

Batubara terbentuk dari akumulasi tumbuhan pada saat penggambutan, proses pembatubaraan mengubah gambut (*peat*) menjadi batubara lignit, subbituminus, bituminus, semi-antrasit, antrasit, hingga meta-antrasit. Tingkat transformasi pada pembatubaraan ini dikenal sebagai peringkat batubara/*coal rank* (Thomas, 2013).

Peringkat batubara berdasarkan tahapan pembatubaraan secara umum dapat dibagi menjadi empat peringkat, yaitu:

1. *Lignite*, merupakan batubara dengan peringkat paling rendah dengan persentase karbon paling rendah dan tekstur cenderung lunak.
2. *Subbituminous*, merupakan peringkat batubara setelah *lignite*, berwarna hitam, tetapi belum menunjukkan kilap. *Lignite* dan *subbituminous* sering disebut sebagai *brown coal*. Batubara ini memiliki nilai kalori yang lebih tinggi dibandingkan *lignite*.
3. *Bituminous*, atau disebut sebagai *black coal* merupakan batubara tingkat menengah berwarna hitam dan sudah memiliki kilap.

4. *Anthracite*, merupakan batubara pada peringkat paling tinggi, berwarna hitam dan keras. Batubara ini memiliki persentase karbon dan nilai kalori paling tinggi.

Klasifikasi yang digunakan untuk menentukan peringkat batubara dalam penelitian ini adalah klasifikasi peringkat batubara menurut ASTM (American Society for Testing and Materials) D 388-99 dengan menggunakan parameter kualitas nilai kalori, *fixed carbon*, dan *volatile matter* (Tabel III.1).

Tabel III.1 Klasifikasi peringkat batubara ASTM D388-99 (ASTM, 2000).

Class/Group	Fixed Carbon Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Volatile Matter Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Gross Calorific Value Limits (Moist, ^B Mineral-Matter-Free Basis)				Agglomerating Character
	Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Btu/lb		Mj/kg ^C		
					Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
Anthracitic:									
Meta-anthracite	98	...	...	2	...	...	...	...	} nonagglomerating
Anthracite	92	98	2	8	...	...	...	...	
Semianthracite ^D	86	92	8	14	...	...	...	...	
Bituminous:									
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	...	14 000 ^F	...	32.6	...	
High volatile B bituminous coal	...	...	...	...	13 000 ^F	14 000	30.2	32.6	
High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	11 500	13 000	26.7	30.2	} agglomerating
					10 500	11 500	24.4	26.7	
Subbituminous:									
Subbituminous A coal	...	...	...	...	10 500	11 500	24.4	26.7	} nonagglomerating
Subbituminous B coal	...	...	...	...	9 500	10 500	22.1	24.4	
Subbituminous C coal	...	...	...	...	8 300	9 500	19.3	22.1	
Lignitic:									
Lignite A	...	...	...	...	6 300 ^G	8 300	14.7	19.3	} nonagglomerating
Lignite B	...	...	...	...	...	6 300	...	14.7	

III.2.2 Tipe Batubara

Batubara tersusun oleh material-material organik. Tiap material organik memiliki karakteristik fisika dan kimiawi sendiri. Hal ini tergantung kepada jumlah dan karakteristik petrologi dari setiap material organik tersebut (Thomas, 2013).

Secara umum batubara dapat dibedakan berdasarkan deskripsi fisik secara makroskopis dan mikroskopis. Secara makroskopis batubara dideskripsi berdasarkan kehadiran *lithotype* dan struktur *banded* yang membagi menjadi dua, yaitu *humic* dan *sapropelic*. Batubara *humic* tersusun oleh campuran dari tumbuhan tingkat tinggi dan menunjukkan tekstur *banded*. Batubara *sapropelic* tersusun oleh campuran tumbuhan tingkat rendah, seperti alga, jamur, dan spora, batubara *sapropelic* tidak menunjukkan tekstur *banded* dan cenderung *homogenous*. Batubara *humic* dapat dibagi menjadi empat berdasarkan *lithotype*, yaitu *vitrain*, *clarain*,

durain, dan *fusain*. Sementara batubara *sapropelic* dapat dibagi menjadi dua, yaitu *cannel* dan *boghead* (Tabel III.2).

Tabel III.2 *Lithotype* batubara *humic* dan *sapropelic* (McCabe, 1984 dalam Thomas, 2013).

Tipe Batubara	Deskripsi	Komposisi
<i>Vitrain</i>	Hitam, kilap terang, pecahan kubik untuk lapisan tipis dan konkoidal untuk lapisan tebal	Maseral vitrinit dengan 20% exinit/liptinit
<i>Clarain</i>	Berlapis dengan baik dengan isi lapisan vitrain, <i>durain</i>	Variatif
<i>Durain</i>	Hitam atau abu-abu, kilap dull, permukaan kasar	Inertine dan Exinit
<i>Fusain</i>	Hitam, kilap <i>silky</i> , lunak dan mudah hancur	Fusinit
<i>Cannel coal</i>	Hitam, kilap <i>dull</i> sampai <i>greasy</i> , pecahan konkoidal	Maseral halus didominasi oleh sporinit
<i>Boghead coal</i>	Hitam atau abu-abu, kilap <i>dull</i> sampai <i>greasy</i> , homogen, hancuran konkodal.	Didominasi oleh alginite

Secara mikroskopis batubara dideskripsi berdasarkan kehadiran tipe maseral. Menurut Ruiz dan Crelling, (2008) maseral adalah berbagai macam jaringan tumbuhan atau zat asal tumbuhan yang hadir pada saat terbentuknya gambut. Kehadiran maseral dapat mencirikan kondisi lingkungan pengendapan atau tipe rawa/*mire* pada saat penggambutan (*peatification*). Maseral pada batubara secara umum dapat dikelompokkan menjadi *huminite/vitrinite*, *inertinite*, dan *liptinite* (Diesel, 1992).

1. Kelompok maseral *huminite/vitrinite* tersusun atas kayu, kulit kayu, akar, daun, dan jaringan sel tumbuhan lain yang mengalami humifikasi dengan intensitas tertentu. Penggunaan istilah *huminite* dan *vitrinite* bergantung pada jenis batubara yang mengandungnya. Istilah *huminite* digunakan untuk batubara peringkat rendah (*brown coal*), sedangkan istilah *vitrinite* digunakan pada batubara peringkat tinggi (*black coal*). Kelompok maseral *huminite/vitrinite* dapat dikelompokkan lagi menjadi tiga, yaitu *telovitrinite*, *detrovitrinite*, dan *gelovitrinite* (Diessel, 1992).
2. Kelompok maseral *inertinite* memiliki jenis jaringan tumbuhan yang relatif sama dengan *huminite/vitrinite*. Jaringan tumbuhan sebagai penyusun batubara sebelum mencapai pengendapan di bawah permukaan air merupakan subjek pengeringan dan oksidasi yang menyebabkan pembakaran. Sisa jaringan tumbuhan yang telah mengalami oksidasi ini dikenal sebagai maseral *inertinite*. Maseral *inertinite* dapat dikelompokkan lagi menjadi tiga, yaitu *telo-inertinite*, *detro-inertinite*, dan *gelo-inertinite* (Diesel, 1992).

3. Kelompok maseral *liptinite* berasal dari jenis atau jaringan tumbuhan tertentu, seperti spora, polen, kutikula, dan resin. Tumbuhan ini memiliki kandungan hidrogen (H) lebih tinggi dibandingkan jenis maseral lain.

Tabel III.3 Klasifikasi maseral dan kelompok maseral (Diessel, 1992).

Maceral groups	Maceral subgroups	Macerals
Vitrinite	Telovitrinite Detrovitrinite Gelovitrinite	Telinite, telocollinite Desmocollinite, vitrodetrinite Gelocollinite, corpocollinite
Inertinite	Telo-inertinite Detro-inertinite Gelo-inertinite	Fusinite, semifusinite and sclerotinite Inertodetrinite, micrinite Macrinite
Liptinite	Primary liptinites Secondary liptinites	Resinite, cutinite, sporinite, alginite, suberinite and liptodetrinite Exsudatinite, fluorinite

III.2.3 Kualitas Batubara

Kualitas batubara ditentukan dari sifat-sifat fisik dan kimia dari batubara yang memiliki pengaruh terhadap potensi penggunaannya. Mengetahui sifat-sifat tersebut merupakan hal yang penting dalam evaluasi suatu lapisan batubara untuk kebutuhan komersil.

Secara umum analisis kualitas batubara terdiri atas tiga macam, analisis proksimat, analisis ultimat, dan analisis *combustion properties*. Analisis proksimat ditujukan untuk mengetahui jumlah zat terbang (*volatile matter*), lengas (*moisture*), karbon tertambat (*fixed carbon*), dan abu (*ash*). Analisis ultimat ditujukan untuk mengetahui jumlah unsur kimia dominan penyusun batubara, yang terdiri dari karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Analisis *combustion properties* ditujukan untuk mengetahui nilai kalori, *ash fusion temperature*, dan *hardgrove grindability index*.

Dalam penelitian ini penulis menggunakan hasil analisis proksimat, nilai total sulfur pada analisis ultimat, dan nilai kalori pada analisis *combustion properties* yang merupakan data sekunder dari PT Ganda Alam Makmur untuk menentukan kualitas batubara.

III.2.3.1 Analisis Proksimat

1. *Moisture*, adalah kandungan air yang terdapat pada batubara. Kadar *moisture* yang tinggi pada batubara tidak diinginkan dikarenakan secara kimiawi akan meresap panas pada pembakaran, dan mempersulit dalam transportasi (Thomas, 2013). *Moisture* dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu:
 - a. *Surface moisture*, yaitu air yang melekat pada permukaan batubara yang berasal dari air hujan ataupun air lainnya yang berasal dari luar batubara. Kadar air ini mudah diuapkan pada kondisi laboratorium.
 - b. *Inherent moisture*, yaitu air yang melekat pada rongga yang berukuran mikroskopik di batubara. Kandungan air ini dapat dihilangkan dengan suhu pemanasan 105° - 110°C
 - c. *Total moisture*, merupakan kadar air total dari *surface moisture* ditambah dengan *inherent moisture*.
2. *Ash*, adalah residu material non organik yang tersisa setelah proses pembakaran. *Ash*/abu secara umum tersusun atas *mineral matter* (mineral lempung, mineral alkali, dll), tetapi tidak sama dengan kandungan *mineral matter* pada batubara, dikarenakan beberapa mineral pada sampel batubara berubah menjadi komponen mineral lain selama pembakaran. Kandungan abu yang tinggi secara efektif akan mengurangi nilai kalori (Thomas, 2013). Tingkat kandungan *ash* berpengaruh terhadap mutu dari batubara, peningkatan kadar abu berbanding terbalik dengan mutu batubara dan berlaku sebaliknya (Tabel III.4).

Tabel III.4 Mutu barubara berdasarkan kadar abu (Ruiz dan Crelling, 2008).

Kadar Abu (%, adb)	Keterangan	Mutu
< 5	Abu sangat rendah	Sangat baik
5 – 10	Abu rendah	Baik
10 – 20	Abu sedang	Cukup baik
20 – 30	Abu cukup tinggi	Kurang
30 – 50	Abu tinggi	Sangat kurang

3. *Volatile matter*, adalah komponen batubara, selain dari *moisture*, yang diuapkan pada temperatur tinggi pada kondisi kedap udara. Material ini berasal dari material organik dan *mineral matter* dalam bentuk non organik (Thomas, 2013).
4. *Fixed carbon*, adalah komponen karbon pada batubara yang ditemukan dalam bentuk residu setelah *volatile matter* dihilangkan. *Fixed Carbon* tidak ditentukan secara langsung, tetapi hasil dari selisih 100% dari persentase komponen yang lain, yaitu *moisture*, *ash*, dan *volatile matter* (Thomas, 2013).

III.2.3.2 Analisis Ultimat

Analisis ultimat dilakukan untuk menentukan kandungan unsur kimia yang terdapat pada batubara. Dalam penelitian ini, variabel yang akan ditinjau hanya *total sulphur* pada batubara di daerah penelitian. Komponen sulfur dari batubara menyebabkan masalah dalam pemanfaatannya dan juga menghasilkan polusi. Sulfur menyebabkan korosi dan *fouling* dari *boiler* dan polusi pada atmosfer dalam bentuk SO_2 dan SO_3 .

Sulfur pada batubara dapat hadir dalam tiga bentuk, yaitu pirit sulfur, sulfur organik, dan sulfat. Pirit sulfur dan organik sulfur secara umum hadir mendominasi sulfur pada batubara, sedangkan sulfat hadir dalam jumlah kecil (Chou, 2012).

1. Sulfur pirit, hadir dalam bentuk mineral sulfida pada batubara, umumnya dalam bentuk *iron pyrite* (FeS_2).
2. Sulfur organik, hadir dalam bentuk komponen organik pada batubara.
3. Sulfat, umumnya hadir dalam bentuk oksida besi atau kalsium sulfat, merupakan produk oksidasi dari mineral sulfida pada batubara.

Chou, (2012) menjelaskan kadar sulfur pada lapisan batubara dipengaruhi oleh lingkungan pengendapan batubara. Lapisan batubara dengan nilai sulfur yang rendah ($<1\%$), sulfur yang terdapat dalam batubara umumnya berasal dari material tumbuhan itu sendiri. Namun, untuk lapisan batubara dengan nilai sulfur yang sedang ($1 - 3\%$) hingga tinggi ($>3\%$), sulfur yang terdapat dalam lapisan batubara dapat berasal dari kandungan sulfat dalam air laut yang menggenangi gambut pada

saat proses pembentukan batubara. Klasifikasi nilai *total sulphur* pada penelitian ini mengacu kepada Chou, (2012).

Tabel III.5 Klasifikasi nilai sulfur (Chou, 2012).

Sulfur (%)	Tingkat
< 1%	Rendah
1 – 3%	Sedang
> 3%	Tinggi

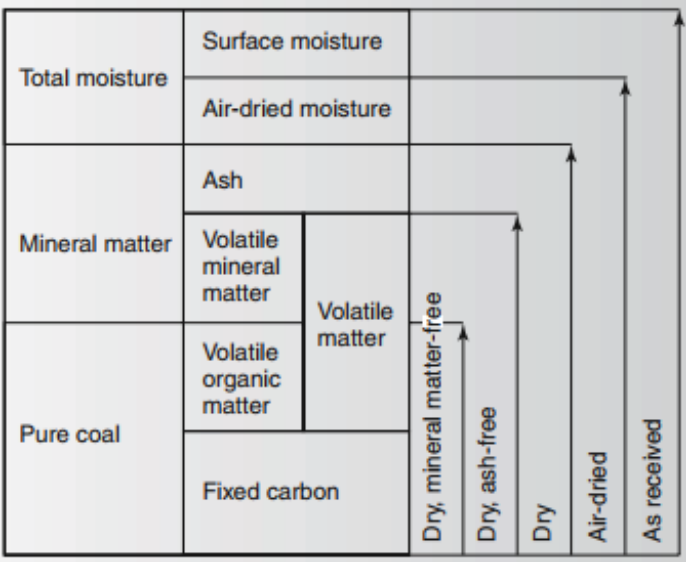
III.2.3.3 Uji Nilai Kalori

Nilai kalori dari batubara adalah jumlah panas yang dihasilkan per satuan massa batubara ketika dibakar. Nilai kalori (*calorific value*) diekspresikan dalam dua bentuk, yaitu (1) *gross calorific*, merupakan jumlah panas yang dihasilkan pada kondisi tertentu, sehingga kandungan air pada batubara tetap dalam bentuk *liquid*. (2) *net calorific*, merupakan jumlah panas yang dihasilkan pada suhu relatif lebih rendah, pada kondisi ini kandungan air pada batubara masih dalam kondisi asal. Kandungan air pada batubara akan mengurangi nilai kalori dikarenakan air akan meresap panas (Thomas, 2013).

III.2.3.4 Basis Pelaporan Data

Pelaporan data kualitas harus bersamaan dengan basis analisis data yang digunakan. Basis pelaporan data ini penting untuk mengetahui nilai parameter kualitas yang dihilangkan atau disertakan karena nilai parameter kualitas akan berubah pada setiap basis pelaporan.

Basis pelaporan data terbagi menjadi lima, yaitu a.r. (*as received basis*), a.d.b. (*air-dried basis*), *dry* (*dry basis*), d.a.f. (*dry ash-free basis*), d.m.m.f. (*dry, mineral matter-free basis*). Komponen-komponen parameter kualitas yang disertakan dalam setiap basis dijelaskan pada Gambar III.2.



Gambar III.2 Komponen parameter kualitas dalam basis pelaporan data (Ward, 1984 dalam Thomas, 2013).

Formula untuk melakukan kalkulasi hasil pelaporan pada setiap basis pelaporan dapat dilihat pada Tabel III.6.

Tabel III.6 Formula untuk konversi ke basis pelaporan data yang berbeda (BSI, 2002 dalam Thomas, 2013).

Given result	Wanted result				
	As sampled (as received) (as despatched)	Air dried (as fired)	Dry	Dry, ash-free	Dry, mineral-matter-free
As sampled (as received) (as despatched) (as fired)	-	$\frac{100 - Mad}{100 - Mar}$	$\frac{100}{100 - Mar}$	$\frac{100}{100 - (Mar + Aar)}$	$\frac{100}{100 - (Mar + MMar)}$
Air dried (as analysed)	$\frac{100 - Mar}{100 - Mad}$	-	$\frac{100}{100 - Mad}$	$\frac{100}{100 - (Mad + Aad)}$	$\frac{100}{100 - (Mad + MMad)}$
Dry	$\frac{100 - Mar}{100}$	$\frac{100 - Mad}{100}$	-	$\frac{100}{100 - Ad}$	$\frac{100}{100 - MMd}$
Dry, ash-free	$\frac{100 - (Mar + Aar)}{100}$	$\frac{100 - (Mad + Aad)}{100}$	$\frac{100 - Ad}{100}$	-	$\frac{100 - Ad}{100 - MMd}$
Dry, mineral-matter-free	$\frac{100 - (Mar + MMar)}{100}$	$\frac{100 - (Mad + MMad)}{100}$	$\frac{100 - MMd}{100}$	$\frac{100 - MMd}{100 - Ad}$	-

M = moisture %; A = ash %; MM = mineral matter %; ar = as received basis; ad = air dried basis; d = dry basis.

Dalam melakukan perhitungan MM, penulis menggunakan formula Parr (Parr, 1928 dalam Thomas, 2013) sebagai berikut:

$$MM = 1,08A + 0,55S$$

Dengan keterangan:

MM = *mineral matter*, %

A = kadar abu/*ash*, %

S = total sulfur, %

Basis m.m.m.f. (*moist mineral matter-free*) adalah basis yang menghilangkan kadar *mineral matter*, tetapi tetap mempertahankan kandungan air pada batubara (ASTM, 2000). Konversi ke basis m.m.m.f. ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$CV\ m.m.m.f. = \frac{100 (CV\ a.d.b. - 50S)}{(100 - MM\ a.d.b.)}$$

Dengan keterangan:

CV = *calorific value*, btu/lb

S = total sulfur, %

MM = *mineral matter*, %

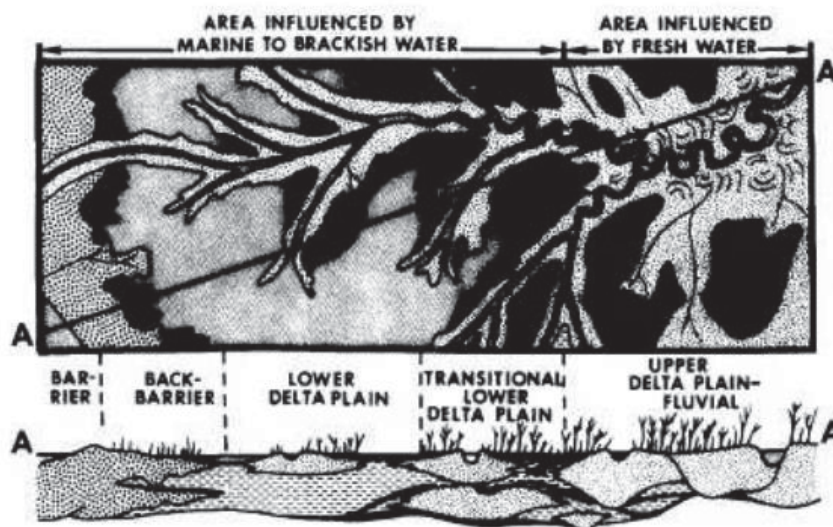
III.3 Lingkungan Pengendapan Batubara

Mengetahui bentuk, morfologi, dan kualitas lapisan batubara merupakan hal yang penting dalam pertambangan ataupun perencanaan tambang batubara untuk kedepannya (Thomas, 2013). Lingkungan pengendapan batubara dapat dibagi menjadi dua, yaitu model tradisional (*traditional model*) dan model modern (*modern peat analogue*).

III.3.1 Traditional Model

Model pengendapan tradisional dibuat berdasarkan *cyclothem*, yaitu sebuah sekuen litologi berulang pada lingkungan transisi. Konsep ini telah dimodifikasi secara lateral dan vertikal pada lingkungan *fluvial*, *deltaic*, dan *coastal barrier*. Sehingga diperoleh lingkungan pengendapan yang paling sesuai untuk pengendapan batubara

adalah *coastal barrier and back barrier*, *lower delta plain*, *transitional lower delta plain*, dan *upper delta plain – fluvial* (Horne dkk., 1979 dalam Thomas, 2013).

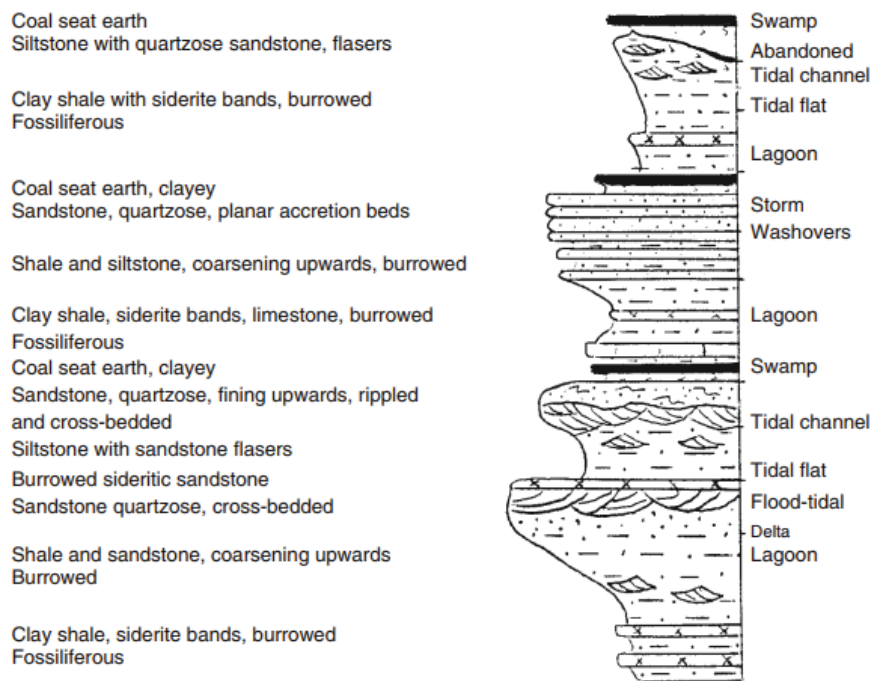


Gambar III.3 Pembagian lingkungan pengendapan batubara (Horne dkk., 1979 dalam Thomas, 2013).

III.3.1.1 Fasies *Coastal Barrier dan Back Barrier*

Fasies pada lingkungan pengendapan ini dicirikan oleh beberapa struktur sedimen yang bervariasi, seperti batupasir dengan struktur sedimen *ripple* dan *burrowed* pada permukaan atas, yang diinterpretasikan sebagai fasies *storm washover*; kemudian batupasir dengan ketebalan lebih dari 10 m, yang dapat diinterpretasikan sebagai endapan *tidal channel*.

Endapan *back barrier* pada laguna memiliki karakteristik *coarsening upward*, *organic-rich grey shales* dan batulanau yang ditindih oleh lapisan batubara tipis dan tidak menerus. Sekuen ini mengalami bioturbasi secara ekstensif, bersamaan dengan konkresi dari presipitasi *iron carbonate (sideritic sandstone)* secara kimiawi. Kemenerusan sekuen ini dapat mencapai ketebalan 30 m dan 25 km secara lateral. Batubara pada lingkungan *back barrier* umumnya tipis, tidak menerus, dan mengandung sulfur yang tinggi (Thomas, 2013). Sekuen vertikal secara umum endapan *barrier* dan *back barrier* dapat dilihat pada Gambar III.4.

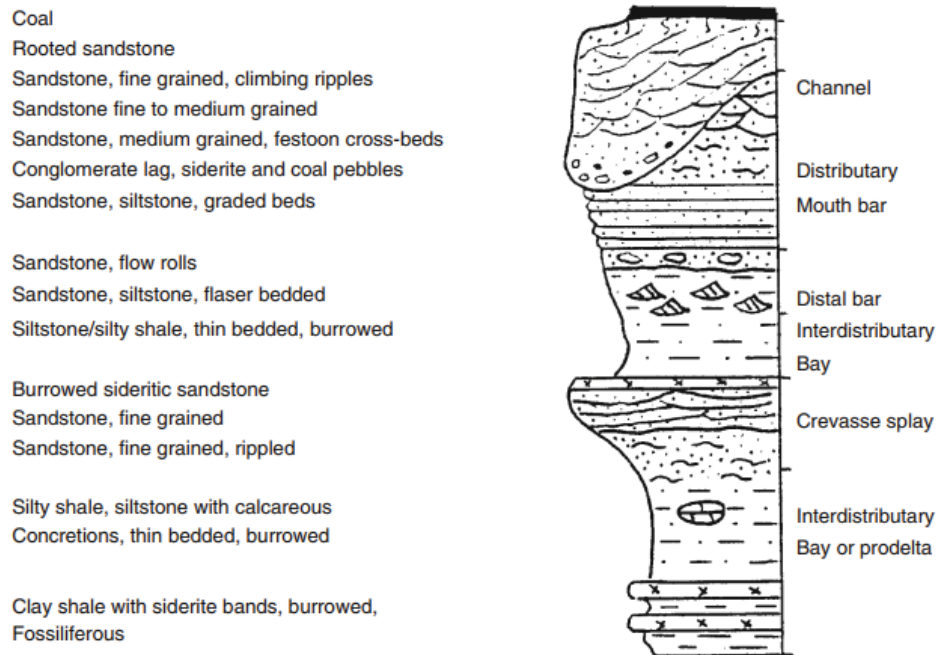


Gambar III.4 Sekuen vertikal umum endapan *barrier* dan *back barrier* (Horne dkk., 1979 dalam Thomas, 2013).

III.3.1.2 Fasies *Lower Delta Plain*

Endapan *lower delta plain* didominasi oleh sekuen *coarsening upward* dari litologi batulempung dan batulanau dengan ketebalan mencapai 55 m dan secara lateral mencapai 110 km. Bagian bawah dari sekuen ini memiliki karakteristik batulempung abu-abu hitam hingga hitam dengan distribusi batugamping dan *siderite*. Pada bagian atas, batupasir umum ditemui yang mencerminkan peningkatan energi dari pengisian teluk oleh sedimen.

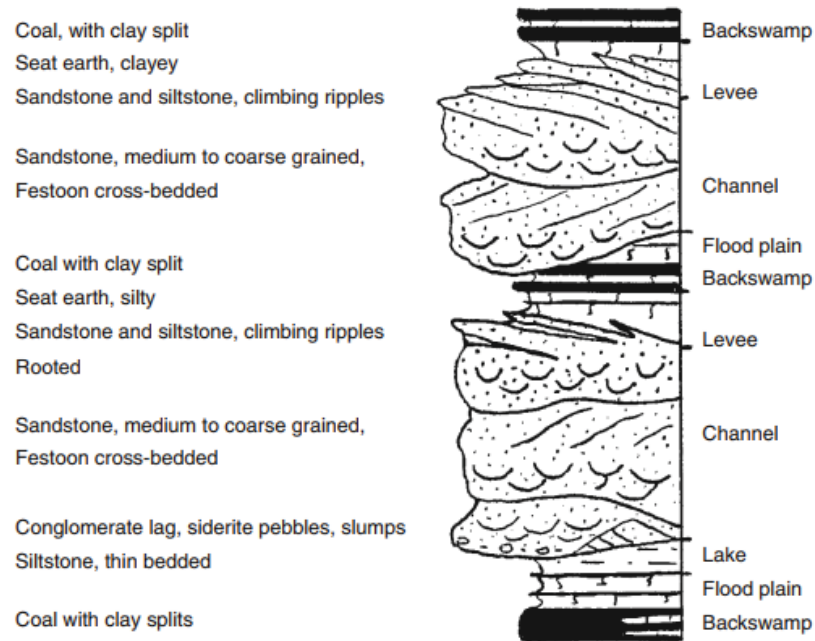
Secara umum, sekuen ini dikarakteristik dengan endapan *channel*, *interdistributary bay* dan *crevasse-splay*. Endapan *channel* ini memiliki kontak iregular, menunjukkan *scouring* pada sedimen dibawahnya, dan secara umum pada dasar dari *channel* ini, fragmen berukuran *pebble* dan pecahan batubara diendapkan. Sekuen vertikal secara umum endapan *lower delta plain* dapat dilihat pada Gambar III.5.



Gambar III.5 Sekuen vertikal umum endapan *lower delta plain* (Horne dkk., 1979 dalam Thomas, 2013).

III.3.1.3 Fasies *Upper Delta Plain* dan *Alluvial Plain*

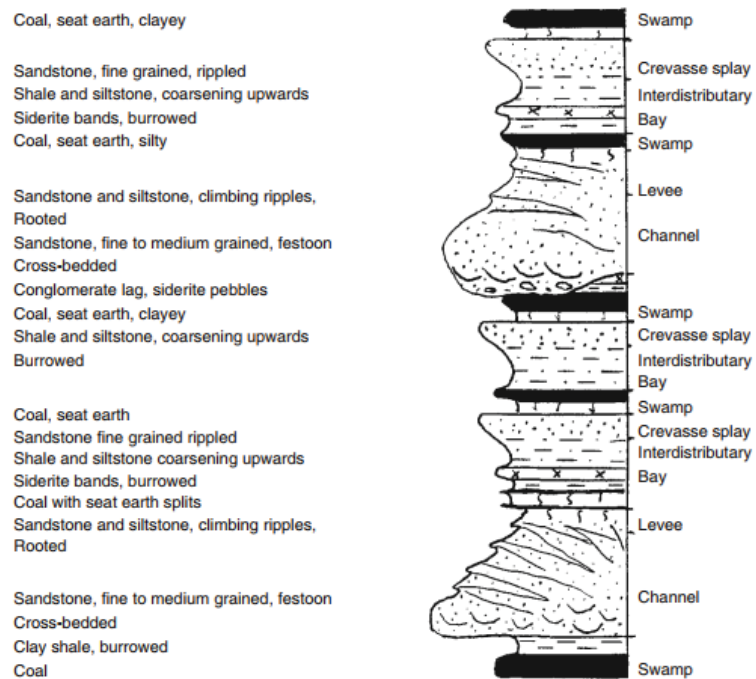
Berbeda dengan fasies *lower delta plain* dengan karakteristik sekuen ukuran yang relatif halus, endapan *upper delta plain* didominasi oleh batupasir *linear* dan *lenticular* dengan kemenerusan 25 m untuk ketebalan dan 11 km secara lateral. Batupasir ini *scoured* pada bagian bawah dan pada bagian atas dicirikan oleh litologi batulempung, batulanau, dan batubara. Batupasir ini memiliki ciri *fining upward* dengan kehadiran konglomerat berukuran *pebble* dan fragmen batubara di bagian bawah. Batupasir ini juga dicirikan oleh perlapisan yang masif dan ditindih oleh batulanau. Sekuen vertikal secara umum endapan *upper delta plain* dan *alluvial plain* dapat dilihat pada Gambar III.6.



Gambar III.6 Sekuen vertikal umum endapan *upper delta plain* dan *alluvial plain* (Horne dkk., 1979 dalam thomas, 2013).

III.3.1.4 Fasies *Transitional Lower Delta Plain*

Endapan *transitional lower delta plain* terletak di antara *upper* dan *lower delta plain*, endapan ini memiliki karakteristik dari kedua sekuen tersebut. Lingkungan pengendapan ini dicirikan oleh banyaknya *channel* dan sekuen ini banyak mencirikan endapan *creevase-splay*. Batubara pada lingkungan ini relatif lebih menerus secara lateral dan lebih tebal dibandingkan endapan *lower delta plain*. Sekuen vertikal secara umum endapan *transitional lower delta plain* dapat dilihat pada Gambar III.7.

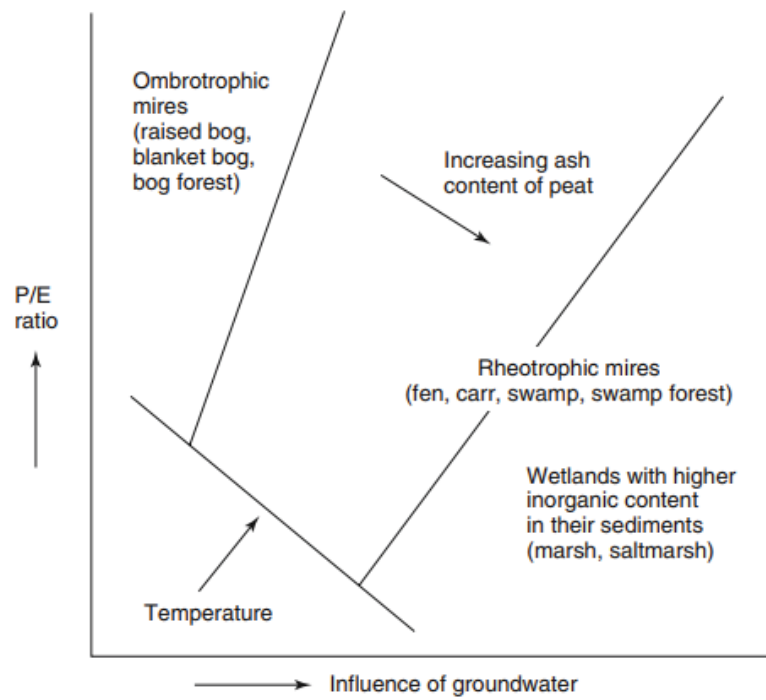


Gambar III.7 Sekuen vertikal umum endapan *transitional lower delta plain* (Horne dkk., 1979 dalam Thomas, 2013).

III.3.2 Modern Peat Analogue

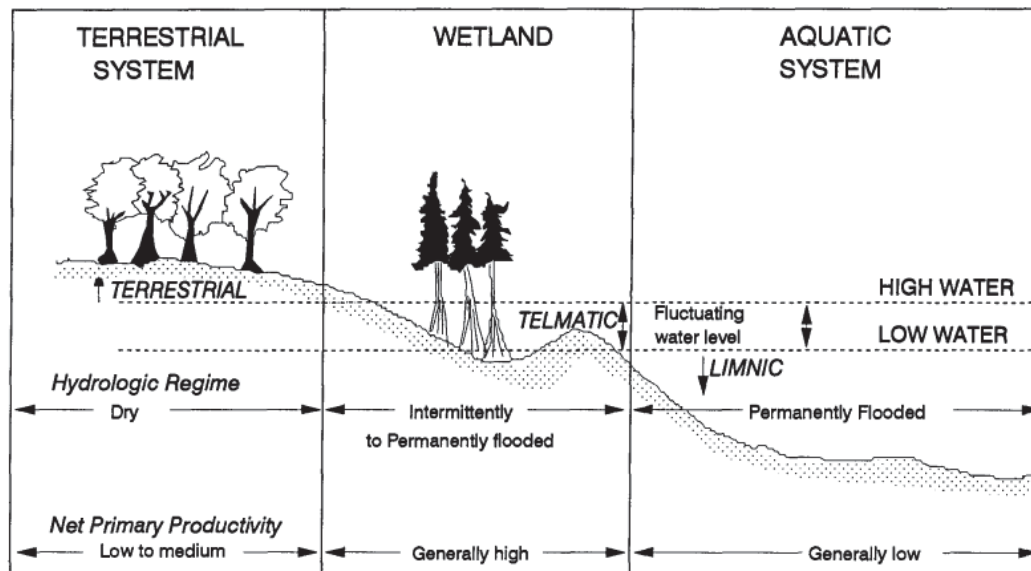
Karakteristik utama pada batubara adalah ketebalan, kemenerusan secara lateral, peringkat, komponen maseral, dan kualitas. Selain dari peringkat, yang dipengaruhi oleh penimbunan dan pengaruh tektonik, karakteristik lain ditentukan oleh faktor yang mengontrol rawa/*mire* dimana gambut tersebut terbentuk. Faktor tersebut terdiri dari, jenis rawa, tipe dari vegetasi, laju pertumbuhan, tingkat humifikasi, perubahan ketinggian permukaan, dan laju sedimen klastik (McCabe dan Parrish, 1992 dalam Thomas, 2013).

Diessel (1992) mengklasifikasikan gambut menjadi dua, yaitu *ombrogenous peatland* dan *topogenous peatland*. Kedua jenis gambut ini dibedakan berdasarkan ketergantungan terhadap air tanah atau air hujan. Kadar abu/*ash* pada batubara berpengaruh terhadap kedua klasifikasi hidrologi ini, dimana *topogenous peatland* memiliki kandungan *ash* lebih tinggi dibandingkan *ombrogenous peatland* karena pengaruh air tanah yang membawa non organik material. Klasifikasi dari kedua kategori hidrologi ini dijelaskan oleh Moore, (1987) pada Gambar III.8.



Gambar III.8 Diagram hubungan antara *peatland* terhadap pengaruh air hujan dan air tanah (Moore, 1987 dalam Thomas, 2013).

Lamberson dkk. (1991) membagi rezim hidrologi berdasarkan basis ketinggian air menjadi tiga (Gambar III.9), yaitu (1) *terrestrial* – di atas permukaan air, kondisi kering; (2) *telmatic* – di antara *high* dan *low* permukaan air; dan (3) *limnic* – *subaqueous*. Jenis tumbuhan yang berkorelasi pada *marsh* (didominasi oleh tumbuhan rumput-rumputan) dan *swamp* (didominasi oleh tumbuhan kayu).



Gambar III.9 Pembagian rezim hidrologi berdasarkan basis ketinggian air (modifikasi dari Mitsch dan Gloesselink, 1986 dalam Lamberson dkk., 1991).

Kondisi lingkungan pengendapan batubara berdasarkan *modern peat analogue* dapat dianalisis dengan menggunakan data komposisi maseral dengan parameter *gelification index* yang membandingkan maseral hasil proses gelifikasi dengan oksidasi dan *tissue preservation index* yang menggambarkan tingkat jaringan tumbuhan terpreservasi dibandingkan dengan jaringan tumbuhan yang terhancurkan (Diessel, 1992).

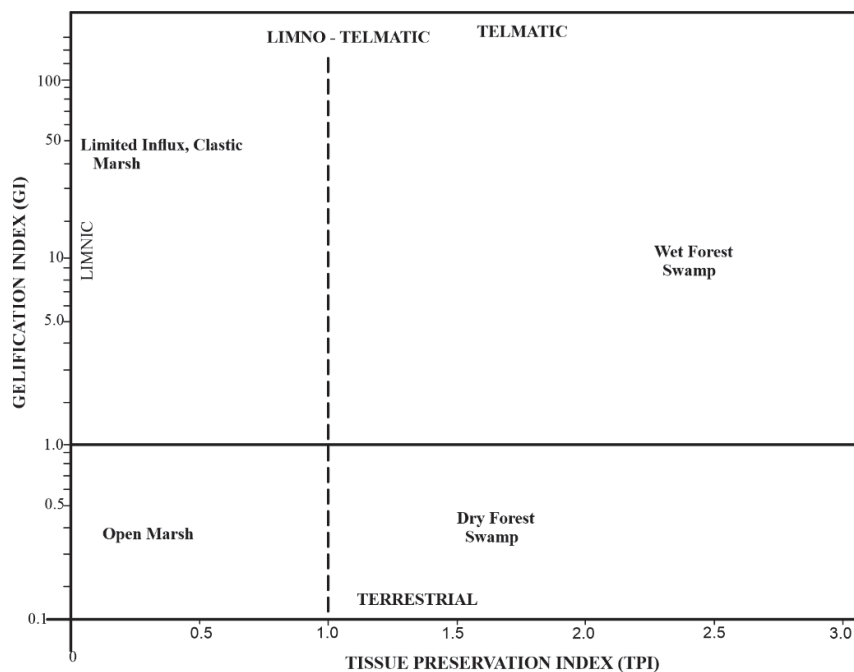
A. Diessel, (1992) menyatakan TPI adalah rasio dari *tissue-derived structured* maseral dengan *tissue-derived unstructured* yang mengukur derajat humifikasi dengan menggunakan komposisi maseral, TPI juga mengindikasikan persentase kayu yang berkontribusi dan terpreservasi pada pembentukan gambut. Nilai TPI yang rendah umumnya disebabkan oleh dominasi tumbuhan rumput-rumputan pada rawa/*mire* atau tingkat humifikasi yang terjadi berlangsung intens, sedangkan nilai TPI yang tinggi mengindikasikan dominasi vegetasi pohon. TPI didefinisikan sebagai persamaan berikut (Diessel, 1992):

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

B. Diessel, (1992) menyatakan GI sebagai indeks untuk mengindikasikan relatif tingkat kekeringan atau kebasahan dari kondisi lingkungan pembentukan gambut. Semakin tinggi nilai GI maka semakin basah kondisi lingkungan pengendapan gambut, sedangkan semakin rendah nilai GI maka semakin kering kondisi lingkungan pengendapan gambut. GI didefinisikan sebagai persamaan berikut (Diessel, 1992):

$$GI = \frac{\text{Total vitrinite} + \text{gelo} - \text{inertinite}}{\text{Telo} - \text{inertinite} + \text{detro} - \text{inertinite}}$$

Penulis menggunakan diagram TPI (*Tissue Preservation Index*) – GI (*Gelification Index*) untuk menentukan kondisi lingkungan pengendapan batubara berdasarkan *modern peat analogue* (Gambar III.10).



Gambar III.10 Diagram fasies lingkungan pengendapan batubara (modifikasi dari Diessel, 1986 dalam Lamberson dkk., 1991).

III.4 Perhitungan Sumber Daya Batubara

Perhitungan sumber daya batubara (*coal resources*) dilakukan untuk mengetahui jumlah secara volume atau massa endapan batubara yang dapat dimanfaatkan untuk kepentingan pertambangan. Menurut Koesoemadinata, (2000) sumber daya adalah

kuantitas dari suatu cebakan berdasarkan penafsiran geologi saja, dengan penafsiran pertambangan belum dimasukkan, sedangkan cadangan adalah kuantitas dari suatu cebakan yang telah memasukkan semua dampak dan aspek pertambangan sehingga, ukuran, bentuk kedalaman, dan kadar dari sumber daya dapat diketahui dengan baik.

Sumber daya batubara adalah bagian dari batubara dalam bentuk dan kuantitas tertentu, serta mempunyai prospek berasalan yang memungkinkan untuk ditambang secara ekonomis. Lokasi, kualitas, kuantitas, karakteristik geologi, dan kemenerusan dari lapisan batubara yang telah diketahui, diperkirakan atau diinterpretasikan dari bukti geologi tertentu. Sumber daya batubara dibagi sesuai dengan tingkat kepercayaan geologi ke dalam kategori tereka, tertunjuk, dan terukur (BSN, 2019).

III.4.1 Tipe Endapan Batubara dan Kondisi Geologi

Menurut SNI 5015:2019 dalam BSN, (2019) proses sedimentasi dan pengaruh tektonik, karakteristik geologi tersebut dapat dikelompokkan menjadi tiga kelompok utama, yaitu kelompok geologi sederhana, kelompok geologi moderat, dan kelompok geologi kompleks. Parameter pengaruh tingkatan kondisi geologi ini dapat dilihat pada Tabel III.7.

A. Kelompok geologi sederhana

Endapan batubara dalam kelompok ini umumnya tidak dipengaruhi secara signifikan oleh lipatan, sesar, dan intrusi. Lapisan batubara pada umumnya landai, menerus secara lateral sampai ribuan meter, dan hampir tidak mempunyai percabangan. Ketebalan lapisan batubara secara lateral dan kualitasnya tidak memperlihatkan variasi yang signifikan.

B. Kelompok geologi moderat

Batubara dalam kelompok ini diendapkan dalam kondisi sedimentasi yang lebih bervariasi sampai tingkat tertentu dan telah mengalami pengaruh tektonik pasca proses pengendapan, ditandai oleh adanya perlipatan dan sesar. Kelompok ini dicirikan pula oleh kemiringan lapisan yang sedang dan variasi ketebalan lateral yang sedang serta munculnya percabangan lapisan batubara, tetapi sebenarnya

masih dapat diikuti sampai ratusan meter. Kualitas batubara dapat dipengaruhi secara langsung berkaitan dengan tingkat perubahan yang terjadi baik pada saat proses sedimentasi maupun pasca pengendapan. Pada beberapa tempat intrusi batuan beku mempengaruhi struktur lapisan dan kualitas batubaranya.

C. Kelompok geologi kompleks

Batubara pada kelompok ini umumnya diendapkan dalam kondisi sedimentasi kompleks atau telah mengalami deformasi tektonik yang ekstensif yang mengakibatkan terbentuknya lapisan batubara dengan ketebalan yang beragam. Kualitas batubaranya banyak dipengaruhi oleh perubahan-perubahan yang terjadi pada saat proses sedimentasi berlangsung atau pada pasca pengendapan seperti percabangan atau kehilangan lapisan (*washout*).

Tabel III.7 Parameter pengelompokkan kondisi geologi (BSN, 2019).

Parameter	Kondisi geologi		
	Sederhana	Moderat	Kompleks
I.A. Sedimentasi			
1. Variasi ketebalan	sedikit bervariasi	bervariasi	sangat bervariasi
2. Kesenambungan	ribuan meter	ratusan meter	puluhan meter
3. Percabangan	hampir tidak ada	beberapa	banyak
I.B. Tektonik			
1. Sesar	tidak ada	jarang	rapat
2. Lipatan	ada, landai	terlipat sedang	terlipat kuat
3. Intrusi	tidak ada	berpengaruh	sangat berpengaruh
4. Kemiringan	landai	sedang	terjal
II. Variasi kualitas	sedikit bervariasi	bervariasi	sangat bervariasi

III.4.2 Klasifikasi Sumber Daya Batubara

Berdasarkan SNI 5015:2019 oleh BSN, (2019) sumber daya batubara dapat diklasifikasikan berdasarkan dengan tingkat keyakinan dan bukti geologi yang tersedia. Klasifikasi sumber daya ini dan penentuan kondisi geologi akan mempengaruhi jarak perhitungan dari titik informasi yang akan digunakan (Tabel III.8).

A. Sumber daya batubara tereka (*inferred coal resource*)

Bagian dari estimasi sumber daya batubara total yang kualitas dan kuantitasnya hanya dapat diperkirakan dengan tingkat kepercayaan yang rendah. Titik pengamatan yang mungkin didukung oleh data pendukung tidak cukup untuk membuktikan kemenerusan lapisan batubara dan/atau kualitasnya. Estimasi dari kategori kepercayaan ini dapat berubah secara berarti dengan eksplorasi lanjut.

B. Sumber daya batubara tertunjuk (*indicated coal resource*)

Bagian dari estimasi sumber daya batubara total yang kualitas dan kuantitasnya dapat diperkirakan dengan tingkat kepercayaan yang beralasan, didasarkan pada informasi yang didapatkan dari titik pengamatan yang mungkin didukung oleh data pendukung. Titik pengamatan yang ada cukup untuk menginterpretasikan kemenerusan lapisan batubara, tetapi tidak cukup untuk membuktikan kemenerusan lapisan batubara dan/atau kualitasnya.

C. Sumber daya batubara terukur (*measured coal resource*)

Bagian dari estimasi sumber daya batubara total yang kualitas dan kuantitasnya dapat diperkirakan dengan tingkat kepercayaan yang tinggi, didasarkan pada informasi yang didapat dari titik pengamatan yang diperkuat dengan data pendukung. Titik pengamatan jaraknya cukup berdekatan untuk membuktikan kemenerusan lapisan batubara dan/atau kualitasnya.

Tabel III.8 Jarak titik informasi pada tiap jenis sumber daya berdasarkan kondisi geologi (BSN, 2019).

Kondisi geologi	Kriteria	Sumber daya		
		Tereka	Tertunjuk	Terukur
Sederhana	Jarak titik pengamatan (m)	$1.000 < x \leq 1.500$	$500 < x \leq 1.000$	$x \leq 500$
Moderat	Jarak titik pengamatan (m)	$500 < x \leq 1.000$	$250 < x \leq 500$	$x \leq 250$
Kompleks	Jarak titik pengamatan (m)	$250 < x \leq 500$	$100 < x \leq 250$	$x \leq 100$

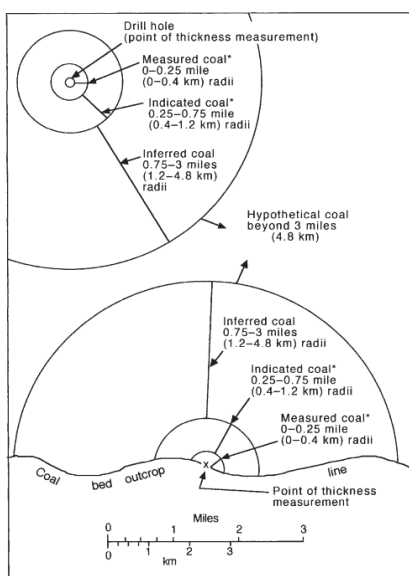
III.4.3 Metode Perhitungan Estimasi Sumber Daya Batubara

Perhitungan sumber daya batubara di Indonesia telah memiliki acuan berdasarkan SNI 5015:2019 yang disusun oleh BSN, (2019). Acuan ini dibuat karena beragamnya cara perhitungan sumber daya dan cadangan batubara di Indonesia.

Adanya acuan berdasarkan SNI ini diperuntukkan sebagai pedoman dalam penafsiran berbagai istilah dalam sumber daya dan cadangan batubara di Indonesia.

Pada penelitian ini penulis menggunakan perangkat lunak *Minescape 5.7* untuk menghitung sumber daya batubara di daerah penelitian. *Software* ini dapat membuat model dari lapisan batubara sehingga dapat diketahui besarnya volume dan tonase batubara. Dalam pemodelan batubara digunakan data primer berupa data singkapan batubara yang ditemui di lapangan dan data sekunder berupa data sumur bor. Perhitungan sumber daya batubara pada perangkat lunak *Minescape 5.7* ini menggunakan penggabungan metode poligon atau area pengaruh dan metode triangulasi.

Metode poligon menetapkan suatu area berdasarkan titik pengamatan pada jarak tertentu di sekitar titik pengamatan. Titik pengamatan yang dimaksud adalah titik bor yang telah diketahui lokasi kedalaman lapisan batubara dan kualitasnya. Poligon disini dibentuk dari gabungan titik tengah antara titik pengamatan dan pengaruh di sekitarnya. Kualitas rata-rata dihitung berdasarkan titik sampel dalam poligon yang dianggap mewakili seluruh kualitas area poligon. Penggambaran poligon pengaruh dan klasifikasi sumber daya batubara diilustrasikan oleh Gambar III.11.



Gambar III.11 Ilustrasi poligon pengaruh dan klasifikasinya (Thomas, 2013).

Dalam metode triangulasi setiap titik dianggap sebagai sudut yang membentuk segitiga, jika segitiga terbentuk dengan ketebalan yang konstan, maka besar volume sama dengan luas area dikali ketebalan. Nilai tonase didapatkan dengan perkalian faktor tonase dan untuk nilai kualitas diperoleh berdasarkan nilai rata-rata kualitas dari ketiga sudut (Hustrulid, 2013).

III.5 Log Sumur dan Elektrofases

III.5.1 Konsep Dasar Log Sumur

Geofisika *logging* adalah perhitungan variasi karakteristik fisik sepanjang kedalaman lubang bor dari batuan dengan alat perhitungan geofisika (*sondes*) pada lubang bor. Geofisika logging terdiri dari beberapa jenis, seperti *radiation logs*, *caliper log*, dan *electric logs*.

Radiation logs mengukur unsur radioaktif yang terpancarkan dari suatu formasi batuan dan umumnya digunakan untuk mengidentifikasi litologi dan melakukan korelasi lapisan. *Radiation logs* terdiri dari log sinar gamma, log densitas, dan log neutron. Pada eksplorasi batubara, dimana lubang bor cenderung dangkal (kurang dari 350 m), *radiation logs* merupakan alat yang paling tepat untuk identifikasi batubara. Pada penelitian ini penulis hanya akan menggunakan data *radiation logs* berupa log sinar gamma dan log densitas.

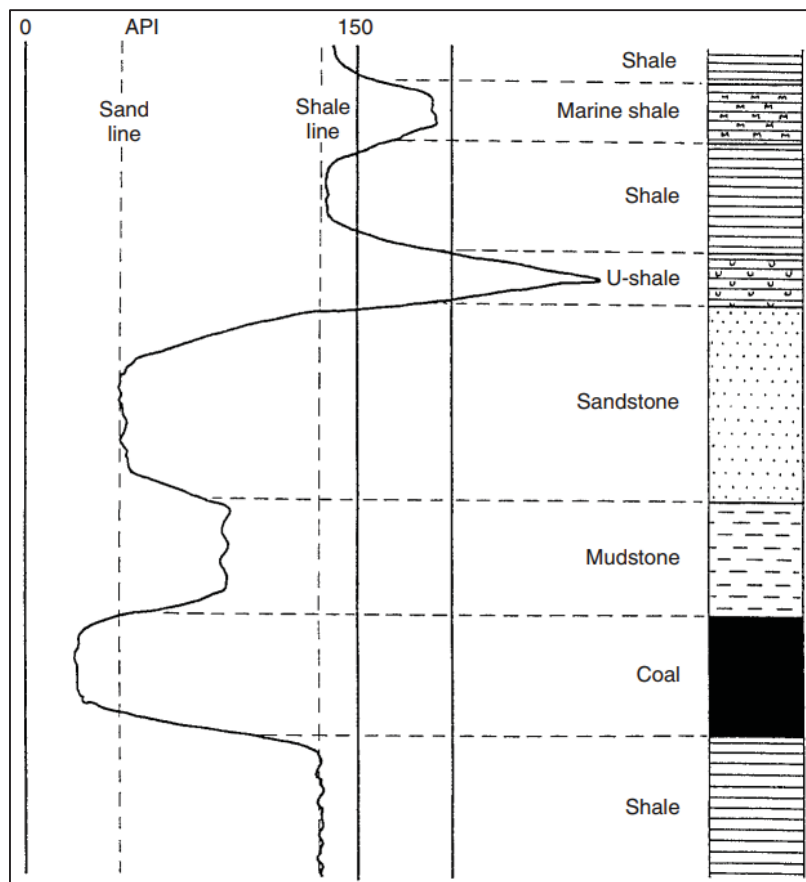
A. Log sinar gamma

Log sinar gamma mengukur radiasi unsur radioaktif alami dari suatu formasi batuan. Prinsip sumber unsur radioaktif di batuan umumnya adalah isotop *potassium-40* yang banyak hadir pada batulempung dan *clay-rich siltstone*. Batubara dengan kualitas yang baik atau *clean sandstone* memiliki tingkat radiasi rendah. Log sinar gamma dapat dilaporkan dalam satuan *Counts per Second* (CPS) dan *American Petroleum Institute* (API). Log sinar gamma relatif memiliki resolusi vertikal yang buruk, dapat hingga 40 cm secara vertikal. Ketebalan lapisan batubara dapat diinterpretasikan hingga 1/3 garis kurva dari dasar litologi batulempung (Thomas, 2013).

B. Log densitas

Dalam eksplorasi batubara, log densitas digunakan untuk mengidentifikasi batubara, dikarenakan batubara memiliki nilai densitas yang rendah. Log densitas memanfaatkan sumber sinar radioaktif untuk mengukur densitas batuan. Prinsip kerja log densitas adalah alat pengukur akan memancarkan sinar gamma dengan intensitas tertentu yang akan menembus formasi batuan. Partikel sinar gamma akan membentur elektron-elektron dalam batuan yang mengakibatkan pengurangan energi. Energi yang kembali setelah mengalami benturan akan diterima oleh detektor dengan jarak tertentu dari sumber pemancar. Makin lemah energi yang kembali menunjukkan makin banyaknya elektron-elektron dalam batuan, yang berarti semakin banyak mineral penyusun batuan. Faktor yang mempengaruhi besar kecilnya energi yang diterima oleh detektor tergantung dari besarnya densitas matriks batuan, porositas batuan, ukuran lubang bor, dan jarak sumber ke suatu kedalaman yang diuji.

Log densitas terdiri dari dua jenis, yaitu *Long Spaced Density* (LSD) dan *Short Spaced Density* (SSD). Pada penelitian ini data log densitas diperoleh dalam satuan *Counts per Second* (CPS). CPS adalah satuan yang digunakan untuk menghitung intensitas radiasi dari suatu unsur radioaktif per detik. Hubungan nilai satuan CPS berbanding terbalik dengan nilai satuan gr/cc, dimana nilai CPS yang tinggi berarti nilai densitas batuan yang diperoleh rendah dan berlaku sebaliknya. Ketebalan lapisan batubara dapat diinterpretasikan pada dua kasus, jika nilai log sinar gamma non linear dengan log densitas maka ketebalan batubara hingga $2/3$ nilai kurva tertinggi dan jika nilai log *gamma ray* linear, maka ketebalan batubara hingga $1/2$ kurva tertinggi.



Gambar III.12 Contoh pembacaan log sinar gamma (Thomas, 2013).

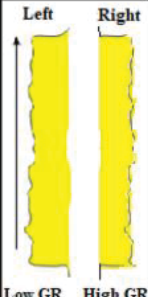
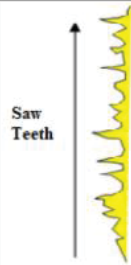
III.5.2 Elektrofases Bentuk Log Sinar Gamma

Bentuk kurva log sinar gamma dapat diinterpretasikan sebagai pengendapan suatu fasies karena bentuk tersebut memiliki kemiripan dengan suksesi dari ukuran butir. Bentuk log sinar gamma ini oleh Kendal dkk. (2003) dibagi menjadi lima, antara lain: *blocky pattern* atau *cylindrical shape*, *funnel shape*, *bell shape*, *symmetrical*, dan *irregular*. Setiap bentuk dapat terbentuk pada lingkungan pengendapan yang berbeda ataupun setiap lingkungan pengendapan dapat menghasilkan lebih dari satu bentuk, sehingga interpretasi lingkungan pengendapan dengan menggunakan bentuk sebuah fasies harus diintegrasikan dengan parameter lain agar memperoleh interpretasi yang baik (Selley, 1985).

- A. Bentuk log *blocky* atau *cylindrical* dicirikan dengan bentuk silinder yang mengindikasikan energi pengendapan yang selalu konstan dan menerus tanpa ada gangguan (arus cenderung homogen). Bentuk ini umumnya memiliki

kontak atas yang tajam. Bentuk *blocky* atau *cylindrical* dapat diasosiasikan dengan endapan sedimen *fluvial channels*, *carbonate shelf*, *reef*, *submarine canyon fill*, *prograding delta distributaries*, *aeolian dunes*, dan *evaporite fill of basin*.

- B. Bentuk log berbentuk corong (*funnel shape*) menunjukkan endapan sedimen yang mengasar ke atas (*coarsening upward*) sebagai akibat dari peningkatan energi pengendapan. Bentuk *funnel* dapat diasosiasikan dengan endapan sedimen *crevasse-splay*, *river*, *mouth bar*, *delta front*, *shoreface*, dan *submarine fan slope*.
- C. Bentuk log berbentuk lonceng (*bell shape*) menunjukkan endapan sedimen yang menghalus ke atas (*fining upward*) sebagai akibat dari penurunan energi pengendapan. Bentuk *bell shape* dapat diasosiasikan dengan endapan *fluvial point bar*, *tidal point bar*, *deep tidal channel fill*, *deltaic channel*, *proximal deep sea settings*, dan *tidal flats*.
- D. Bentuk log *symmetrical shape* awalnya menunjukkan endapan yang mengkasar ke atas (*coarsening upward*) kemudian diikuti oleh endapan yang menghalus ke atas (*fining upward*). Bentuk *symmetrical* merupakan kombinasi dari *bell shape* dan *funnel shape* pada suatu sistem yang sama dan masih satu genetik. Bentuk ini dapat diasosiasikan dengan *rework offshore bar* dan *regressive to transgressive shore face delta*.
- E. Bentuk log *irregular shape* menunjukkan energi pengendapan sedimen yang relatif berubah-ubah secara cepat, sehingga menunjukkan kurva log sinar gamma yang tidak teratur. Bentuk ini dapat diasosiasikan dengan endapan *fluvial flood plain*, *storm dominated shelf*, *mixed tidal flat*, *debris flow*, *canyon fill*, dan *deep marine slope*.

GR Log Pattern	Cylindrical/ Boxcar	Funnel	Bell	Symmetrical	Serrated/Irregular
GR Trend					
Sediment Supply	Aggrading	Prograding	Retrograding	Prograding & Retrograding	Aggrading
Depositional Environment (Common)	Fluvial channels, Carbonate shelf, Reef, Submarine canyon fill, Prograding delta distributaries, Aeolian dunes, evaporite fill of basin	Crevasse splay, River, Mouth bar, Delta front, shoreface, Submarine fan lobe	Fluvial Point bar, Tidal point bar, deep tidal channel fill, Deltaic channels, proximal deep sea settings, Tidal flats	Reworked offshore bar, regressive to transgressive shore face delta,	Fluvial flood plain, Storm dominated shelf, mixed Tidal flat, Debris flow, Canyon fill, Deep marine-slope

Gambar III.13 Bentuk log sinar gamma yang mencirikan suatu fasies di suatu lingkungan pengendapan (Kendal dkk., 2003).