BAB III

TEORI DASAR

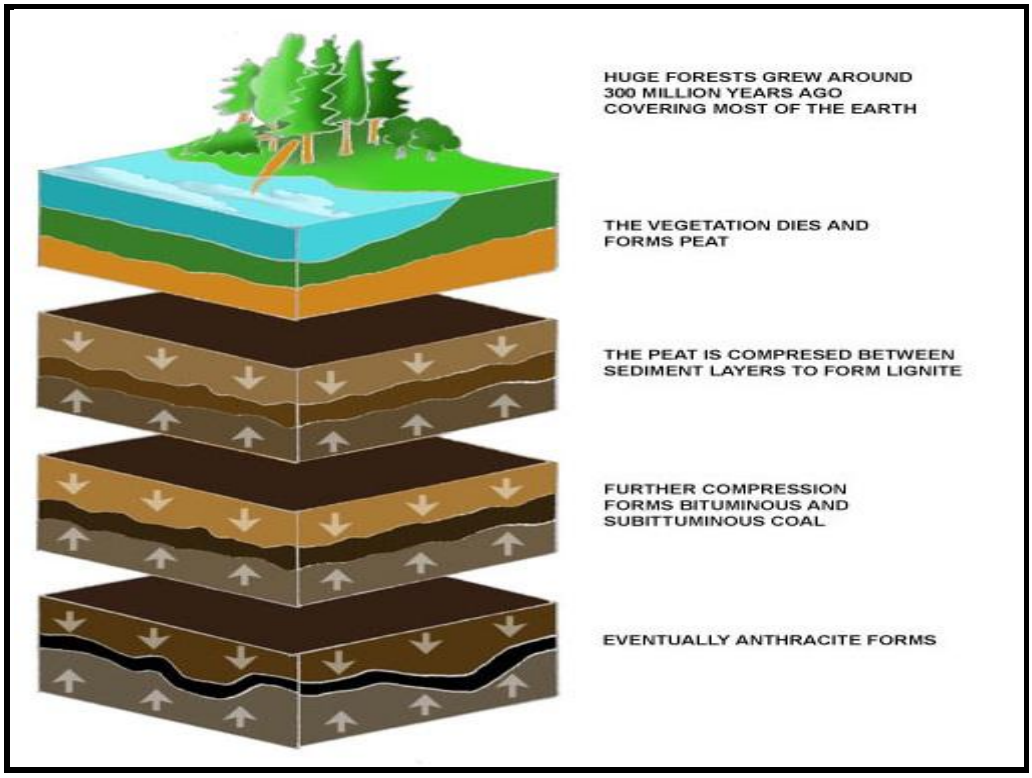
3.1. Definisi Batubara

Definisi batubara menurut badan standarisasi nasional dalam *SNI* (1997) adalah endapan yang mengandung hasil akumulasi material organik yang berasal dari sisa-sisa tumbuhan yang telah melalui proses lithifikasi untuk membentuk lapisan batubara. Material tersebut telah mengalami kompaksi, ubahan kimia dan proses metamorfosis oleh peningkatan panas dan tekanan selama periode geologis. Bahan-bahan organik yang terkandung dalam lapisan batubara mempunyai berat > 50% volume bahan organik.

3.2. Cara dan Tempat Terbentuknya Batubara

Batubara berasal dari tumbuhan yang disebabkan karena adanya proses-proses geologi, kemudian berbentuk endapan batubara yang dikenal sekarang ini. Bahan-bahan tumbuhan mempunyai komposisi utama yang terdiri dari karbon dan hidrogen. Selain itu terdapat kandungan mineral nitrogen. Substansi utamanya adalah *cellulose* yang merupakan bagian dari selaput sel tumbuhan mengandung karbohidrat yang

tahan terhadap perubahan kimiawi. Pembusukan dari bahan tumbuhan merupakan proses yang terjadi tanpa adanya oksigen, kemudian berlangsung di bawah air yang disertai aksi dari bakteri, sehingga terbentuklah arang kayu. Tidak adanya oksigen menyebabkan hidrogen lepas dalam bentuk karbondioksida atau karbonmonoksida dan beberapa dari keduanya berubah menjadi metan. Vegetasi pada lingkungan tersebut mati kemudian terbentuklah *Peat* (Gambut). Kemudian gambut tersebut mengalami kompresi dan pengendapan diantara lapisan sedimen dan juga mengalami kenaikan temperatur akibat geothermal gradient. Akibat proses tersebut maka akan terjadi pengurangan porositas dan Pengurangan Moisture sehingga terlepasnya grup OH, COOH, OCH3, dan CO dalam wujud cair dan gas. karena banyaknya unsur oksigen dan hidrogen yang terlepas maka unsur karbon relatif bertambah yang mengakibatkan terjadinya lignit (*brown coal*). Kemudian dengan adanya kompresi yang terus menerus serta kenaikan temperatur maka terbentuklah batubara subbituminus dan bituminus dengan tingkat kalori yang lebih tinggi dibandingkan dengan *brown coal*. Bumi tidak penah berhenti, oleh karena itu kompresi terus berlangsung diiringi bertambahnya temperatur sehingga *moisture* sangat sedikit serta unsur karbon yang banyak merubah batubara sebelumnya ke tingkat yang lebih tinggi yaitu antrasit yang merupakan kasta tertinggi pada batubara (Cook,1982). Proses pembentukan batubara diperlihatkan pada **Gambar 3.1.**



Gambar 3.1. Proses pembentukan batubara (Cook,1982)

3.2.1. Tempat terbentuknya batubara

Tempat terbentuknya batubara di kenal dua macam teori :

a. Teori insitu

Teori ini mengatakan bahwa bahan-bahan pembentuk lapisan batubara, terbentuknya di tempat dimana tumbuh-tumbuhan asal itu berada, dengan demikian maka setelah tumbuhan tersebut mati, belum mengalami proses transportasi segera tertutup oleh lapisan sedimen dan mengalami proses *coalification*. Jenis batu bara yang terbentuk dengan cara ini mempunyai penyebaran luas dan merata, kualitasnya lebih baik karena kadar abunya relative kecil, batu bara yang tebentuk seperti ini di Indonesia di dapatkan di lapangan batubara Muara Enim, Sumatra Selatan

b. Teori drift

Teori ini menyebutkan bahwa bahan-bahan pembentuk lapisan batubara terjadinya di tempat yang berbeda dengan tempat tumbuhan semula hidup dan berkembang, dengan demikian tubuhan yang telah mati di angkut oleh media air dan berakumulasi di suatu tempat kemudian mengalami proses *coalification.* Jenis batubara yang terbentuk dengan cara ini mempunyai penyebaran tidak luas, dibeberapa tempat, kualitas kurang baik karena banyak mengandung material pengotor yang terangkut bersama selama proses pengangkutan dari tempat asal tanaman ke tempat sedimentasi.

3.3. Kelas dan Jenis Batubara

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas dan waktu, batubara umumnya dibagi dalam lima kelas: antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit dan gambut.

a. Antrasit adalah kelas batubara tertinggi, dengan warna hitam berkilauan (*luster*) metalik, mengandung antara 86% - 98% unsur karbon (C) dengan kadar air kurang dari 8%.

b. Bituminus mengandung 68 - 86% unsur karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya. Kelas batubara yang paling banyak ditambang di Australia.

c. Sub-bituminus mengandung sedikit karbon dan banyak air, dan oleh karenanya menjadi sumber panas yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminus.

d. Lignit atau batubara coklat adalah batubara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya.

e. Gambut, berpori dan memiliki kadar air di atas 75% serta nilai kalori yang paling rendah, (Sari, 2009).

3.4. Klasifikasi Sumber Daya Batubara

Klasifikasi sumber daya batubara berdasarkan Standardisasi Nasional Indonesia diperlihatkan pada **Tabel 3.1.**

Tabel 3.1. Klasifikasi sumber daya dan cadangan batubara (SNI, 1998)

<table>
<tr><td>TAHAPAN EKSPLORASI
STATUS KAJIAN</td><td>Survey Tinjau
(Reconnaissance)</td><td>Prospeksi
(Prospecting)</td><td>Ekspl. Pendahuluan
(Preliminary Expl.)</td><td>Ekspl. Rinci
(Detailed Expl.)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Belum Layak</td><td colspan="4">SUMBER DAYA
(RESOURCES)</td></tr>
<tr><td>Hipotetik
(Hypotetical)</td><td>Tereka
(Inferred)</td><td>Terunjuk
(Indicated)</td><td>Terukur
(Measured)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Layak</td><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="2">CADANGAN TERKIRA
(PROBABLE RESERVES)</td></tr>
<tr><td></td><td>CADANGAN TERBUKTI
(PROVED RESERVES)</td></tr>
</table>

1. Sumber daya batubara hipotetik (*hypothetical coal resource*)

Sumber daya batubara hipotetik adalah batubara di daerah penyelidikan atau bagian dari daerah penyelidikan, yang dihitung berdasarkan data yang memenuhi syarat-syarat yang ditetapkan untuk tahap penyelidikan survei tinjau. Sejumlah kelas sumber daya yang belum ditemukan yang sama dengan cadangan batubara yg diharapkan mungkin ada di daerah atau wilayah batubara yang sama dibawah kondisi geologi atau perluasan dari sumberdaya batubara tereka. Pada umumnya, sumberdaya berada pada daerah dimana

titik-titik sampling dan pengukuran serat bukti untuk ketebalan dan keberadaan batubara diambil dari *distant outcrops*, pertambangan, lubang-lubang galian, serta sumur-sumur. Jika eksplorasi menyatakan bahwa kebenaran dari hipotesis sumberdaya dan mengungkapkan informasi yg cukup tentang kualitasnya, jumlah serta rank, maka mereka akan di klasifikasikan kembali sebagai sumber daya teridentifikasi (*identified resources*).

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

Sumber daya batubara tereka adalah jumlah batubara di daerah penyelidikan atau bagian dari daerah penyelidikan, yang dihitung berdasarkan data yang memenuhi syarat-syarat yang ditetapkan untuk tahap penyelidikan prospeksi.

Titik pengamatan mempunyai jarak yang cukup jauh sehingga penilaian dari sumber daya tidak dapat diandalkan. Daerah sumber daya ini ditentukan dari proyeksi ketebalan dan tanah penutup, rank, dan kualitas data dari titik pengukuran dan sampling berdasarkan bukti geologi dalam daerah antara 1,2 km – 4,8 km. termasuk antrasit dan bituminus dengan ketebalan 35 cm atau lebih, sub bituminus dengan ketebalan 75 cm atau lebih, lignit dengan ketebalan 150 cm atau lebih.

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

Sumber daya batubara tertunjuk adalah jumlah batubara di daerah penyelidikan atau bagian dari daerah penyelidikan, yang dihitung berdasarkan data yang memenuhi syarat-syarat yang ditetapkan untuk tahap eksplorasi pendahuluan.

Densitas dan kualitas titik pengamatan cukup untuk melakukan penafsiran secara relistik dari ketebalan, kualitas, kedalaman, dan jumlah insitu batubara dan dengan alasan

sumber daya yang ditafsir tidak akan mempunyai variasi yang cukup besar jika eksplorasi yang lebih detail dilakukan. Daerah sumber daya ini ditentukan dari proyeksi ketebalan dan tanah penutup, rank, dan kualitas data dari titik pengukuran dan sampling berdasarkan bukti gteologi dalam daerah antara 0,4 km – 1,2 km. termasuk antrasit dan bituminus dengan ketebalan 35 cm atau lebih, sib bituminus dengan ketebalan 75 cm atau lebih, lignit dengan ketebalan 150 cm.

4. Sumber daya batubara terukur (*measured coal resourced*)

Sumber daya batubara terukur adalah jumlah batubara di daerah peyelidikan atau bagian dari daerah penyelidikan, yang dihitung berdasarkan data yang memenuhi syarat–syarat yang ditetapkan untuk tahap eksplorasi rinci.

Densitas dan kualitas titik pengamatan cukup untuk diandalkan untuk melakukan penafsiran ketebalan batubara, kualitas, kedalaman, dan jumlah batubara insitu. Daerah sumber daya ini ditentukan dari proyeksi ketebalan dan tanah penutup, rank, dan kualitas data dari titik pengukuran dan sampling berdasarkan bukti geologi dalam radius 0,4 km. Termasuk antrasit dan bituminus dengan ketebalan 35 cm atau lebih, sub bituminus dengan ketebalan 75 cm atau lebih, lignit dengan ketebalan 150 cm**.**

Didalam menentukan jarak antar titik informasi atau bor, perlu dipahami terlebih dahulu mengenai kondisi geologi disuatu daerah penyelidikan. Kondisi geologi ini dapat dibagi menjadi tiga kelompok, Ketiga kelompok kondisi geologi ini dikelompokan berdasarkan parameter aspek adanya aktivitas tektonik/Struktur, serta aspek sedimentasi, diperlihatkan pada **Tabel 3.2**

- Kelompok dengan Kondisi Geologi Sederhana
- Kelompok dengan Kondisi Geologi Moderat
- Kelompok dengan Kondisi Geologi Komplek

Tabel 3.2. Pengelompokan kondisi geologi batubara

Kondisi Geologi	SEDERHANA	MODERAT	KOMPLEK
I.Aspek Sedimentasi			
1.Variasi Ketebalan	Sedikit Variasi	Bervariasi	Sangat Bervariasi
2.Kesinambungan	Ribuan Meter	Ratusan Meter	Puluhan Meter
3.Percabangan	Hampir Tidak Ada	Beberapa	Banyak
II.Aspek Tektonik			
1.Sesar	Hampir Tidak Ada	Jarang Terlipat Sedang	Rapat
2.Lipatan	Hampir Tidak Terlipat	Berpengaruh	Terlipat Kuat
3.Instrusi	Tidak Berpengaruh	Sedang	Sangat Berpengaruh
4.Kemiringan	Landai (Cerenti)		Terjal
III.Variasi Kualitas	Sedikit Bervariasi	Bervariasi	Sangat Bervariasi

Tingkat keyakinan geologi tersebut secara kuantitatif dicerminkan oleh jarak titik informasi (singkapan batuan dan lubang bor) dan toleransi kesalahan. Persyaratan jarak titik informasi untuk setiap kondisi geologi, diperlihatkan pada **Tabel 3.3.**

Tabel 3.3. Jarak titik informasi menurut kondisi geologi

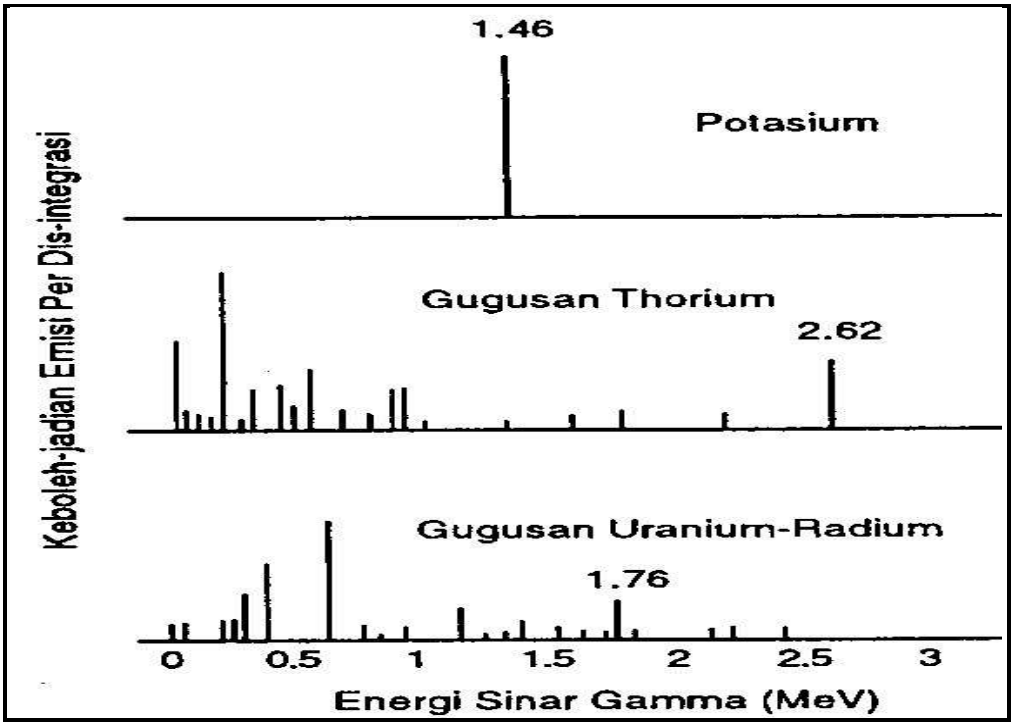
Kondisi Geologi	Kriteria	Sumberdaya Terukur	Sumberdaya Tertunjuk	Sumberdaya Tereka	Sumberdaya Hipotetik
Sederhana	Jarak ttk informasi	X < 300	300 <x< 500	500<x< 1000	Tidak terbatas
Moderat	Jarak ttk informasi	X < 200	200 <x< 300	300 <x< 800	Tidak terbatas
Komplek	Jarak ttk informasi	X < 100	100 <x< 200	200 <x< 400	Tidak terbatas

3.5. Logging Geofisika

Logging merupakan metode pengukuran besaran-besaran fisik batuan terhadap kedalaman lubang bor. Sesuai dengan tujuan logging yaitu menentukan besaran-besaran fisik batuan maka dasar dari logging itu sendiri adalah sifat-sifat fisik atau petrofisik dari batuan. (Harsono, 1997)

3.5.1. Log *gamma ray*

Prinsip dari log gamma ray (GR) adalah perekaman radioaktivitas alami bumi. Radioaktivitas GR berasal dari 3 unsur radioaktif yang ada dalam batuan yaitu Uranium -U, Thorium -Th dan Potasium -K, yang secara kontinu mamancarkan GR dalam bentuk pulsa-pulsa energi radiasi tinggi Sinar Gamma ini mampu menembus batuan dan dideteksi oleh sensor sinar gamma yang umumnya berupa detector sintilasi. Setiap GR yang terdeteksi akan menimbulkan pulsa listrik pada detektor. Parameter yang direkam adalah jumlah dari pulsa yang tercatat per satuan waktu (Adi harsono 1997). Pada **Gambar 3.2** terdapat tiga unsur utama yang umumnya ditemukan dibawah permukaan, masing-masing unsur mempunyai tingkat tenaga yang berbeda. Alat *gamma ray* standar akan mengukur total aktifitas dari ketiga unsur tersebut, yanga dapat di pisahkan melalui *gamma ray spektroskopi*.



Gambar 3.2. Usur radiasi utama gamma ray (Harsono , 1997)

3.5.2. Penggunaan log gamma ray.

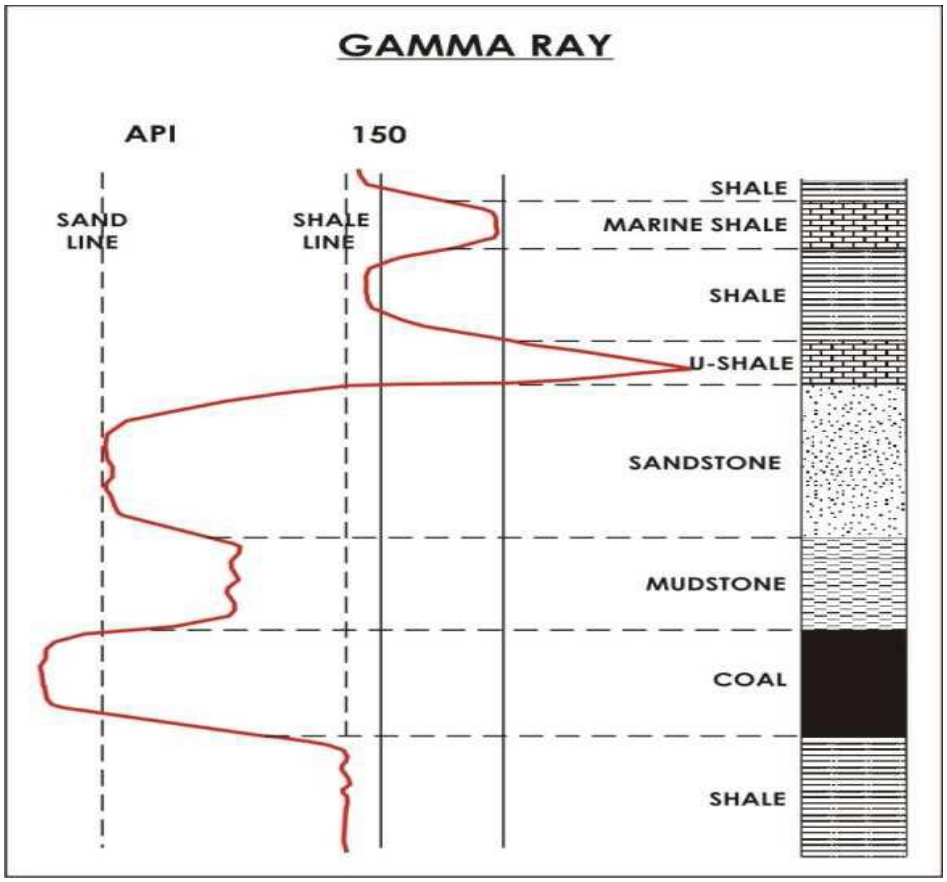
Karena Uranium, Thorium dan Potasium terkonsentrasi secara besar didalam mineral lempung maka log GR digunakan secara luas dalam interpretasi batuan pasir dan lempung. Prinsipnya adalah interpolasi linier dari pembacaan antara pasir dan serpih. Akan tetapi log GR bukanlah merupakan indikator lempung atau serpih yang selalu tepat, sehingga indikator-indikator serpih lain juga perlu diperhatikan. Secara khusus log GR berguna untuk definisi lapisan permeabel disaat log *self potensial* (SP) tidak berfungsi karena formasi yang sangat resistif atau bila kurva SP kehilangan karakternya (Rm f = Rte), atau juga ketika SP tidak dapat direkam karena lumpur yang digunakan tidak konduktif (*oil base mud*). Log GR dapat digunakan untuk

mendeteksi dan evaluasi terhadap mineral-mineral radioaktif, seperti biji potasium atau uranium. Log GR juga dapat digunakan untuk mendeteksi mineral-mineral yang tidak radioaktif, termasuk lapisan batubara. Log GR digunakan secara luas untuk korelasi pada sumur-sumur. Korelasi dari sumur ke sumur sering dilakukan dengan menggunakan log GR, dimana sejumlah tanda-tanda perubahan litologi hanya terlihat pada log GR.

Ringkasan dari kegunaan Log GR

1. Evaluasi kandungan serpih Vsh.
2. Menentukan lapisan permeabel.
3. Evaluasi biji mineral yang radioaktif.

Dalam eksplorasi batubara, untuk penafsiran lithologi dengan menggunakan log *gamma ray*, BPB (1981) membuat sebuah model *sand base line* yang dapat dilihat pada **Gambar 3.3**. langkah awal dalam penafsirannya adalah dengan membuat *sand base line* dan *shale base line* untuk membantu dalam menginterpretasikan batuan pengapit dari *seam* yang dianalisa. *Sand base line* adalah garis lurus yang ditarik pada log *gamma ray* yang menunjukkan batas penginterpretasian lithologi pasir. Sedangkan *shale base line* adalah garis lurus yang ditarik pada log *gamma ray* yang digunakan sebagai batas penarikan lithologi lempung.



Gambar 3.3. Penentuan penarikan *Sand Base Line* dan *Shale Base Line* (BPB, 1981 dalam eksplorasi batubara oleh Kuncoro, 1996)

Lithologi batupasir menunjukkan pola *gamma ray* yang cenderung lurus, bernilai kecil, yang berada atau lebih kecil dari *sand base line* begitu pula lapisan batubara memiliki pola *gamma ray* yang lebih kecil dibandingkan dengan batupasir. Batulumpur menunjukkan pola *gamma ray* yang relatif lurus, bernilai besar, yang berada di sekitar atau lebih besar dari *shale base line*. Batu lumpur adalah batuan yang tidak dapat di interpretasikan secara pasti apakah memiliki ukuran butir lanau atau lempung dimana pola lognya berada diantara *sand base line* dan *shale base line*.

Nilai ekstrim curam dan besar yang ditunjukkan oleh pola *gamma ray* menunjukkan lithologi yang sangat halus atau *marine shale.*

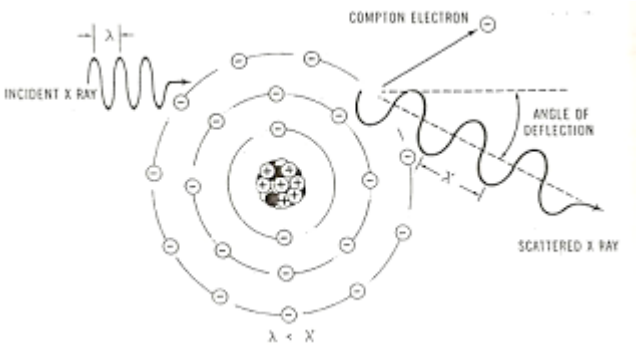
3.5.3. Log densitas

Menurut teori Fisika Nuklir, bila sinar gamma dengan tenaga tinggi ditembakkan ke formasi ada 3 macam interaksi yang mungkin terjadi yaitu:

1. Hamburan Compton, bila 75 keV< E<2 MeV,
2. Gejala Foto-listrik, bila E < 100 keV,
3. Produksi kembar, bila E > 1.2 MeV

1.Hamburan *Compton*

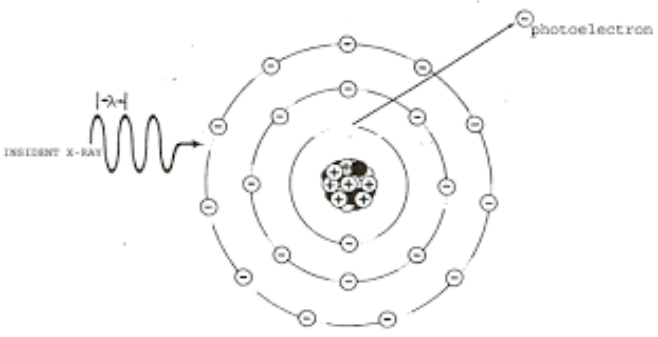
Peristiwa terjadinya tumbukan antara foton dan elektron dalam suatu atom yang mengakibatkan sebagian energi foton menjadi energi gerak elektron dan sebagian energi hamburan foton disebut efek *Compton*. Bila energi foton cukup besar, efek *Compton* dapat terjadi pada elektron orbital yang energi ikatnya dapat diabaikan. Selanjutnya, seperti diperlihatkan pada **Gambar 3.4**, elektron dianggap sebagai elektron bebas, energi dan momentumnya sama besar sebelum dan sesudah bertumbukan. Dalam hal ini terjadi tumbukan elastis sempurna antara foton dan elektron. Koefisien atenuasi pada efek Compton ialah jumlah dari perbandingan energi gerak elektron *antibonding* dan perbandingan energi hamburan foton. Koefisien atenuasi pada efek Compton sebanding dengan nomor atom materi.



Gambar 3.4. Efek Compton (Bushong, 2001)

2.Gejala Foto-listrik

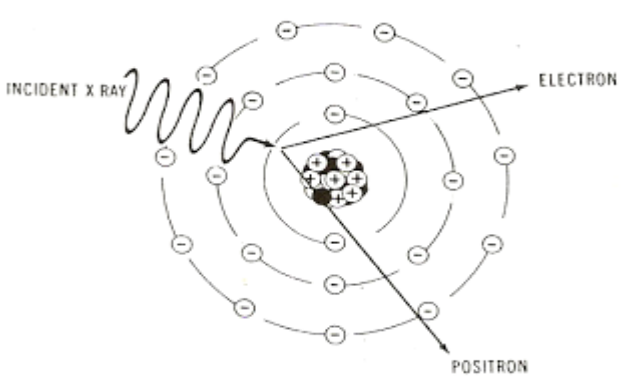
Peristiwa terlepasnya elektron orbital suatu atom karena interaksi dengan radiasi gamma dinamakan efek fotolistrik. Elektron yang dilepaskan pada peristiwa tersebut disebut fotoelektron, dan energi geraknya adalah selisih antara energi ionisasi elektron orbital dan energi radiasi gamma. Pada saat energi radiasi gamma kecil, kebanyakan fotoelektron terlepas dengan arah tegak lurus pada arah radiasi, tetapi bila energinya besar maka fotoelektron terpancar ke arah depan dalam jumlah yang banyak (**Gambar 3.5.**). Secara teori, semakin besar ikatan antara elektron dan inti atom maka semakin besar persentase terjadinya efek fotolistrik; untuk elektron pada kulit K akan terjadi efek fotolistrik sebesar kira-kira 80%.



Gambar 3.5. Efek Foto Listrik (Bushong, 2001)

3.Produksi kembar

Pada waktu foton yang berenergi lebih dari 1,2 MeV menembus materi dan mendekati inti atom, karena pengaruh medan listrik yang kuat dari inti atom, foton berubah dan membentuk satu pasangan yaitu positron dan elektron yang masing-masing berenergi sebesar 0,51 MeV. Peristiwa ini disebut produksi pasangan dapat dilihat pada **Gambar 3.6.** Energi sebesar 1,2 MeV ini disebut nilai batas ambang produksi pasangan. Jumlah koefisien atenuasi radiasi gamma pada produksi pasangan makin bertambah bersamaan dengan bertambahnya energi foton, di sisi lain juga sebanding dengan Z (Z+1) dari materi. Jumlah koefisien atenuasi efek fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan disebut koefisien atenuasi linear.



Gambar 3.6. Produksi Pasangan (Bushong, 2001)

Prinsip kerja density log adalah dengan jalan memancarkan sinar gamma dari sumber radiasi sinar gamma yang diletakkan pada dinding lubang bor. Pada saat sinar gamma menembus batuan, sinar tersebut akan bertumbukkan dengan elektron pada batuan tersebut, yang mengakibatkan sinar gamma akan kehilangan sebagian dari energinya dan yang sebagian lagi akan dipantulkan kembali, yang kemudian akan ditangkap oleh detektor yang diletakkan diatas sumber radiasi. Intensitas sinar gamma yang dipantulkan tergantung dari densitas batuan formasi. Berkurangnya energi sinar gamma tersebut sesuai dengan persamaan:

$$\ln \frac{N_o}{N_t} = \rho \times k \times S \qquad \text{...} \ (3.1)$$

dimana:

N_o = intensitas sumber energi

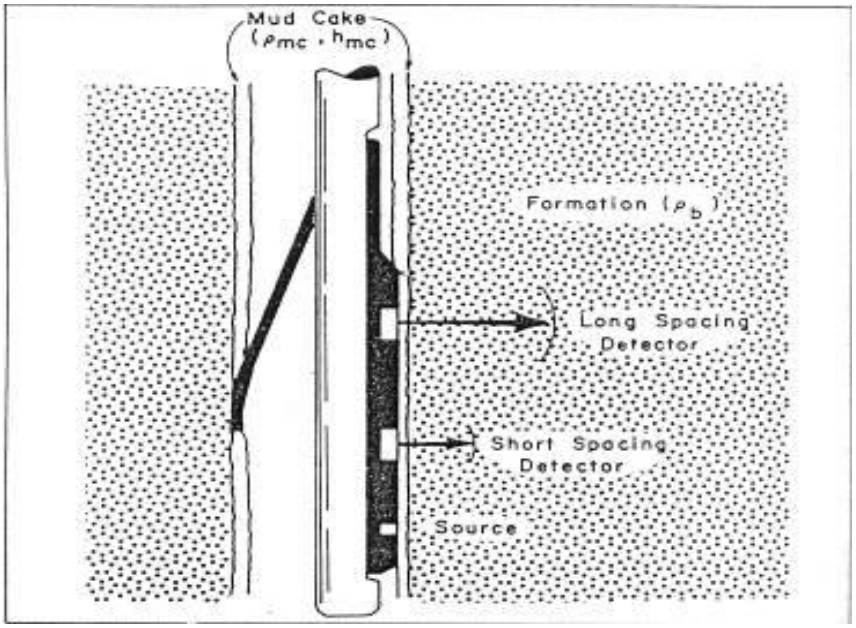
N_t = intensitas sinar gamma yang ditangkap detektor

ρ = densitas batuam formasi

k = konstanta

S = jarak yang ditembus sinar gamma

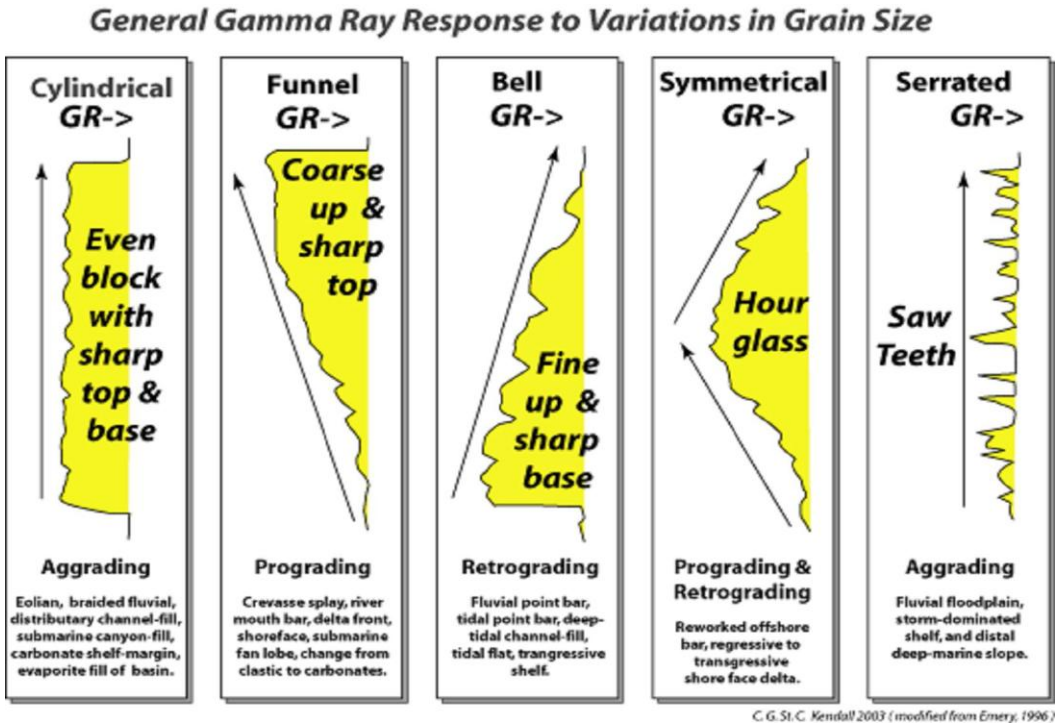
Kerangka rangkaiaan dasar well logging terlihat pada **Gambar 3.7**. Pada alat *formation density probe* (FDG) terdapat detektor *gamma ray* dan *desnsity*, untuk detektor *density* mempunyai dua dektektor yaitu *Long density* dan *short density*. Sinar gamma yang menyebar dan mencapai detektor dihitung dan akan menunjukkan besarnya densitas batuan formasi. Formasi dengan densitas tinggi akan menghasilkan jumlah elektron yang rendah pada detektor. Densitas elektron merupakan hal yang penting disini, hal ini disebabkan yang diukur adalah densitas elektron, yaitu jumlah elektron per cm^3. Densitas elektron akan berhubungan dengan densitas batuan sebenarnya, ρ_b yang besarnya tergantung pada densitas matrik, porositas dan densitas fluida yang mengisi pori-porinya. Kondisi penggunaan untuk density log adalah pada formasi dengan densitas rendah dimana tidak ada pembatasan penggunaan lumpur bor tetapi tidak dapat digunakan pada lubang bor yang sudah di casing. Kurva density log hanya terpengaruh sedikit oleh salinitas maupun ukuran lubang bor.



Gambar 3.7. Skema Rangkaian Dasar Density Log
(*Dewan, T.J.:"Essential of Modern Open-Hole Log Interpretation", Pennwell Publishing Company, Tulsa-Oklahoma, USA, 1983*)

3.6. Pola-Pola Log (*Log Pattern*)

Salah satu metode yang digunakan untuk menafsirkan lingkungan pengendapan dengan menggunakan data logging geofisika. Log merupakan data informasi mengenai batuan yang diakuisisi secara insitu sehingga log dapat digunakan sebagai acuan dalam korelasi geologi dan identifikasi lithologi. Biasanya digunakan kombinasi antara log *SP*, log *gamma ray* dan log *resistivity* dalam menentukan jenis lithologi dan korelasinya. Dari data log tersebut dapat dikenali beberapa bentuk dasar yang berkaitan atau bahkan merupakan karakteristik dari suatu lingkungan pengendapannya. Bentuk-bentuk dasar tersebut adalah *cilyndrical, irregular, bell shape, funnel shape, symmetrical,* dan *asymmetrical* (O.Serra, 1989). Bentuk-bentuk log diatas dapat dilihat pada **Gambar 3.8.**



Gambar 3.8. Bentuk-bentuk dasar log dalam penentuan fasies (Serra, 1989)

Cylindrical

Merupakan bentuk yang cenderung diminati oleh *geologist* karena bentuk ini dianggap sebagai bentuk dasar yang menginterpretasikan homogenitas. Bentuk ini diasosiasikan dengan endapan sedimen *braided channel, estuarine,* atau *sub-marine channel fill, anastomosed channel, eolian dune, tidal sands.* Gambaran dan interpretasi berskala makro yang menyatakan homogen dan ideal ini dapat mengalami perubahan dengan diterapkannya analisis berskala mikro.

Irregular (serrated)

Meskipun bentuk *irregular* ini kurang disukai, namun dilain pihak bentuk ini cenderung terlalu mudah untuk dianggap sebagai interpretasi awal yang menyesatkan. Bentuk ini dianggap sebagai bentuk dasar untuk merepresentasikan heterogenitas batuan reservoir. Bentuk ini diasosiasikan dengan endapan sedimen *alluvial plain, flood plain, tidal sands, shelf,* atau *back barriers*. Umumnya mengindikasikan lapisan tipis silang siur. Unsur endapan tipis mungkin berupa *crevasse splay, over bank deposit* dalam laguna, turbidit dalam lingkungan air dalam, atau lapisan-lapisan yang teracak. Lapisan-lapisan ini dari gambaran dan interpretasi makro cenderung dikategorikan ke dalam zona tidak produktif.

Dengan diintegrasikannya analisis berskala mikro dan pemahaman mengenai kualitas reservoir, terbukti bahwa lapisan-lapisan yang semula dianggap tidak prospek dan tidak produktif berubah statusnya menjadi lapisan yang prospek dan produktif.

Bell-shaped

Bentuk *bell* ini selalu diasosiasikan sebagai *finning upward*. Interpretasi *finning upward* sering diartikan sebagai heterogenitas batuan reservoir. Bentuk *bell* dihasilkan oleh endapan *point bars, tidal deposits, transgressive shelf sand* (*tide and storm dominated*), *submarine channel* dan endapan turbidit.

Funnel-shape

Bentuk *funnel* merupakan kebalikan dari bentuk bell dengan dampak ketidaksesuaian batas geologi dan urutan stratigrafinya, dan selalu diasosiasikan sebagai *coarsening upward*. Bentuk *funnel* merupakan hasil dari delta *front* (*distributary mouth bar*), *crevasse splay, beach* and *barrier* (*barrier island*), *strandplain, shoreface, prograding* (*shalow marine*) *shelf sands, submarine fan lobes.*

Symmetrical-asymmetrical shaped

Bentuk *symmetrical* ini merupakan keserasian kombinasi bentuk *bellfunnel*. Kombinasi *coarsening upward-finning upward* ini dapat dihasilkan oleh proses bioturbasi, selain *setting* secara geologi yang merupakan cirri dari *shelf sand bodies, submarine fans and sandy offshore bars*. Bentuk *asymmetrical* merupakan ketidakselarasan secara proporsional dari kombinasi *bell-funnel* pada lingkungan pengendapan yang sama.

3.7. Korelasi

Korelasi merupakan langkah penentuan unit stratigrafi dan struktur yang mempunyai persamaan waktu, umur dan posisi stratigrafi. Korelasi digunakan untuk keperluan pembuatan penampang dan peta bawah permukaan untuk kemudian dilakukan evaluasi formasi, penentuan zona produktif atau ada tidaknya perubahan secara lateral dari masing-masing perlapisan. Dalam pelaksanaannya, korelasi melibatkan aspek seni dan ilmu, yaitu memadukan persamaan pola dan prinsip geologi, termasuk dalam proses dan lingkungan pengendapannya, pembacaan dan analisis *log*, dasar teknik reservoar serta analisis kualitatif dan kuantitatif. Data yang dipakai dalam korelasi umumnya adalah integrasi data *core*, data *wireline log* dan data *seismik*.

3.7.1. Metode korelasi menurut Koesoemadinata (1971)

1. Metode Organik

Metode korelasi organik merupakan pekerjaan menghubungkan satuan-satuan stratigrafi berdasarkan kandungan fosil dalam batuan (biasanya *foraminifera planktonik*). Yang biasa digunakan sebagai marker dalam korelasi organik adalah asal munculnya suatu spesies dan punahnya *spesies* lain. Zona puncak suatu *spesies*, fosil indek, kesamaan derajat evolusi dan lain-lain.

2. Metode Anorganik

Pada metode korelasi anorganik penghubungan satuan-satuan stratigrafi tidak didasarkan pada kandungan oganismenya (data organik).

Beberapa data yang biasa dipakai sebagai dasar korelasi antara lain:

a. *Key Bed* (lapisan penunjuk) Lapisan ini menunjukkan suatu penyebaran lateral yang luas, yang mudah dikenal baik dari data singkapan, serbuk bor, inti pemboran ataupun data log mekanik. Penyebaran vertikalnya dapat tipis ataupun tebal. Lapisan yang dapat dijadikan sebagai *key bed* antara lain: abu vulkanik, lapisan tipis batugamping terumbu, lapisan tipis serpih (*shale break*), lapisan batubara/lignit.

b. Horison dengan karakteristik tertentu karena perubahan kimiawi pada massa air akibat perubahan pada sirkulasi air samudra seperti zona-zona mineral tertentu, zona kimia tertentu, suatu *kick* dalam kurva resistivitas yang khusus dari suatu lapisan yang tipis.

c. Korelasi dengan cara meneruskan bidang refleksi pada penampang seismik.

d. Korelasi atas dasar persamaan posisi stratigrafi batuan.

e. Korelasi atas dasar aspek fisik/litologi. Metode korelasi ini merupakan metode yang sangat kasar dan hanya akurat diterapkan pada korelasi jarak pendek.

f. Korelasi atas dasar horison siluman *(panthom horizon).*

g. Korelasi atas dasar *maximum flooding surface*, *maximum flooding surface* merupakan suatu permukaan lapisan yang lebih tua dari lapisan yang lebih muda yang menunjukkan adanya peningkatan kedalaman air secara tiba-tiba.

.

3.7.2. Prosedur korelasi

Langkah-langkah korelasi dengan *log* mekanik adalah sebagai berikut :

a. Menentukan horison korelasi dengan cara membandingkan *log* mekanik dari suatu sumur tertentu terhadap sumur yang lain dan mencari bentuk-bentuk atau pola-pola *log* yang sama atau hampir sama.

b. Setelah bentuk atau pola *log* yang relatif sama didapatkan dan telah dinyakini pula bahwa bentuk dan pola tersebut mewakili perlapisan yang sama, selanjutnya dilakukan pekerjaan menghubungkan bentuk-bentuk kurva yang sama atau hampir sama dari bagian atas kearah bawah secara kontinyu. Korelasi secara *top down* dihentikan jika korelasi tidak bisa dilakukan lagi, kemudian korelasi dilakukan secara *bottom up*. Adanya zona-zona yang tidak bisa dikorelasikan dapat ditafsirkan kena pengaruh struktur (patahan, ketidakselarasan) atau stratigrafi (pembajian, *channel fill*, pemancungan, perubahan fasies).

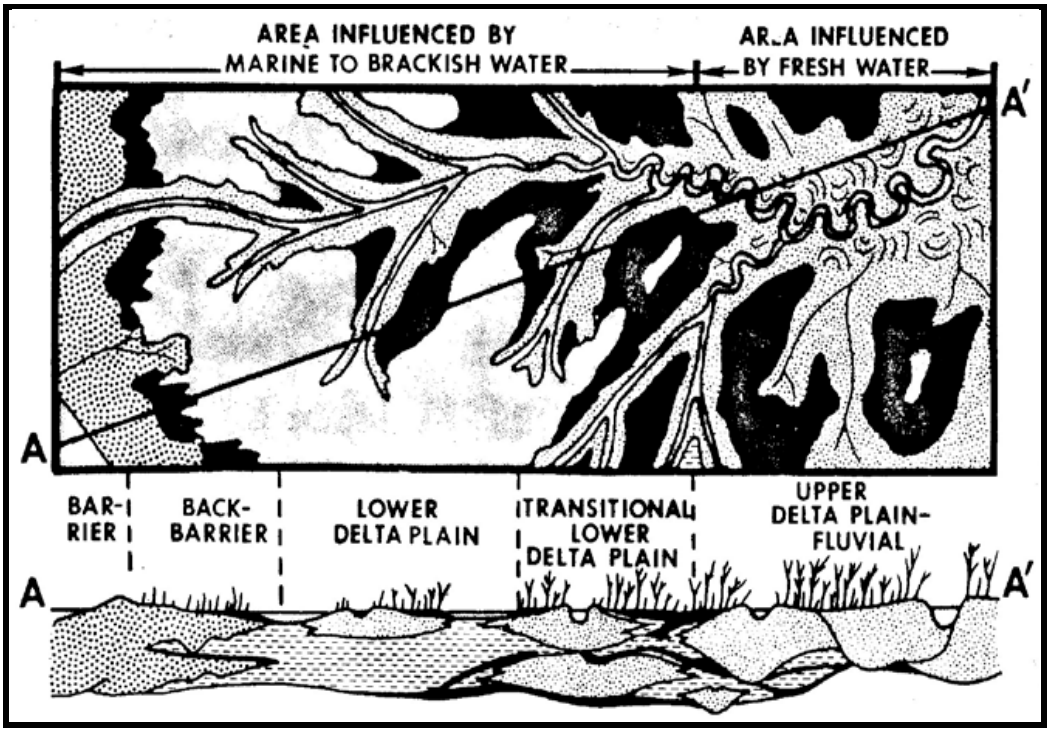
c. Setelah korelasi selesai dilakukan akan didapatkan penampang melintang, baik penampang struktur maupun penampang stratigrafi. Dalam pembuatan penampang struktur datum diletakkan pada kondisi seperti pada keadaan saat ini (biasanya *sea level* sebagai datum).

3.8. Lingkungan Pengendapan dan Fasies Batubara

Batubara merupakan hasil dari akumulasi tumbuh-tumbuhan pada kondisi lingkungan pengendapan tertentu. Akumulasi tersebut telah dikenai pengaruh-pengaruh *synsedimentary* dan *post-sedimentary*. Akibat pengaruh-pengaruh tersebut dihasilkanlah batubara dengan tingkat (*rank)* dan kerumitan struktur yang bervariasi.

Lingkungan pengendapan batubara dapat mengontrol penyebaran lateral, ketebalan, komposisi, dan kualitas batubara. Untuk pembentukan suatu endapan yag berarti diperlukan suatu susunan pengendapan dimana terjadi produktifitas organik tinggi dan penimbunan secara perlahan-lahan namun terus menerus terjadi dalam kondisi reduksi tinggi dimana terdapat sirukulasi air yang cepat sehingga oksigen tidak ada dan zat organik dapat terawetkan. Kondisi demikian dapat terjadi diantaranya di lingkungan paralik (pantai) dan limnik (rawa-rawa).

Menurut Horne (1979) mengemukakan terdapat 5 lingkungan pengendapan utama pembentuk batubara (**Gambar 3.9**) yaitu *upper delta plain, transional, lower delta plain, backbarrier dan barrier.* Tiap lingkungan pengendapan mempunyai asosiasi dan menghasilkan karakter batubara yang berbeda.



Gambar 3.9. Model lingkungan pengendapan batubara di lingkungan delta (J.CHorne et. Al., 1979 ; modifikasi dari Ferm, 1976)

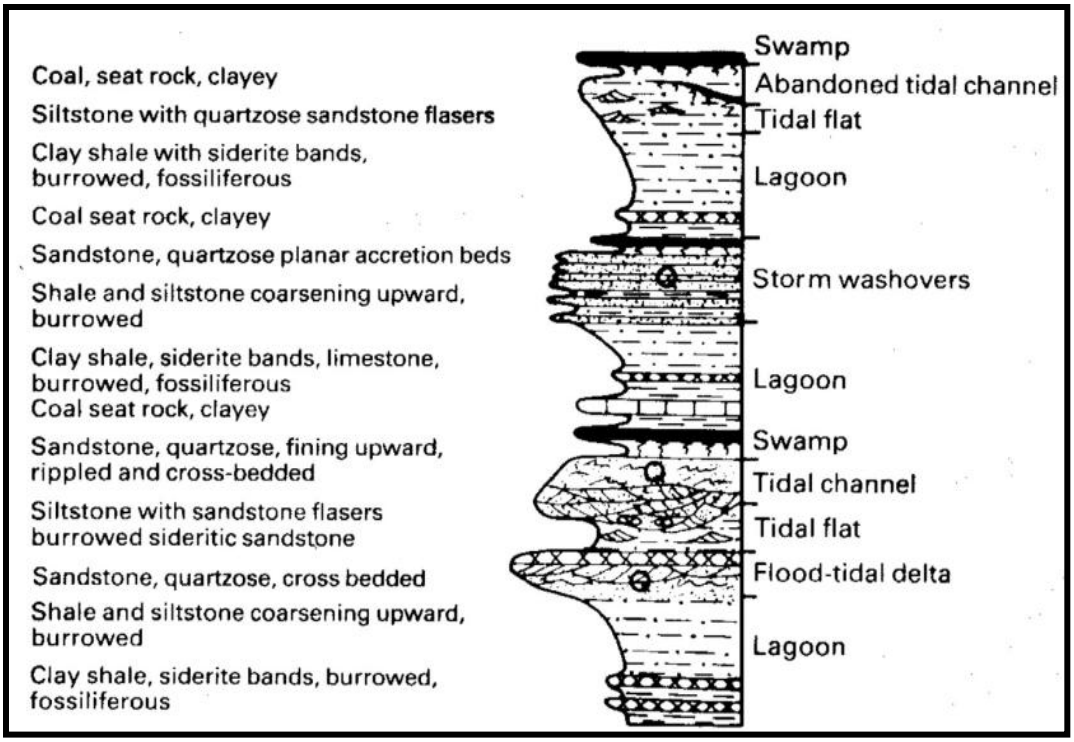
a. Lingkungan pengendapan *barrier*

Ke arah laut batupasir butirannya semakin halus dan berselang seling dengan serpih gampingan merah kecoklatan sampai hijau. Batuan karbonat dengan fauna laut ke arah darat bergradasi menjadi serpih berwarna abu-abu gelap sampai hijau tua yang mengandung fauna air payau. Batupasir pada lingkungan ini lebih bersih dan sortasi lebih baik karena pengaruh gelombang dan pasang surut.

b. Lingkungan pengendapan *back-barrier*

Lingkungan *barrier* mempunyai peranan penting yaitu menutup pengaruh oksidasi dari air laut dan mendukung pembentukan gambut di bagian dataran, kriteria utama lingkungan *barrier* adalah hubungan lateral dan vertikal dari struktur sedimen dan pengenalan tekstur batupasirnya, ke arah laut, butirannya menjadi halus dan berselang seling dengan serpih gampingan merah kecoklatan sampai hijau, batuankarbonat dengan fauna laut ke arah darat membentuk gradasi menjadi serpih berwarna abu-abu gelap sampai hijau tua yang mengandung fauna air payau, akibat pengaruh gelombang dan pasang surut, sehingga batupasir di lingkungan *barrier* lebih bersih dan sortasi yang lebih baik daripada lingkungan sekelilingnya meskipun memiliki sumber yang sama, penampanglingkungan pengendapan pada bagian Back Barier dapat dilihat pada **Gambar 3.10.**

Batubara yang terbentuk cenderung menunjukkan bentuk memanjang,berorientasi sejajar dengan arah orientasi dari penghalang dan sering juga sejajar dengan pengendapan. Bentuk perlapisan batubara yang dihasilkan mungkin berubah sebagian oleh aktivitas *tidal channel* pada *post depositional* atau bersamaan dengan proses sedimentasi



Gambar 3.10. Penampang lingkungan pengendapan pada bagian *back barrier* (*Horne*,1978)

c. Lingkungan pengendapan *lower delta plain*

Lower deltaplain: tipis, sebaran sepanjang *channel* atau jurus pengendapan, ditandai hadirnya *splitting* oleh endapan *crevasse splay* dan kandungan sulfur agak tinggi. Litologinya didominasi oleh urutan serpih dan batulanau yang mengkasar kearah atas, ketebalannya berkisar antara 15-55m dengan pelamparan lateral.

Pada bagian bawah dari teluk tersusun atas lempung-serpih abu-abu gelap sampai hitam yang merupakan litologi dominan, kadang-kadang terdapat batugamping dan *mudstone siderite* yang sebarannya tidak teratur, pada bagian atas sikuen ini terdapat batupasir *ripples* dan struktur lain yang ada hubungannya dengan arus, hal ini

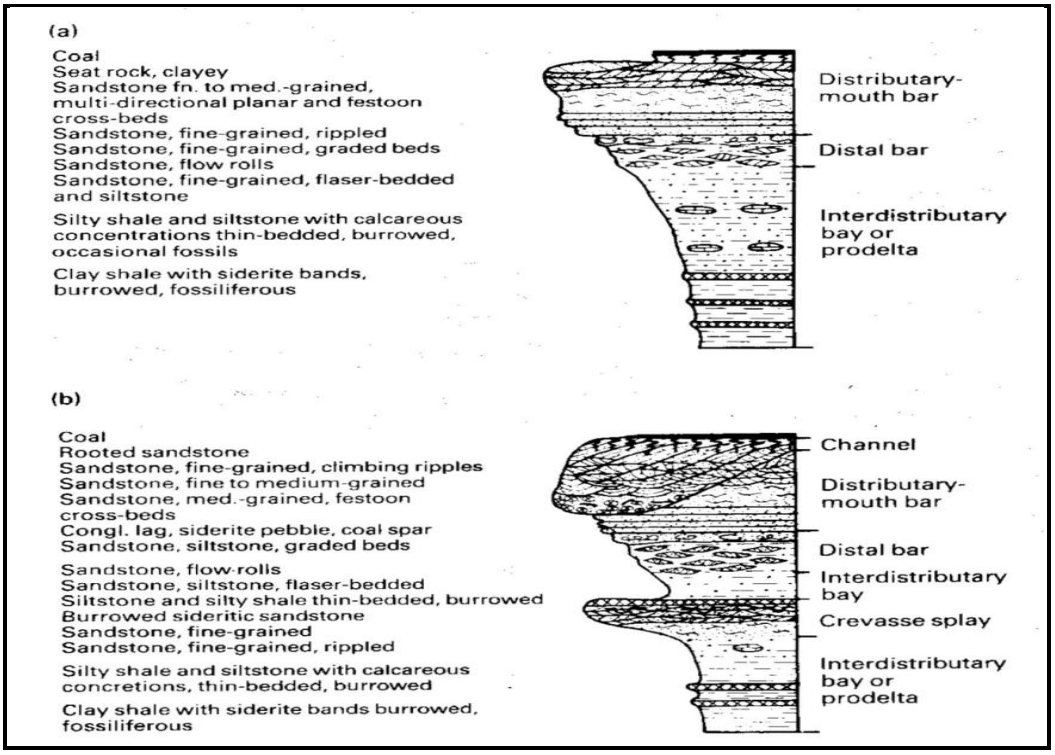
menunjukkan adanya penambahan energi padaperairan dangkal ketika teluk terisi endapan.

Umumnya endapan teluk terisi mengandung fosil air laut atau air payau danstruktur *Burrow* fosil-fosil ini biasanya melimpah pada bagian bawah serpihlempung, tetapi mungkin juga muncul pada seluruh sikuen.

Endapan *distributary mouth bar* dicirikan oleh adanya batupasir yang memiliki dasar yang lebih lebar dan memiliki kontak gradasi pada bagian bawah dan adanya kontak lateral yang cenderung mengkasar ke atas dan mengarah pada bagian tengah serta berkembangnya struktur *ripples* dan *flow rolls,* sekuen vertikal endapan lower delta plain, sekuen mengkasar keatas dapat dilihat pada **Gambar 3.11.(a)**

Endapan *Creavasse Splay*, karakteristik endapan ini adalah mini delta yang mengkasar keatas, butirannya semakin menghalus jika menjauhi tanggul, bergradasi kearah lateral, tersusun atas batupasir dengan struktur *burrowed siderite* dan *ripples*, endapan ini memiliki ketebalan lebih dari 12m dengan pelamparan horizontal berkisar dari 30m sampai 8km, sekuen vertikal endapan *lower delta plain* sikuen yang sama di potong oleh *Creavasse Splay* deposit. **Gambar 3.11.(b)**

Rawa-rawa di dalam sungai yang mendominasi pada lower delta plain berkembang di atas tanggul-tanggul *(levees*) sepanjang distribusi *cahnnel*, endapan ini pada umumnya lurus dan tegak lurus dengan jurus pengendapan. Lapisan batubara yang di hasilkan relative tipis dan terbelah membentuk split oleh sejumlah endapan *creavvase splay* dan cenderung menerus sepanjang juruskemiringan pengendapan, tetapi sering juga tidak menerus sejajar dengan juruspengendapan batubara di gantikan oleh material *bay fill*



Gambar 3.11. Penampang lingkungan pengendapan pada bagian *lower delta plain* (*Horne*,1978)

d. Lingkungan Pengendapan *upper delta plain-fluvial*

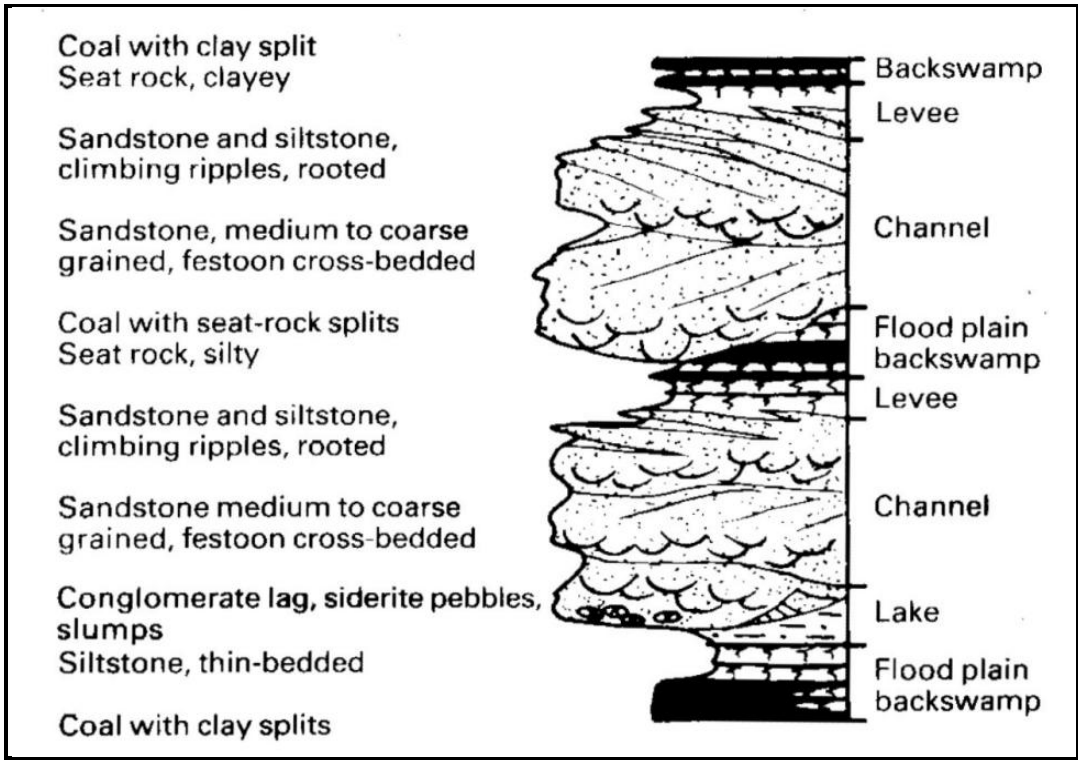
Upper delta plain-fluvial: tebal dapat mencapai lebihdari 10 meter, sebaranluas cenderung memanjang sejajar jurus pengendapan, kemenerusan lapisan lateralsering terpotong channel, di tandai *splitting* akibat channel kontemporer dan *washout* oleh channel subsekuen dan kandungan sulfur rendah.

Endapannya didominasi oleh bentuk linier, tubuh pasir lentikuler, pada tubuhpasir dapat gerusan pada bagian bawahnya, permukaan terpotong tajam, tetapi secara lateral pada bagian atas bagian batupasir ini melidah dengan serpih abu-abu,batulanau dan lapisan batubara. Diatas bidang gerusan terdapat kerikil lepas dan hancuran

batubara yang melimpah pada bagian bawah, semakin ke atas butiran semakin menghalus pada batupasir. Sifat khas tersebut menunjukkan energi yang besar pada *channel* pada sekitar rawa kecil dan danau-danau, dari bentuk batupasirdan pertumbuhan lapisan point bar menunjukkan bahwa hal ini dikontrol oleh meandering.

Sikuen endapan *backswap* dari atas ke bawah terdiri dari *seat earth*, batubara, dengan serpih dengan fosil tanaman yang melimpah dan jarang pelecupoda air tawar, batubara secara lateral menebal dan akhirnya bergabung dengan tubuh utama batupasir, batupasirnya tipis (1,5-4,5m), berbutir halus, mengkasar ke atas, sikuentipe ini merupakan endapan pada tubuh air terbuka, mungkin rawa dangkal atau danau. Penampang lingkungan pengendapan bagian *Upper Delta Plain* dapat dilihat pada (**Gambar 3.12**).

Lapisan batubara pada endapan *upper delta plain* cukup tebal (lebih dari10m), tetapi secara lateral tidak menerus, lapisan pembentuk endapan fluvial plain cenderung lebih tipis dibandingkan dengan endapan *lower delta plain*, lapisan batubara cenderung sejajar dengan kemiringan pengendapan, tetapi sedikit yangmenerus dibandingkan dengan fasies *lower delta plain* , karena bagian yang teratur sedikit jumlahnya yang mengikuti *channel* sungai maka lapisan-lapisannya sangat tebal dengan jarak yang relatif pendek dengan sejumlah split yang berkembang dan dalam hubungannya dengan endapan tanggul yang kontemporer.



Gambar 3.12. Penampang lingkungan pengendapan pada bagian *upper delta plain-fluvial* (*Horne*,1978)

e. Lingkungan pengendapan *transitional lower delta plain*

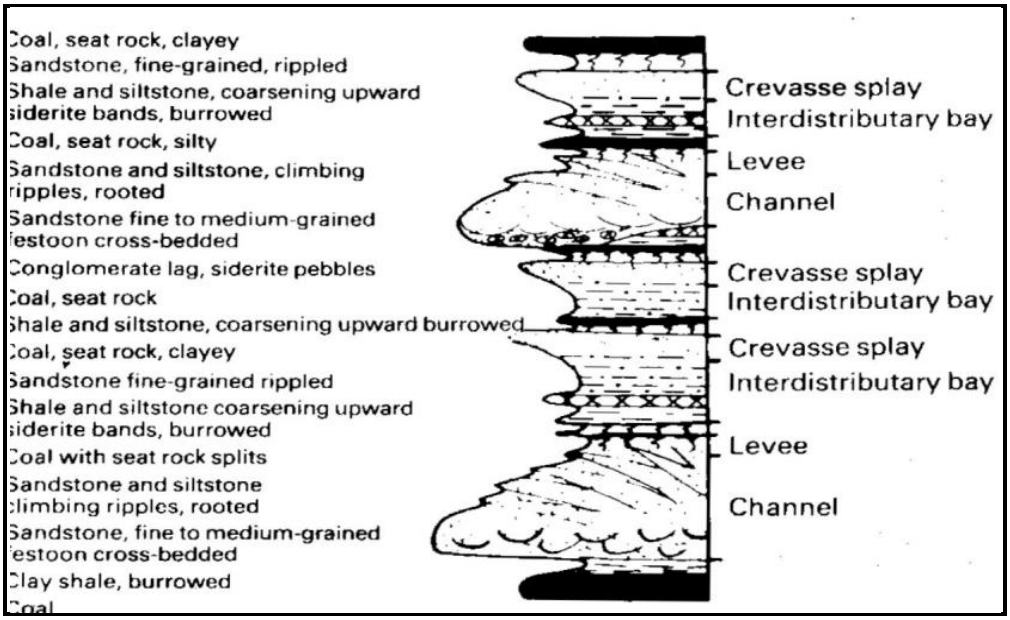
Transisional Lower Delta Plain: Tebal dapat lebih dari 10m, sebaran luas cenderung memanjang sejajar jurus pengendapan, kemenerusan lateral sering terpotong channel, di tandai splitting akibat adanya *Channel kontemporer* dan *Washout* oleh *Channel subsekuen* dan kandungan sulfur agak rendah. Zona di antara *lower dan upper delta plain* di tandai zona transisi yang mengandung karakteristik litofasies keduanya.

Sikuen Bay Fill tidaklah sama dengan sikuen litologi yang berbutir halus, lebih tipis (1,5-7,5m) dari *lower delta plain* . Namun sikuen Bay Fill tidaklah sama dengan

sikuen *upper delta* , zona ini mengandung fauna air payau yang menunjukkan kenampakan migrasi lateral lapisan *point bar accretion* menjadi *upper delta plain*, channel pada transisi delta plain ini berbutir halus dari upper delta plain, Penampang lingkungan pengendapan pada bagian *transitional lower delta plain* dapat dilihat pada **Gambar 3.13**.

Lapisan batubara pada umumnya tersebar meluas dengan kecenderungan agak memanjang sejajar dengan jurus pengendapan. Seperti pada batubara *upper delta plain,* batubara di transisi ini berkembang split di daerah *channel kontempore r*dan oleh *washout* yang di sebabkan oleh aktivitas *channel subsekuen.*

Lapisan batubara pada daerah *transitional lower delta plain* terbentuk pada daerah transisi antara *upper delta plain* dan *lower delta plain* dan merupakan yang paling tebal dan penyebarannya juga paling luas karena perkembangan rawa yang ekstensif pada pengisian yang hampir lengkap dari teluk yang interdistribusi.



Gambar 3.13. Penampang lingkungan pengendapan pada bagian *transitional lower delta plain* (*Horne*,1978)