

BAB II

TEORI DASAR

2.1. Proses Sedimentasi Transisi

Lingkungan pengendapan transisi (peralihan) merupakan lingkungan pengendapan yang berada pada batas antara pengendapan *continental* (darat) atau *marine* (laut). Lingkungan ini sedimentasinya dipengaruhi oleh aliran arus sungai, pasang surut air laut dan gelombang. Lingkungan pengendapan transisi terdapat beberapa macam yaitu danau, delta, pantai, delta, estuarin, dan *tidal flat*.

2.2.2 Lingkungan Danau dan Lakustrin

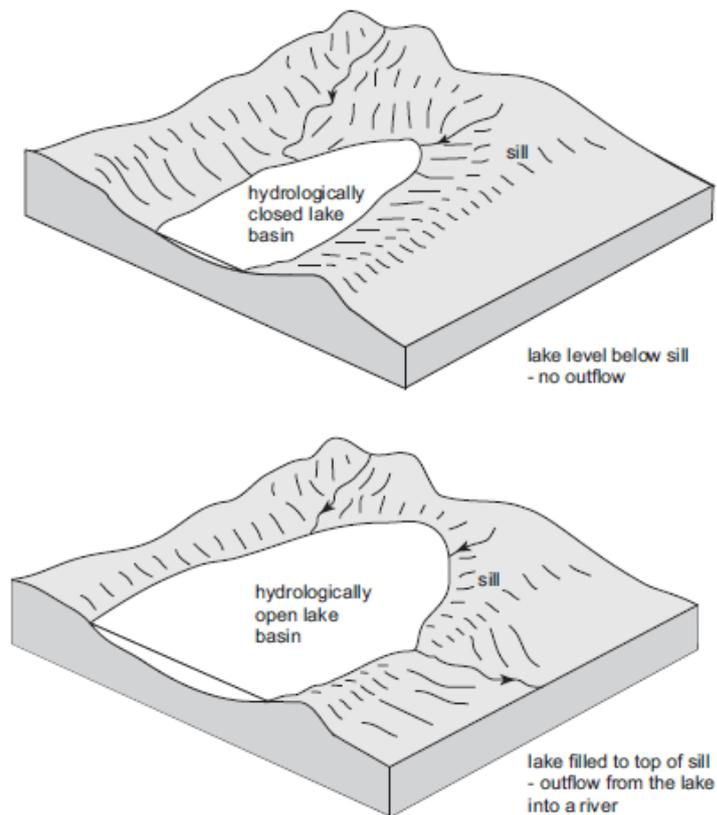
Daerah danau menutupi 1 sampai 2 persen dari permukaan bumi. Sedimentasi sejak awal terbentuknya danau dan sampai saat ini yang secara volumetrik tercatat dalam catatan stratigrafi. Dalam catatan stratigrafi dimulai dari usia *pra-kambrium* hingga holosen benua saat danau menutupi sekitar 1 sampai 2 persen dari permukaan bumi. Sifat komposisi danau terutama sifat kimianya peka terhadap kondisi iklim, dimana sedimentasi di daerah danau sebagai indikator dari iklim pada masa lalu. Selain itu beberapa deposit di danau mengandung jumlah yang signifikan dari deposit minyak *shale*, mineral *evaporit*, batu bara, uranium atau besi dan sedimen danau juga mengandung bahan organik yang halus [9].

a. Pembentukan Danau

Pembentukan danau terjadi di daratan untuk menampung akumulasi air, biasanya merupakan hasil dari aktivitas tektonik di daerah yang menciptakan cekungan sedimen. Proses pembentukan cekungan danau terutama disebabkan adanya ekstensi dari benua yang akan menjadi rekahan. Pembentukan cekungan erat kaitannya dengan terjadinya *deformasi strike-slip* pada kerak benua (*intracontinental sag basins*). Cekungan yang terbentuk akibat tektonik terjadi karena rekahan dan sesar *strike-slip* yang umumnya akan dikelilingi oleh sesar. Kondisi ini akan membuat permukaan relatif akan turun terhadap daratan sekitar. Karakter dari air akan menuju tempat yang lebih rendah sehingga akan mengisi cekungan tersebut dan akan terbentuk danau.

b. Hidrologi Danau

Penyuplai air dari danau berasal dari aliran sungai, air tanah dan air hujan. Danau akan memiliki sistem hidrologi terbuka, jika pada danau tersebut tergenang oleh air sampai titik tertinggi maka danau tersebut akan meluap. Aliran sungai yang konstan sebagai pengisi danau menyebabkan air di danau akan dalam keadaan baik (konsentrasi garam rendah sehingga tingkat salinitas rendah) pada Gambar 2.1.

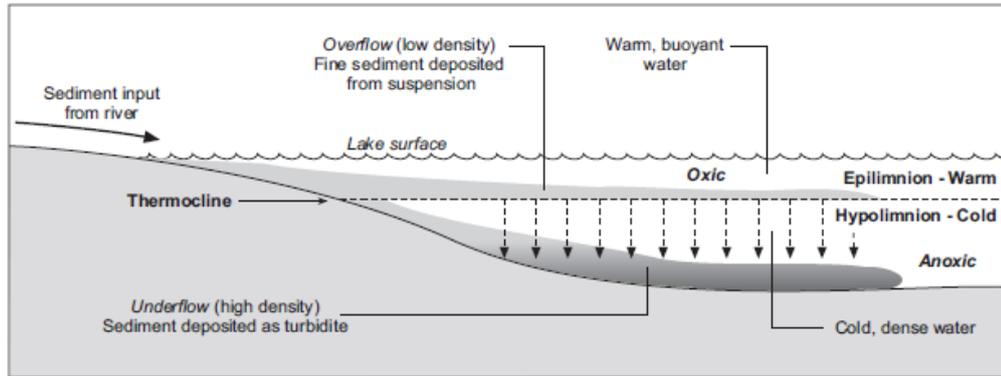


Gambar 2.1. Hidrologi danau [1].

c. Danau Air tawar

Kebanyakan jenis dari danau merupakan danau air tawar, danau air tawar tersebut terdapat pada garis lintang ekuator hingga daerah kutub. Deposit lakustrin dari danau dengan skala yang sama diketahui dari catatan stratigrafi terutama *devonian* hingga *strata neogene*. Danau merupakan daerah yang berisi dengan air yang relatif statis, keadaan danau tanpa adanya dorongan oleh pasang surut atau lautan. Gelombang pada danau akan terbentuk jika terdapat angin yang berhembus pada permukaan danau. Permukaan dari danau disinari oleh matahari akan menjadi

hangat dan air mempertahankan panas. Danau akan mendapatkan suhu stabil yang bervariasi pada setiap musim. Karena kurangnya sirkulasi pada bagian bawah danau maka suhu akan tetap konstan dan dingin. Perubahan suhu dari danau dijelaskan pada Gambar 2.2.

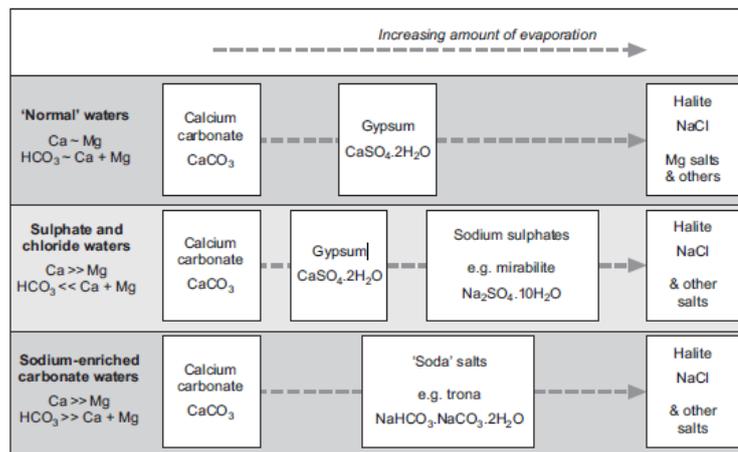


Gambar 2.2. Perubahan suhu pada danau [1].

Saat aliran dari sungai yang menjadi faktor transportasi sedimen, saat aliran sungai memasuki daerah danau maka kecepatan dari kecepatan arus dari sungai akan turun secara signifikan dan akan membentuk delta. Bentuk dan proses dari delta atau danau akan serupa yang terlihat pada bentuk delta dominasi material sungai. Karakter deposit delta sebagian besar akan dikendalikan oleh alam, material sedimentasinya merupakan butiran halus, kasar dan aluvial delta. Pada danau karbonat dapat membentuk proporsi yang signifikan saat transportasi atau deposit dari material klastik berkurang. Unsur kimia dari karbonat langsung dari mineral karbonat di danau merupakan salinitas, tetapi di danau air tawar banyak formasi kalsium, terutama dengan adanya kalsium berasal aktivitas geologi. Cangkang keras seperti hewan moluska, kerang, *gastropoda* dan *ostracods* dapat sebagai deposit sedimen di danau. Karbonat dapat membentuk proporsi yang signifikan, namun yang paling melimpah dari bahan karbonat di danau biasanya merupakan ganggang dan sumber mikroba.

d. Danau *Saline*

Danau *saline* adalah danau yang dideposit oleh sungai yang mengandung batuan lapuk dari batuan dasar dalam iklim yang tinggi akan penguapan. Salinitas dapat bervariasi mulai 5g L^{-1} dari air payau. Untuk air *hypersaline*, konsentrasi dari air laut akan tinggi. Dari sedimentasi danau air tawar menjadi danau air payau karena adanya penambahan konsentrasi dari garam. Sifat kimia danau *saline* ditentukan oleh kadar garam yang terlarut dari batuan dasar. Pada Gambar 2.3 dijelaskan perbedaan danau dari sifat kimianya.



Gambar 2.3. Tiga jenis danau *saline* yang dapat dibedakan dari sifat kimia [1].

Dari deposit material di danau *saline* akan mendapatkan karakteristik Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik deposit danau [1].

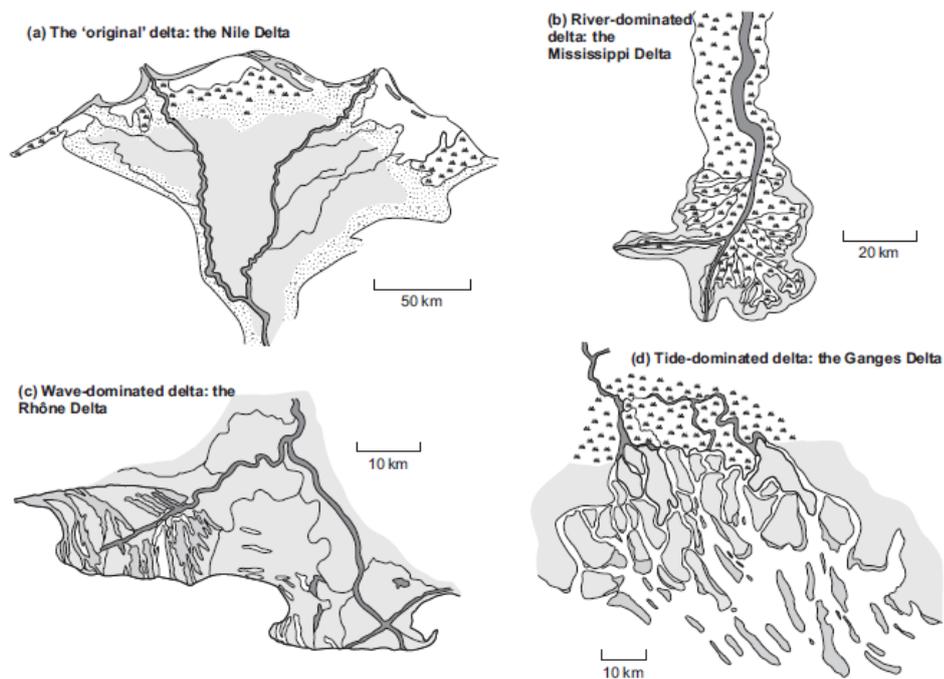
No	Karakteristik	Deposit
1	Litologi	Batu pasir, batu lempung dan halus batu gamping
2	Mineralogi	Bervariasi
3	Tekstur	Pasir pembentuknya semakin dalam semakin halus
4	Geometri	Tipis pada <i>bedrock</i>
5	Struktur sedimen	Bergelombang, sangat halus dan laminasi
6	<i>Parallel paleo currents</i>	Sedikit dengan lingkungan <i>paleo</i> yang signifikansi
7	Fosil	Sisipan fosil dari material merupakan endapan danau yaitu ganggang, mikroba, dan kerang
8	Warna	Warna akan pada endapan danau akan bervariasi
9	<i>Fasies</i>	Biasanya terjadi dengan endapan <i>fluvial</i> , <i>evaporite</i> dan terkait dengan <i>facies Aeolian</i>

2.2.2 Lingkungan Pengendapan Delta

Mouth river (mulut sungai) merupakan titik terakhir dari sedimentasi kontinental atau darat yang berbatasan dengan laut yaitu lingkungan pengendapan delta. Variasi dari sedimen pada delta ini tergantung pada morfologi dari *mouth river*, penyedia sedimen oleh sungai dan proses yang bertindak di danau atau laut [1].

a. Tipe delta

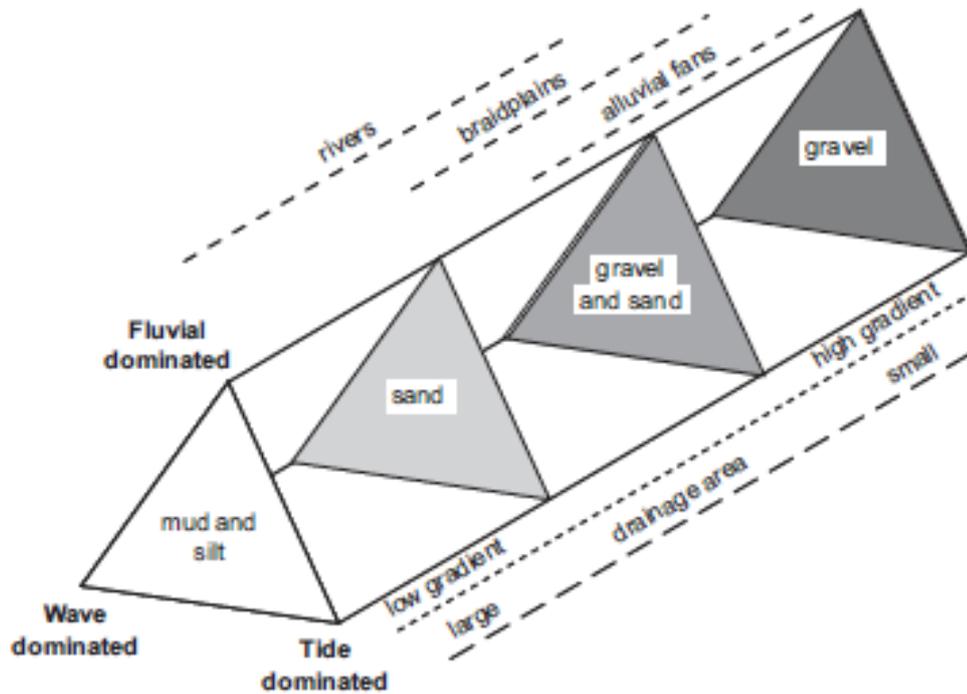
Delta merupakan lingkungan pengendapan yang terjadi antara batas laut dan sungai, ada beberapa tipe delta yang terbentuk diperlihatkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Contoh beberapa tipe delta [1].

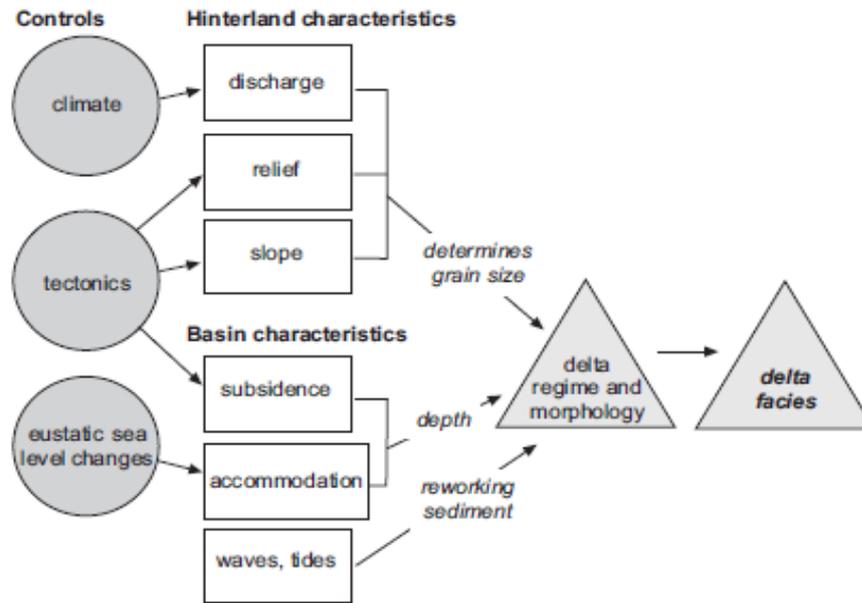
Original delta adalah sungai yang ada di wilayah daratan datar dengan saluran sungai yang membentuk segitiga Gambar 2.4 a. *Mississippi delta* adalah delta yang morfologinya menjauh ke arah laut, yang dibentuk oleh beberapa saluran Gambar 2.4 b. *Wave-dominated delta* merupakan delta yang terbentuk dari material sedimen yang terdistribusi oleh gelombang. Gambar 2.4 c. *Tide-dominated delta* merupakan delta yang terbentuk dari material sedimen yang terdistribusi oleh gelombang Gambar 2.4 d.

Delta sering diklasifikasikan dalam bentuk deposit ukuran butir yang dominan dan relatif *fluvial*. Klasifikasi dari pengisian ukuran butir batuan dijelaskan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Klasifikasi delta berdasarkan ukuran butir [1].

Pada lingkungan pengendapan delta dengan karakteristik deposit yang terbentuk di berbagai delta dapat digunakan sebagai dasar untuk mengklasifikasikan lapisan yang dicirikan sebagai *facies* delta. Sedimentasi dari delta ditentukan oleh sifat wilayah lingkungannya, iklim yang mempengaruhi, proses erosi, dan pengisian materialnya. Aliran air sungai merupakan kontrol pada topografi, terutama dari gradien sungai dan efeknya pada butiran dari material pembawa. Kedalaman air di cekungan penting karena mempengaruhi efek gelombang pasang surut dan juga mengontrol geometri keseluruhan pembentukan ditunjukkan pada Gambar 2.6 [1].



Gambar 2.6. Kontrol dari lingkungan pengendapan delta [1].

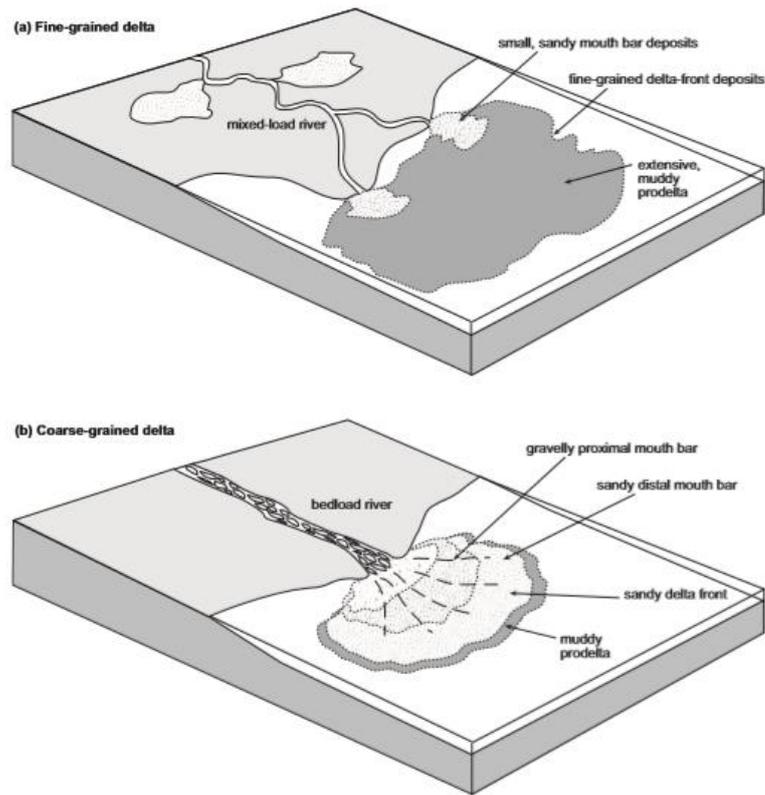
b. Variasi Morfologi Dan *Facies* Delta

1. Efek butir : delta butir halus

Deposit pada delta akan mencakup dari proporsi yang tinggi dari bahan yang tinggi dari material yang halus jika pada sistem *fluvial* campuran itu sungai. Sungai besar seperti ini akan membawa sedimen yang dikirim ke delta sebagai *bedload* berpasir, beban ditanggungkan besar *silt* dan tanah liat. Deposit pasir yang berada pada bagian atas delta terkonsentrasi di saluran delta, sedangkan sebagian besar dataran delta dan setiap daerah teluk adalah daerah akumulasi lumpur Gambar 2.4.

2. Efek butir : delta butir kasar

Delta butir kasar dapat disebut sebagai delta kipas, dibentuk oleh deposit dari sungai yang berkerikil atau kipas *alluvial*. Terbentuk berdekatan dengan bidang curam, aliran sungai di daerah tersebut mengalir menuruni lereng curam membawa bahan kasar menuju dasar sungai kipas *alluvial* yang *prograde* ke danau atau laut Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Contoh delta dengan ukuran halus (a) dan kasar (b) [1].

3. Kedalaman air : delta dangkal dan laut dalam

Daerah delta dengan akumulasi sedimen di dasar laut atau *front delta* dimana akan terbentuk di permukaan laut untuk meningkatkan luas dari delta. Transportasi pada delta akan tergantung pada ketebalan dari sedimen terbentuk dan mencapai permukaan laut.

4. Delta butir kasar dan laut dalam

Kombinasi dari deposit sedimen kasar dan cekungan yang curam menghasilkan bentuk delta tertentu yang tidak seperti semua delta lain. *Topset* (delta atas) merupakan *aerial* untuk lingkungan *shallow marine*, dengan kerikil yang tersimpan oleh *braided* dan dalam beberapa kasus, pada delta karena lerengnya curam dapat menjadi tidak stabil.

5. Kontrol pembentukan : delta dominasi sungai

Delta dianggap dengan lingkungan pengendapan dominasi sungai dengan efek pasang surut dan gelombang kecil. Pada kondisi ini bentuk delta sebagian besar

dikendalikan oleh transportasi *fluvial* dan sedimentasi. Arahnya searah dengan arus fluvial di muara sungai berlanjut ke laut atau danau sebagai aliran *subaqueous*.

6. Kontrol pembentukan : delta dominasi gelombang

Gelombang didorong oleh angin yang kencang akan memiliki kapasitas untuk mendistribusikan sedimen. Daerah sungai dan *mouth-bar* dari delta rentan terhadap ombak, sehingga pola yang terlihat didominasi sungai. Progradasi akan terbatas karena *subaqueous* tidak terbentuk.

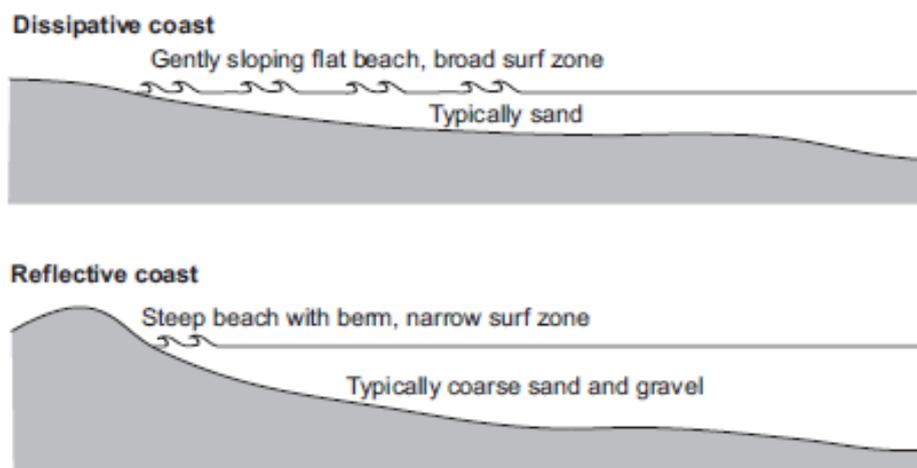
7. Kontrol pembentukan : delta dominasi pasang surut

Pantai dengan rentang pasang surut yang tinggi memiliki pengaruh pada darat dan arus pasang lepas pantai yang menggerakkan material sedimen. Sebuah delta yang terbentuk dari hasil air pasang yang kuat akan terbentuk menjadi pola yang berbeda dengan delta sungai dan didominasi oleh gelombang [1].

2.2.3 Lingkungan Pengendapan Pantai Klastik Dan Estuarin

a. Pantai

Pantai merupakan daerah antarmuka tanah dan laut pada lingkungan pengendapan transisi yang dapat terdiri dari berbagai zona, seperti daratan pantai, pantai, *barrier* dan *laguna*. Garis pantai adalah margin antara tanah dan laut. Garis pantai dibagai menjadi dua kategori umum atas dasar morfologi yaitu, energi gelombang dan deposit sedimen. Garis pantai yang *erosional* biasanya relatif curam.



Gambar 2.8. Tipe pantai [1].

b. Estuarin

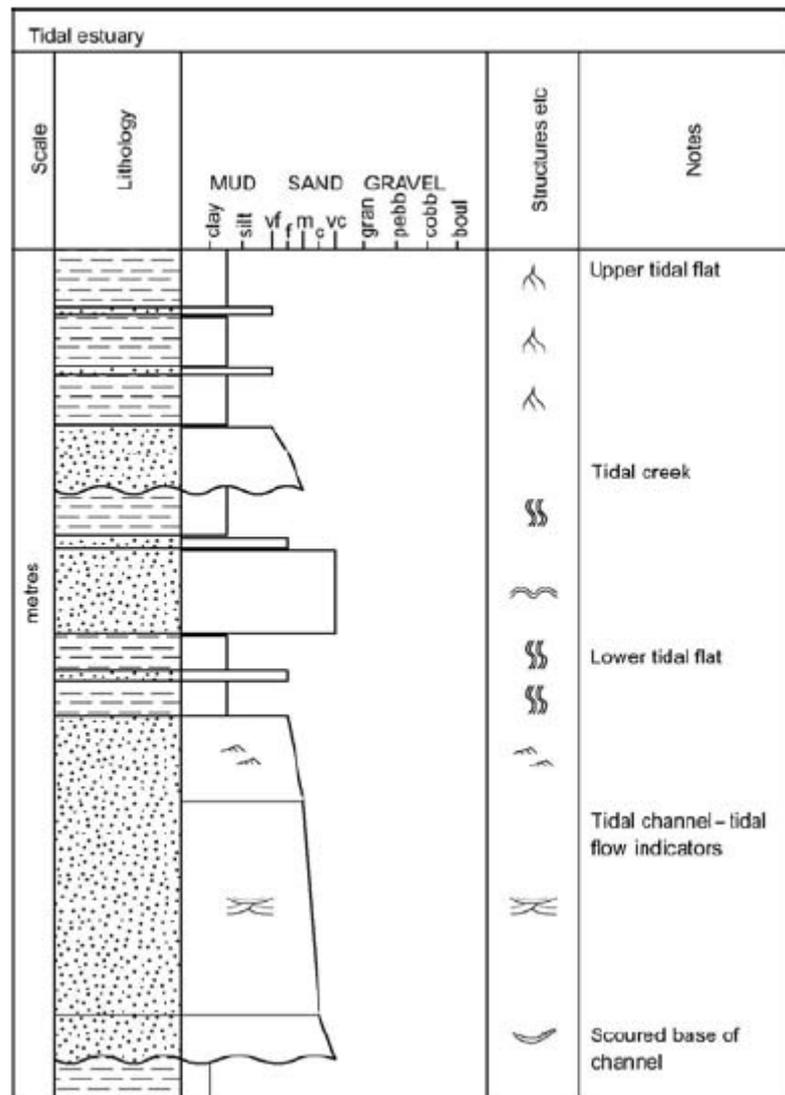
Muara merupakan bagian yang dipengaruhi oleh laut. Muara adalah daerah pencampuran antara air tawar dan air laut, deposit sedimentasinya berasal dari sungai dan dari laut. Delta merupakan sedimentasi yang terbentuk ke arah laut. *Estuarin* merupakan pengendapan sedimen pada ujung sungai. Pada *estuarin* ada dua jenis pengendapan yang terjadi, yaitu didominasi gelombang dan didominasi air pasang dilihat dari variasi bentuknya. Selain kedua kontrol tersebut, deposit sedimen dari sumber laut dan daerah *fluvial*, sebagai peranan penting dalam penentuan distribusi dari *facies estuarin*.

c. Tide Flat dan Coastal System

Tidal flat merupakan sistem pengendapan daratan yang terbentuk akibat adanya aktivitas gelombang. Proses pembentukan ketika energi gelombang yang besar maka *tidal flat* tidak akan sempat terbentuk karena sedimennya terjadi penggerusan. *Tidal flat* dibagi menjadi 3 zona, yaitu zona *microtidal (subtidal)*, *mesotidal (intertidal)*, dan *macrotidal (supratidal)*.

1. *Microtidal (subtidal)*

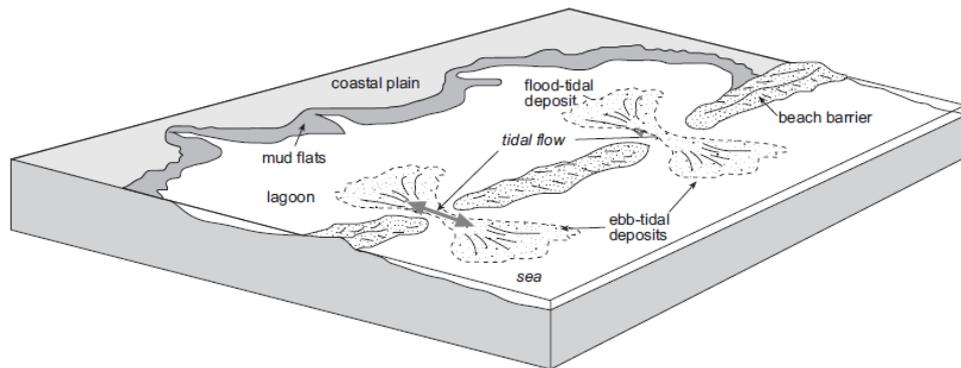
kondisi pengendapan yang terjadi pada *microtidal (subtidal)* pada *barrier system* Gambar 2.9 yang kurang lebih terjadi secara kontinu selama puluhan kilometer.



Gambar 2. 9 Sebuah log sedimen dari deposit *tidal flat* [1].

2. Mesotidal (intertidal)

Dengan meningkatnya rentang *mesotidal* (intertidal), lebih banyak terjadi pertukaran antara air yang berada di laguna dan air dari laut. *Inlet* adalah jalur untuk aliran pasang surut dan arus, dimana cukup kuat untuk melakukan distribusi sedimen. Pada laguna sedimen *barrier* yang terdistribusi melalui *flood-tidal delta* Gambar 2.10. *Bedform* pada *flood-tidal delta* biasanya memiliki tipe seperti gundukan yang bermigrasi ke daratan. *Ebb-tidal delta* terbentuk pada *seaward* pada batas saluran pasang surut karena air akan mengalir ke arah laguna ketika terjadi pasang surut. Ukuran dan luasnya sebuah pasang surut delta dibatasi oleh proses sedimen oleh gelombang, badai dan arus pasang dilaut.



Gambar 2.10. Morfologi dari garis pantai dipengaruhi oleh proses gelombang dan arus pasang surut [1].

Macrotidal (supratidal)

Pantai yang memiliki rentang pasang surut tinggi tidak berkembang menjadi *barrier system* penghalang karena *ebb dan flood tidal* adalah kontrol yang kuat pada distribusi sedimen daripada gelombang. Sebuah pantai dengan tipe *macrotidal* (supratidal) akan dicirikan oleh area lumpur antar gelombang saat air pasang dan air surut. Daerah ini memiliki bermacam mineral dan bahan organik (hewan dan tumbuhan). *Tidal flat* biasanya sering dipotong oleh anak sungai saat pasang surut, saluran kecil akan bertindak sebagai saluran selama naik dan turunnya arus. Aliran yang lebih kuat akan memungkinkan terbawanya sedimen pasir.

2.2. Metode *Ground penetrating radar (GPR)*

GPR merupakan teknik geofisika aktif yang menggunakan gelombang elektromagnetik. Pada metode *GPR*, bidang elektromagnetik menyebar sebagai gelombang pada dasarnya *non-dispersive*. Sinyal tersebut dipancarkan dan menjalar melalui medium di bawah permukaan, yang tersebar atau tercermin dalam perubahan impedansi yang menimbulkan terjadinya gelombang seperti sinyal yang dipancarkan [10].

GPR memiliki gelombang berada dalam kisaran frekuensi 10 MHz sampai 2 GHz, dengan propagasi gelombang *elektromagnetic* dan *non-magnetic*. material bumi resistif ($\sigma < 0,01 S/m$) sebgaaian besar dikendalikan oleh variasi spasial dari dielektrik di bawah permukaan. Perpindahan muatan terikat, atau polarisasi adalah

mekanisme dominan meskipun *free charge migration* atau konduksi yang mengatur induksi dari gelombang elektromagnetik yang dapat mempengaruhi sinyal *GPR* [11]. Resolusi sistem *GPR* tergantung pada kapasitasnya untuk membedakan antara dua radar yang kembali yang jaraknya berdekatan dalam 1 waktu. Resolusi ditentukan oleh lebar pulsa yang ditransmisikan, bersama dengan perluasan dan distorsi karena pulsa menyebar ke bawah permukaan. Lebar pulsa dari *TX* yang diberikan menurun, maka *bandwidth* dari frekuensi akan meningkat. Resolusi dari *GPR* selalu mentransmisikan pita frekuensi yang luas. Resolusi dapat ditingkatkan dengan mentransmisikan lebih tinggi frekuensi dan *bandwidth* secara bersamaan akan meningkat. Hal ini dapat dicapai dalam domain waktu dengan mempersempit lebar pulsa.

Dalam geologi sedimentasi, *GPR* digunakan terutama untuk studi stratigrafi. Dengan profil resolusi tinggi yang dangkal-kontinu dalam menentukan: (1) bentuk stratigrafi, (2) geometri lapisan pasir, (3) korelasi dan kuantifikasi struktur sedimen [12].

2.2.1. Prinsip Dasar *Ground Penetrating Radar*

Konsep dari pengukuran *ground penetrating radar* terletak pada teori elektromagnetik (EM). Persamaan *Maxwell* matematis menggambarkan parameter fisika bidang EM, sementara hubungan konstitutif menghitung sifat material. Menggabungkan duanya untuk menggambarkan sinyal *GPR* secara kuantitatif [13].

a. Persamaan *Maxwell*

Dalam matematis persamaan *Maxwell* yang digunakan pada metode *ground penetrating radar* ditunjukkan

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{(\partial \vec{B})}{(\partial t)} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{(\partial \vec{D})}{(\partial t)} \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = q \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Dimana *E* adalah vektor kekuatan medan listrik (V/m); *q* adalah muatan listrik kepadatan (C/m³); *B* adalah vektor kepadatan fluks magnetik (T); *J* adalah densitas

arus listrik (A/m^2); D adalah vektor perpindahan listrik (C/m^2); t adalah waktu (s); dan H adalah intensitas medan magnet (A/m) [13].

b. Persamaan Konstitutif

Hubungan konstitutif adalah sarana untuk menjelaskan respon material terhadap bidang elektromagnetik. Untuk *GPR*, persamaan konstitutif ditunjukkan sebagai :

$$\vec{J} = \tilde{\sigma}\vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{J} = \tilde{\epsilon}\vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \tilde{\mu}\vec{H} \quad (2.7)$$

Konduktivitas listrik $\tilde{\sigma}$ mencirikan gerakan muatan bebas bila ada medan listrik. Resistansi terhadap aliran menyebabkan energi. Dielektrik mencirikan perpindahan muatan yang dibatasi dalam struktur material dengan adanya medan listrik. Hasil perpindahan muatan yang terjadi dalam penyimpanan energi di material. Magnetik permeabilitas $\tilde{\mu}$ menggambarkan bagaimana momen magnetik atom dan molekuler merespon medan magnet. Untuk bahan yang sederhana, distorsi momen magnetik intrinsik menyimpan energi dalam materi. $\tilde{\sigma}$, $\tilde{\epsilon}$ dan $\tilde{\mu}$ adalah jumlah *tensor* dan juga dapat menjadi *non-linier*. Sifat material juga dapat bergantung pada sejarah manifestasi pada bahannya ketika nilai listrik memiliki respon terbatas.

$$\vec{J}(t) = \int_0^\infty \tilde{\sigma}(\beta)\vec{E}(t - \beta)d\beta \quad (2.8)$$

Bentuk persamaan kompleks ini digunakan pada sifat fisik dari bahan yang *dispersive*. Pada *GPR*, dengan asumsi nilai skalar. Permittivitas dielektrik adalah kuantitas yang penting, Paling sering istilah permittivitas relatif atau "konstanta dielektrik" digunakan dan didefinisikan sebagai berikut:

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

dimana permittivitas ruang hampa adalah 8.89×10^{-12} F/m [13].

c. Energi Yang Hilang (Atenuasi) dan *Skin Depth*

Faktor yang menyebabkan penurunan kekuatan sinyal adalah karena penyebaran gelombang melalui suatu media di bawah permukaan. Hilangnya energi terjadi sebagai konsekuensi dari refleksi dan transmisi setiap permukaan dan setiap kali terjadi gelombang radio yang melewati batas. Panjang gelombang dari suatu objek yang cukup besar relatif terhadap radar, objek tersebut dapat menimbulkan difraksi. Selain refleksi atau transmisi yang hilang di permukaan, energi juga akan berkurang karena penyerapan (mengubah energi elektromagnetik menjadi panas). Penyebab mendasar dari hilangnya energi adalah dari sifat dielektrik dan listrik dari Media dimana sinyal radar akan menghilang. Atenuasi (α) bergantung pada variabel listrik (σ), magnetik (μ) dan dielektrik (ϵ) dari media yang dilalui sinyal tersebut, serta frekuensi sinyal itu sendiri ($2\pi f$). Seperti halnya gelombang elektromagnetik lainnya, kedalaman sinyal yang telah menurun pada amplitudo menjadi $1/e$ (yaitu, 37%) dari awal dikenal sebagai kedalaman kulit (δ) dan berbanding terbalik faktor atenuasi (yaitu $\delta = 1/\alpha$). Definisi matematis yang menunjukkan hilangnya amplitudo (atenuasi) dan *skin depth* yaitu [14].

Atenuasi

$$\alpha \approx \begin{cases} \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} & \text{untuk } \omega\epsilon \ll \sigma \\ \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} & \text{untuk } \sigma \ll \omega\epsilon \end{cases} \quad (2.10)$$

Skin depth

$$\frac{1}{\alpha} = \delta$$

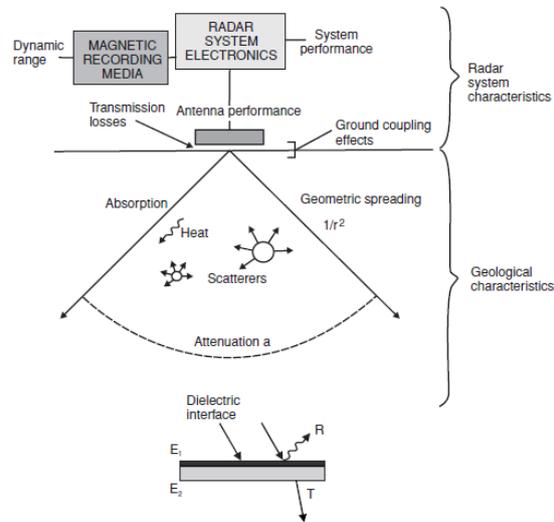
$$\alpha \approx \begin{cases} 503 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}} & \text{untuk } \omega\epsilon \ll \sigma \\ 0.0053 \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\sigma}} & \text{untuk } \sigma \ll \omega\epsilon \end{cases} \quad (2.11)$$

Pada kondisi 'Low-Loss' akan memungkinkan kecepatan dan panjang gelombang dapat diperkirakan

$$\text{Velocity, } v \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.12)$$

$$\text{Wavelegth, } \lambda(m) = \frac{v}{f} \quad (2.13)$$

Dimana f merupakan frekuensi rambat gelombang dalam material (*Hertz* atau dalam siklus per detik). Perkiraan dari kedalaman dan resolusi target dapat ditentukan untuk survei tertentu dan memberikan langkah pertama dalam interpretasi data *GPR* [15].



Gambar 2.11. Proses pelemahan energi gelombang [14].

d. Koefisien Refleksi Dan Dielektrik

Ketika gelombang radio mencapai batas dari lapisan, beberapa diantaranya tercermin dan lainnya ditransmisikan melalui antarmuka. Hal ini menyebabkan kedua pantulan dan gelombang ditransmisikan. Amplitudo dari gelombang yang dipantulkan didefinisikan oleh koefisien refleksi (R). Untuk gelombang radio, koefisien refleksi dapat dinyatakan sebagai fungsi dari permitivitas relatif. Asumsi dari gelombang radio tiba pada sudut tegak lurus terhadap antarmuka, koefisien refleksi ditunjukkan :

$$R = \frac{\text{Reflected Amplitude}}{\text{Incident Amplitude}} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2.14)$$

Dimana ϵ_1 adalah permitivitas relatif medium yang membawa insiden dan gelombang pantulan, maka koefisien refleksi adalah

$$T = \frac{\text{Transmitted Amplitude}}{\text{Incident Amplitude}} = \frac{2\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2.15)$$

Koefisien refleksi dapat berupa positif atau negatif dan memiliki nilai antara $-1 < R < 1$. Besarnya R menentukan beberapa banyak gelombang yang dipantulkan

dan ditransmisikan pada suatu bidang batas. jika ϵ_1 dan ϵ_2 serupa, semakin besar gelombang insiden ditransmisikan melalui batas lapisan. Jika salah satu permitivitas relatif diantarmuka jauh lebih kecil dari yang lain, sebagian besar gelombang datang akan pantulkan. Tanda koefisien pantulan menentukan apakah gelombang yang dipantulkan mengalami kebalikannya dalam polaritas. Akibatnya polaritas mencerminkan gelombang radio apakah ϵ_1 lebih besar atau kurang dari ϵ_2 . Jika sinyal kembali (tercermin gelombang) menunjukkan kebalikan dalam polaritas, $R < 0$ dan dengan demikian $\epsilon_1 < \epsilon_2$ Jika sinyal kembali (pantulan gelombang) tidak menunjukkan kebalikan dipolaritas, $R > 0$ dan dengan demikian $\epsilon_1 > \epsilon_2$ [14].

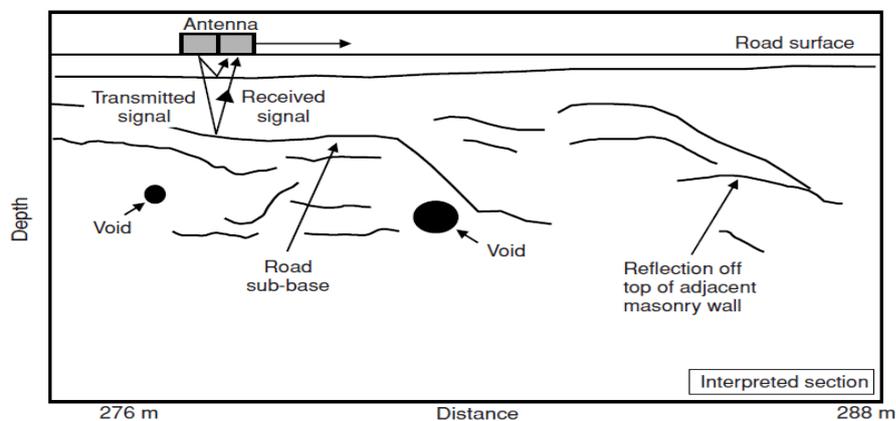
Tabel 2.2. Sifat dielektrik, kecepatan dan konduktivitas dari bahan [13].

Material	ϵ_r	Velocity (mm/ns)	Konduktivitas (mS/m)	Atenuasi (db/m)
Udara	1	300	0	0
Air	81	33	0.5	0.1
Air Laut	81-88	33	3000	10^3
Krikil	5	134	10	
Pasir dan Krikil (tidak Tersaturasi)	3.5-6.5	118-160	0.007-0.06	
Pasir dan Krikil (Tersaturasi)	15.5- 17.5	72-76	0.7-9	
Pasir Pesisir (Kering)	5-10	95-134	0.01-10	
Pasir (Kering)	3-6	122-173	10^{-4} -1	0.01
Pasir (Pesisir,Kering)	5-10	95-134	0.01-1	
Pasir (Basah)	10-32	53-95	0.01-10	0.03-0.3
Lanau (Tidak Tersaturasi)	2.5-5	134-190	1-100	1-100
Lanau (Tersaturasi)	22-30	55-64	≤ 100	
Lempung (kering)	2-5	134-212	2-100	1-300
Lempung (Basah)	8-40	47-106	20-1000	

2.2.2. Prinsip Kerja *Ground Penetrating Radar*

Sistem dari *ground penetrating radar* terdiri dari sinyal, yaitu satu untuk melakukan transmisi sinyal elektromagnetik ke bawah permukaan bumi dan satu sistem untuk menerima antenna (bergantung pada sistem dan penyebarannya) dan konsol kontrol untuk mengelola sinyal dan merekamnya. Sistem radar yang menyebabkan antenna pemancar (*TX*) gelombang radio yang menyebar jauh diblok luas. Seperti gelombang radio yang berjalan pada kecepatan tinggi (diudara 300.000 km/s atau 0.3 m/NS) .

Waktu tempuh gelombang radio dari instan transmisi sampai dikembalikan keantena penerima (*RX*) adalah beberapa puluh sampai ribuan *nano* detik (NS; 10-9 detik) ditunjukkan pada Gambar 2.5. Dengan begitu dibutuhkan instrumentasi akurat untuk pengukuran, sehingga mendapatkan hasil [14].



Gambar 2.12. Prinsip kerja *ground penetrating radar* [16].

Pada pengukuran lapangan, kedua sensor yaitu pemancar dan penerima yang terkandung dalam unit yang sama, dikatakan sebagai antenna *monostatic* . Pemancar dan *receiver dipol-antena* terpisah dan dapat dipindahkan secara independen satu sama lain [16].

Satu atau lebih antenna radar ditarik/geser secara lurus di permukaan tanah dengan bersamaan, dengan waktu tempuh yang akan terukur sampai dengan gelombang sampai tiap reflektor yang terdapat pada sumbu vertikal, sementara jarak antenna ditampilkan pada perubahan sumbu diarah *horizontal*.

2.2.3. Pengolahan Data *Ground Penetrating Radar*

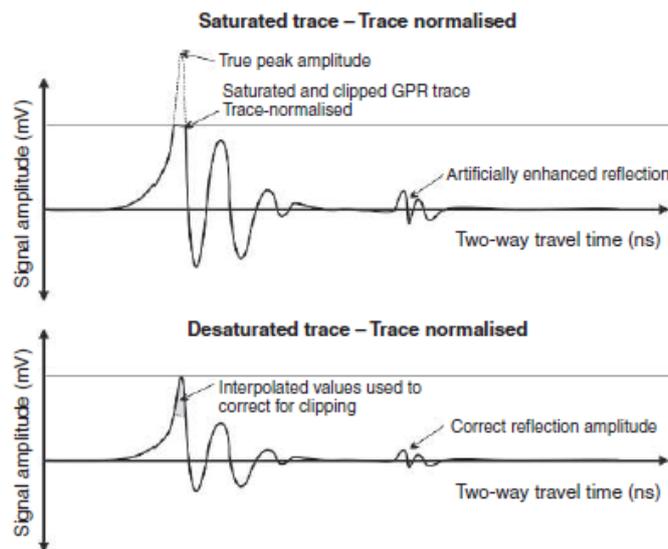
Data hasil pengukuran lapangan dilakukan proses filter dan lainnya untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dan mudah diinterpretasikan [17].

a. *Static Correction*

Static correction adalah proses pengoreksian posisi antenna *transmitter* dan *receiver* untuk mengembalikan keposisi datum yang sebenarnya. Koreksi statik *move start time* adalah koreksi statik untuk menghilangkan pengaruh dari *direct wave* dan gelombang udara [13].

b. *Dewow*

Filter pertama dalam pengolahan data *GPR* adalah melakukan *filter temporal* untuk menghapus komponen frekuensi yang sangat rendah dari data. langkah ini disebut dengan ‘*de-wow*’ data. Komponen frekuensi rendah data baik dengan fenomena induktif atau kemungkinan dengan keterbatasan rentang dinamis, pada instrumentasi dilihat dari perbedaan *trace* yang tersaturasi dan tidak tersaturasi [12].



Gambar 2.13. Proses *dewow* [13].

c. *Temporal dan Spatial Filter*

Temporal dan *spasial filter* (*bandpass filter*) adalah tahap selanjutnya pengolahan data *GPR* dimana tahap pengolahan data ini diterapkan sebelum atau sesudah *time gain*. Penyaringan temporal berarti menyaring sepanjang sumbu waktu pada

sekumpulan data seluruh sumber dari berbagai jenis penyaringan *bandpass* menggunakan transformasi *fourier (FFT)* melalui berbagai jenis waktu *linier* dan *non--liner* pada *domain filter* yang ditunjukkan dari amplitudo *spectrum* [13].

d. Deconvolution

Deconvolution dilakukan dalam pengolahan data GPR karena karakteristik campuran dari *wavelet* sumber. Pengolahan ini dilakukan untuk memaksimalkan *bandwidth* dan mengurangi dispersi pulsa untuk memaksimalkan resolusi. *Deconvolution* erat kaitannya dengan *filter invers Q*.

Frekuensi pada pengukuran GPR yang lebih tinggi cenderung cepat terjadi atenuasi mengakibatkan penurunan resolusi dengan meningkatnya kedalaman. Penyaringan *invers Q* merupakan langkah untuk mengimbangi efek ini [14]

e. Time Gain

Langkah selanjutnya pengolahan data yaitu memilih waktu untuk mendapatkan set data. Waktu yang didapatkan secara historis sangat subjektif dan juga sangat banyak tergantung dari perangkat. Sinyal radar sangat cepat terjadi atenuasi saat menyebar ketanah. Sinyal yang didapatkan oleh kedalaman yang dalam akan sangat kecil dan pada saat yang sama sinyal pada kedalaman dangkal akan sulit menampilkan informasi [13].

f. Temporal dan Spatial Filter

Temporal dan *spasial filter* adalah tahap selanjutnya pengolahan data GPR dimana tahap pengolahan data ini diterapkan sebelum atau sesudah *time gain*. Penyaringan temporal berarti menyaring sepanjang sumbu waktu pada sekumpulan data seluruh sumber dari berbagai jenis penyaringan *bandpass* menggunakan transformasi *fourier (FFT)* melalui berbagai jenis waktu *linier* dan *non--liner* pada domain filter yang ditunjukkan dari amplitudo *spectrum* [13].

g. Stacking

Trace stacking adalah proses lain dalam pengolahan data *ground penetrating radar* yang tidak selalu diperlukan tetapi yang terkadang dapat berguna. Tujuan dari

stacking adalah proses merata-ratakan sejumlah *trace*, dimaksudkan untuk membuat target lebih jelas dan mengurangi *noise* [13].

2.2.4. Interpretasi

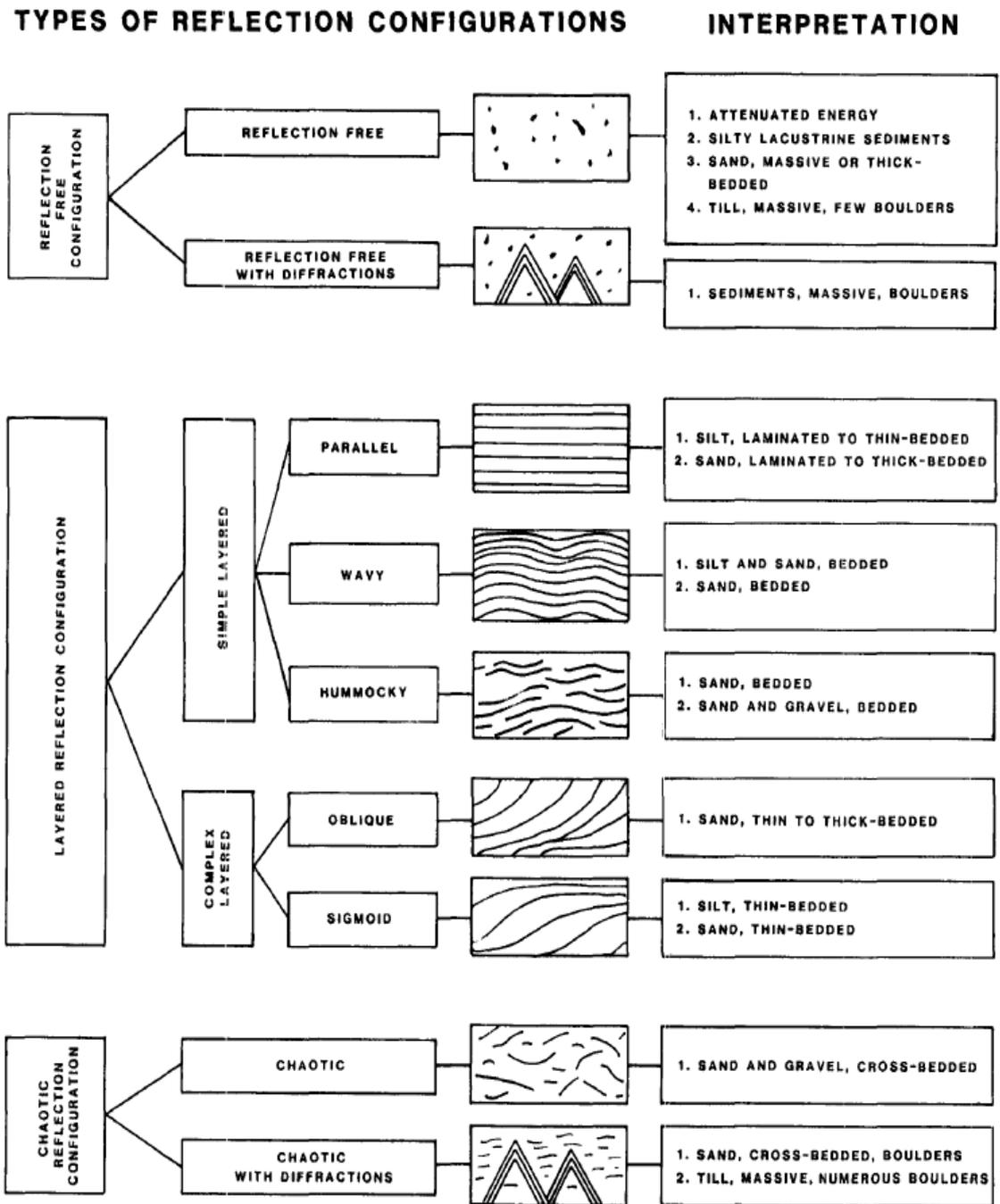
Interpretasi merupakan proses selanjutnya setelah dilakukan pengolahan data (filter dan lainnya). Interpretasi bertujuan untuk mengetahui bawah permukaan dengan bantuan data geologi (data geologi, peta geologi, atau data sumur) untuk mengetahui batuan yang terdapat di bawah permukaan dilihat dari penampang hasil pengolahan data metode geofisika yang digunakan.

a. Analisis Data Geofisika Dengan Bor Inti

Interpretasi bor inti merupakan interpretasi yang dilakukan menggunakan data sumur *logging core* atau bor inti untuk dikorelasikan dalam penampang *GPR* untuk melakukan penarikan pada batas lapisan (*horizon*) [18].

b. Analisis *Facies*

Analisis *facies* merupakan analisis yang dilakukan untuk membedakan bentuk dari sinyal yang terefleksi atau yang telah sampai reflektor membentuk menjadi *facies* yang akan dibedakan sehingga dapat diasumsikan batuan atau lapisan yang didapatkan dengan bentuk *facies* tersebut. berdasarkan hasil dari Berres and Haeni (1991) dan Jol dan Smith (1991) tentang analisis *facies* dari *GPR*, analogi dari hasil analisis *facies* di metode seismik refleksi dan memberikan contoh dan interpretasi yang paling umum untuk konfigurasi refleksi. Deskripsi yang dilakukan pada penampang *GPR* dengan melakukan analisis *facies* terdapat 2 komponen utama yaitu komponen internal dan eksternal, kedua komponen tersebut dilakukan analisis. Komponen pada eksternal memiliki ciri pada ketebalan *isopach* dan kedalaman *boundary* peta kontur yang didasarkan pada lintasan *GPR*. *Facies* dicirikan oleh orientasi dari bagian relatif penurunan sedimentasi [19]



Gambar 2.14. Contoh *facies ground penetrating radar coastal barrier* [19].

c. Pengaruh Saturasi Air

Pengaruh dari keberadaan air laut didalam lapisan, saat gelombang EM dipancarkan maka lapisan yang terisi air laut akan berpengaruh karena dapat menyebabkan penurunan dari sinyal. Sehingga semakin mudah dan banyak lapisan terisi oleh air laut sinyal akan semakin melemah. Air laut merupakan fluida dari air garam sehingga akan menghasilkan nilai konduktivitas yang besar karena merupakan zat

yang baik sebagai mengalirnya arus listrik. Saat nilai konduktivitas yang tinggi dari material di bawah permukaan maka sinyal dari *GPR* akan cepat teratenusi. Hal ini dibuktikan dari Persamaan 2.11 dimana menjelaskan atenuasi dan *skin depth*, berdasarkan Tabel 2.1 akan mendapatkan nilai atenuasi material yang tersaturasi oleh air laut.