

III. TEORI DASAR

3.1 Pengertian Gelombang Seismik

Gelombang *seismic* pada dasarnya merupakan gelombang *elastic* yang dijalarkan melalui media bumi. Pembangkitan gelombang *seismic* dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu :

1. Metode aktif, biasanya digunakan pada *seismic* eksplorasi, yaitu dengan peledakan dinamit, pemukulan dengan palu dan sebagainya.
2. Metode pasif, memanfaatkan gejala-gejala alam yang sudah ada, seperti gempabumi, baik yang diakibatkan oleh letusan gunung berapi maupun gempa tektonik.

Pada saat terjadi gempabumi, sejumlah besar energi dilepaskan dari sumber gempa atau *focus*. Energi itu akan dipancarkan ke segala arah melalui usikan (*disturbance*) yang menjalar ke seluruh bagian bumi karena adanya sifat elastisitas material bumi. Usikan yang menjalar dalam medium *elastic* disebut gelombang *elastic* (Susilawati, 2008).

Informasi struktur bagian dalam bumi diperoleh dari pengamatan penjalaran gelombang *elastic* yang dibangkitkan oleh gempabumi (metode pasif). Gelombang ini disebut gelombang *seismic* gempa atau secara umum lebih dikenal sebagai gelombang *seismic*.

3.2 *Microseismic*

Errington (2006) menjelaskan bahwa gelombang *microseismic* ini menghasilkan gelombang mekanis yang menyebar keluar dari sumber, terdiri dari gelombang longitudinal dan transversal. Gelombang longitudinal disebut juga gelombang kompresi karena terbentuk dari osilasi tekanan yang menjalar dari satu tempat ke tempat lain dan disebut juga gelombang P (*Primary*). Gelombang transversal arah getar (osilasi) partikel-partikel medium tegak lurus terhadap arah penjarannya, gelombang ini disebut juga gelombang S karena datangnya setelah gelombang P. Hubungan antara gelombang P dan S dapat terlihat pada persamaan ini,

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

dan

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

Anomali spektral dengan frekuensi rendah (< 10 Hz) dari tanda *microseismic* baru-baru ini dipakai untuk pendeteksian hidrokarbon secara langsung. Misalnya (Dangel dkk, 2003) menyelidiki data mikrotremor untuk menemukan hidrokarbon dengan menghubungkan antara frekuensi rendah spektral anomali pada gelombang mikrotremor dengan reservoir hidrokarbon di Timur Tengah, pemakaian analisis spektral dengan frekuensi rendah untuk pencarian hidrokarbon telah dilakukan oleh Rusia sejak tahun 1990. Spektrum dari gelombang *microseismic* memiliki frekuensi yang berbeda antara lapangan yang memiliki reservoir hidrokarbon dan yang tidak memiliki reservoir.

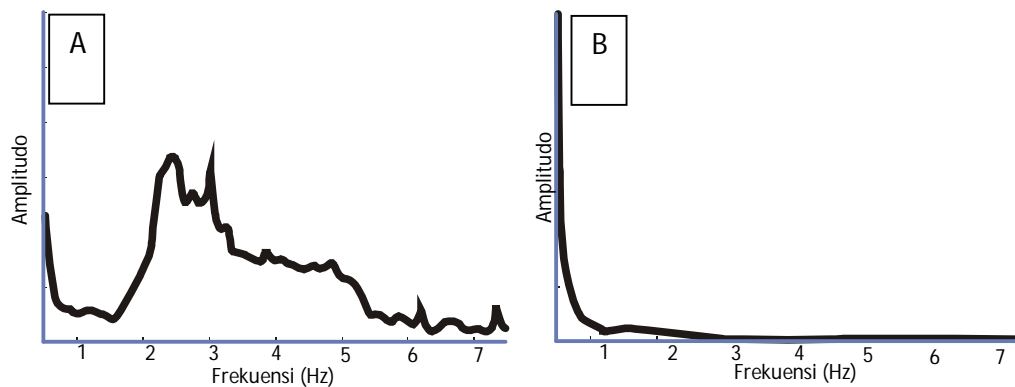
Penelitian yang dilakukan (Dangel dkk, 2003) pada rasio spektrum H/V (horizontal dibagi vertikal) data mikrotremor yang diukur pada area hidrokarbon menunjukkan kecenderungan munculnya lembah pada range frekuensi 1-6 Hz dari rasio H/V pada titik-titik yang diukur tepat di atas struktur geologi yang mengandung hidrokarbon. Jika hasil observasi ini konsisten, maka diharapkan munculnya puncak dari rasio spektrum V/H (sama dengan lembah pada rasio H/V) akan berhubungan dengan adanya fluida hidrokarbon. Persamaan yang digunakan untuk mencari rasio V/H tersebut adalah:

$$\frac{V(f)}{H(f)} = \frac{V(f)}{\sqrt{\frac{X^2(f) + Y^2(f)}{2}}} \quad (3.1)$$

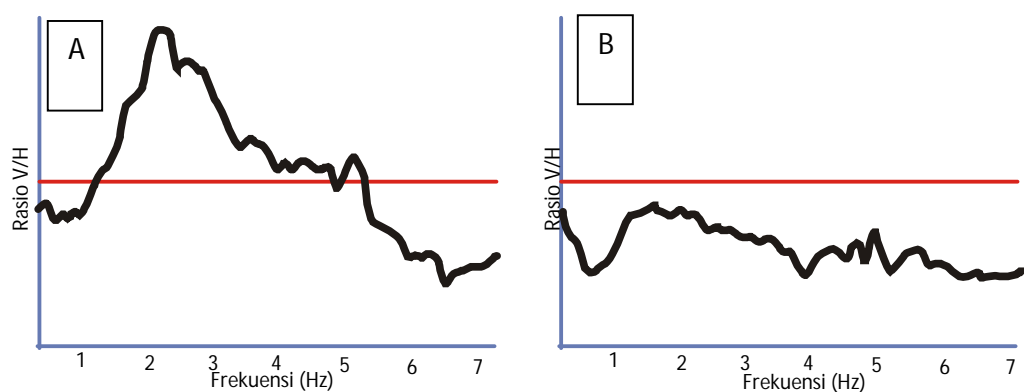
dimana $\frac{V(f)}{H(f)}$ adalah rasio V/H yang didapatkan dari komponen vertikal $V(f)$ dibagi dengan akar kuadrat dari jumlahan kuadrat komponen horizontal $X(f)$ dan $Y(f)$ dibagi 2. Kemungkinan penghasil anomali spektral pada data mikrotremor ini adalah karena adanya perilaku non-linier dari interaksi antara hidrokarbon cair dan air dengan batuan yang bersifat porous dalam reservoir (Ali dkk, 2007).

(Saenger dkk, 2007) juga melakukan penelitian menggunakan metode mikrotremor pada lapangan gas di area *Burgos Basin* di barat laut Meksiko. Dari penelitian ini didapatkan hasil yaitu anomali spektral pada *range* frekuensi 1-6 Hz dari titik-titik yang diukur tepat di atas reservoir hidrokarbon akan lebih tinggi dan membentuk pola yang sistematis (Gambar 3.1) dibandingkan anomali spektral pada *range* frekuensi 1-6 Hz dari titik-titik yang diukur di luar reservoir hidrokarbon (Gambar 3.2). Penemuan *range* frekuensi 1-6 Hz ini sangat penting

karena secara teoritis mekanisme penghasil anomali spektral tersebut mungkin dihasilkan pada range frekuensi yang jauh lebih lebar dibanding frekuensi 1-6 Hz tersebut. Oleh karena itulah, anomali spektral pada range frekuensi antara 1-6 Hz ini merupakan ciri khas dari metode mikrotremor untuk hidrokarbon dan frekuensi tersebut (1-6 Hz) merupakan frekuensi mikrotremor hidrokarbon (Berger dkk, 2004).

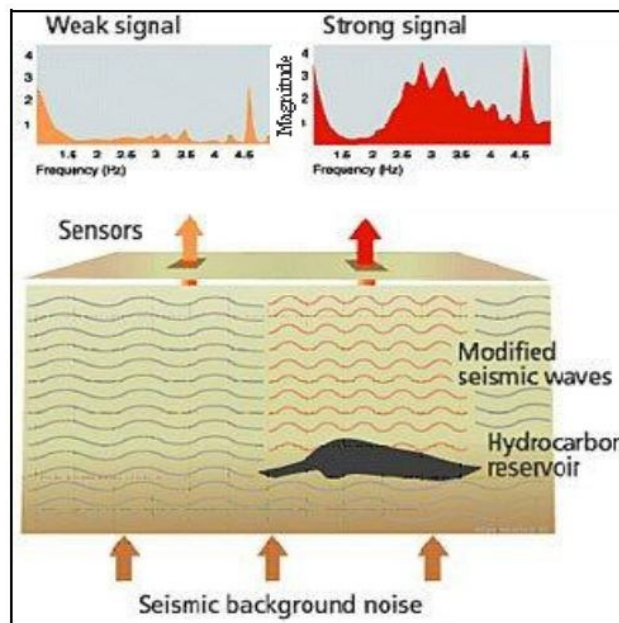


Gambar 3.1. Spektrum vertikal dari gelombang seismik pasif dengan range frekuensi antara 1 sampai 7 Hz. Gambar A diukur di atas reservoir gas dan Gambar B di luar reservoir hidrokarbon. Kedua titik ini berada di area *Burgos Basin*, barat laut Meksiko (Saenger dkk, 2007).



Gambar 3.2. Merupakan rasio V/H dengan *range* frekuensi 1 sampai 7 Hz dengan titik dan lokasi yang sama dengan gambar III.5. Garis merah menandakan nilai $V/H = 1$ (Saenger dkk, 2007).

Dari beberapa hasil penelitian di atas, diharapkan bahwa metode mikrotremor ini dapat digunakan sebagai indikator langsung keberadaan hidrokarbon (*direct hydrocarbon indicator (dhi)*) pada reservoir, seperti halnya fenomena *brightspot* dan *dimspot* pada metode seismik konvensional (Oktariano, 2009)



Gambar 3.3. *Seismic background noise spectrum* (Holzner dkk, 2005)

3.3 Penyebab Munculnya Anomaly Pada Rentang 2 – 4 Hz

Penyebab munculnya anomali frekuensi pada rentang 2 – 4 Hz sampai saat ini masih menjadi perdebatan banyak ahli. Namun paling tidak ada dua teori yang berusaha menjelaskan munculnya fenomena tadi (Holzner dkk, 2006), yaitu:

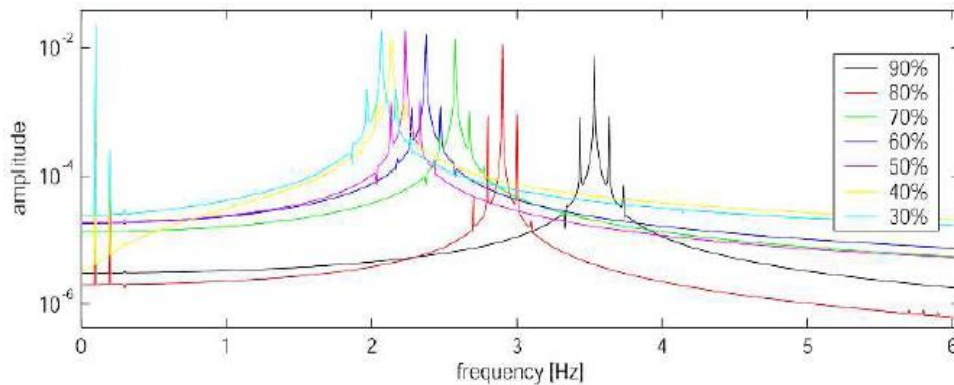
1. Adanya amplifikasi resonansi yang terjadi pada skala pori-pori reservoir, dimana energi seismik terperangkap di dalam medium berfasa banyak (reservoir hidrokarbon) yang menghasilkan resonansi pada tingkat energi baru.

2. *Scattering* resonansi karena kontras impedansi antara reservoir dengan batuan di sekitarnya yang mengubah gelombang mikroseismik latar menjadi gelombang *seismic* baru yang berada pada rentang frekuensi tertentu.

Suatu fenomena menarik telah ditemukan, yaitu adanya sinyal mikroseismik yang terdeteksi di atas suatu reservoir hidrokarbon yang dikenal dengan nama mikrotremor hidrokarbon. Sinyal ini sangat unik dan tidak ditemukan pada permukaan di atas medium yang tidak berisi hidrokarbon. Sehubungan dengan penemuan tersebut, maka dikembangkan suatu teknologi untuk mendeteksi secara langsung yang dapat digunakan baik dalam eksplorasi, pengembangan lapangan maupun dalam pemantauan (*monitoring*) lapangan hidrokarbon. Teknologi tersebut dalam terminologi ini diberi nama MHDI (*Microseismic for Hydrocarbon Detection and Identification*). Teknik tersebut didasarkan pada prinsip sifat non-linear dari suatu sistem fluida dalam medium berpori.

Hidrokarbon sebagai suatu sistem pori dalam batuan reservoir dapat dideteksi sebagai deformasi karakteristik dari spektrum *noise* bumi alami dalam jangkauan frekuensi yang rendah, yaitu antara 2–4 Hz. Sinyal *seismic* frekuensi rendah ini direkam secara pasif di permukaan bumi dengan seismometer yang sangat sensitif dan secara spektroskopi dianalisis untuk menghasilkan sebuah spektrum tertentu yang unik, yang dapat digunakan sebagai indikator keberadaan hidrokarbon secara langsung (Wahyudi, 2009).

Adapun pada tahap produksi dan pengembangan lapangan, teknologi ini dapat mengontrol reservoir yang telah berproduksi, misalnya untuk memprediksi ketebalan lapisan hidrokarbon pada setiap titik.



Gambar 3.4. Spektrum amplitudo untuk model pori-pori berupa bola. Warna menunjukkan ketinggian fluida di dalam pori-pori dan dinyatakan dalam %.

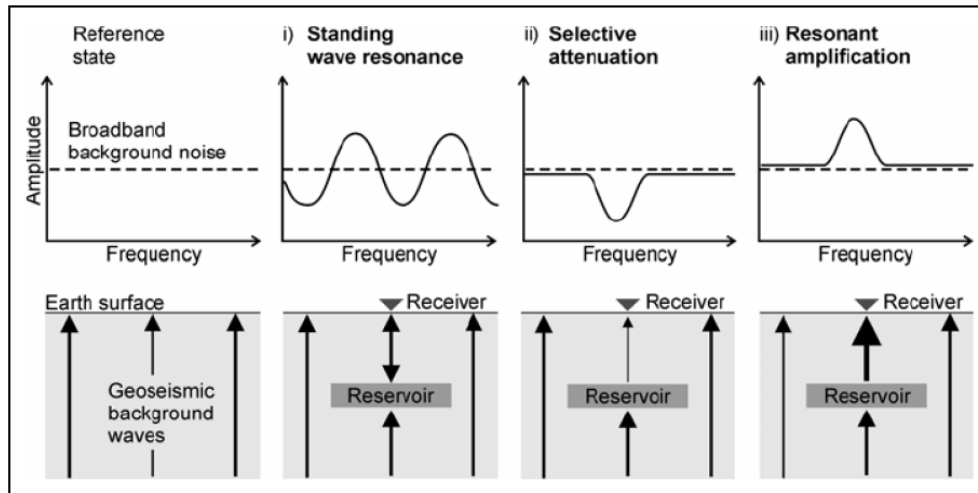
Dari **Gambar 3.4** tersebut terlihat bahwa respon dari pori-pori yang berisi hidrokarbon terhadap adanya gaya osilasi dari luar akan memberikan respon spektrum pada rentang frekuensi yang berkisar antara 2 Hz sampai dengan 4 Hz. Hal ini sangat sesuai dengan pengamatan di lapangan bahwa anomali rentang frekuensi 2 Hz sampai dengan 4 Hz akan muncul pada pengukuran mikroseismik di atas reservoir hidrokarbon.

3.4 Mekanisme Fisika Batuan Pada Sub Domain 10Hz

Mekanisme frekuensi lemah yang mungkin terjadi pada sub domain 10Hz adalah:

1. resonansi gelombang tegak,
2. atenuasi selektif
3. amplifikasi resonan.

Ini diilustrasikan pada **Gambar 3.5** :



Gambar 3.5. Tiga mekanisme dari karakteristik spektrum

Kita ketahui bahwa *background noise* disebabkan oleh berbagai macam aktifitas bawah permukaan bumi, diantaranya aktifitas geodinamika, pasangsurut air laut, pergeseran lempeng, pergerakan kerak bumi, aktifitas gunung api, *hydrothermal* dan reservoir minyak dan gasbumi.

1. Resonansi Gelombang Tegak (*Standing Wave Resonance*)

Ketika terjadi perambatan gelombang dari satu medium ke medium yang lain, dengan material penyusun yang berbeda, maka sebagian gelombang itu akan direfleksikan. Karakteristik waktu tempuh gelombang (*two-way travel time*) atau frekuensi resonansi antara permukaan tanah dan reservoir menghasilkan

karakteristik anomali spektral. Efektifitas dari kontras impedansi dapat ditingkatkan secara signifikan dengan melakukan *high attenuation* di daerah frekuensi lemah pada batuan reservoir (Korneev dkk, 2004; Chapman dkk, 2006).

2. Atenuasi Selektif

Ada beberapa model untuk menjelaskan pelemahan gelombang seismik disebabkan aliran induksi gelombang (Pride dkk, 2004). Model ini menjelaskan pelemahan gelombang pada perbedaan spasi dan skala yang temporal. Model yang menjelaskan mekanisme yang dominan pada frekuensi lemah dengan *range* antara 1 dan 10 Hz adalah model dengan setengah kejenuhan atau sering disebut *patchy saturation model* (white dkk, 1975; Gurevich and Lopatnikov, 1995; Johnson, 2001). Frekuensi tergantung pada pelemahan yang bisa menghasilkan anomali spektral yang sama untuk mengamati tanda mikrotremor hidrokarbon.

3. Resonansi Amplifikasi

Efek resonansi amplifikasi dari *ambient* gangguan seismik adalah cara untuk menjelaskan keberadaan mikrotremor hidrokarbon. Efek ini akan bertindak sebagai suatu sumber (*driven source*) dan ini didukung oleh observasi berikutnya (Dangel dkk, 2003):

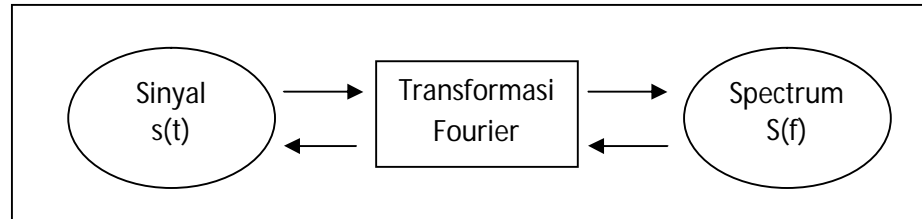
1. Daerah frekuensi sempit dengan range (1,5 sampai 4 Hz).
2. Gaya mutlak rata-rata proporsional dengan ketebalan lapisan pori-pori dari resevoir hidrokarbon.
3. Uji coba dengan menggunakan sensor yang peka menunjukkan bahwa tanda yang menyebabkan anomali berasal dari arah reservoir.

Penyebab terjadinya anomali spektral adalah resonansi amplifikasi yang terjadi di dapat membandingkan antara batuan pori reservoir dengan media yang melingkupinya

(Suryanto dan Wahyudi, 2008).

3.5 Transformasi Fourier

Transformasi Fourier adalah suatu operasi matematika yang mengubah sinyal menjadi spektrum (Munadi, 2003).



Gambar 3.6 Prinsip Transformasi Fourier (Munadi, 2003)

Andaikan sinyal masukan diberi nama $s(t)$ dan spektrum sinyal $S(f)$, maka transformasi fourier langsung dari domain waktu ke domain frekuensi adalah :

$$s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (3)$$

Sedangkan transformasi Fourier balik dari domain frekuensi ke domain waktu adalah :

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(f) e^{-2\pi f t} df \quad (4)$$

$s(t)$ dan $S(f)$ disebut juga pasangan transformasi fourier. Jika kita perhatikan dengan mengingat dalil *de moivre* :

$$e^{-j\theta} = \cos \theta - j \sin \theta \quad (5)$$

Maka persamaan (3) dapat diubah menjadi :

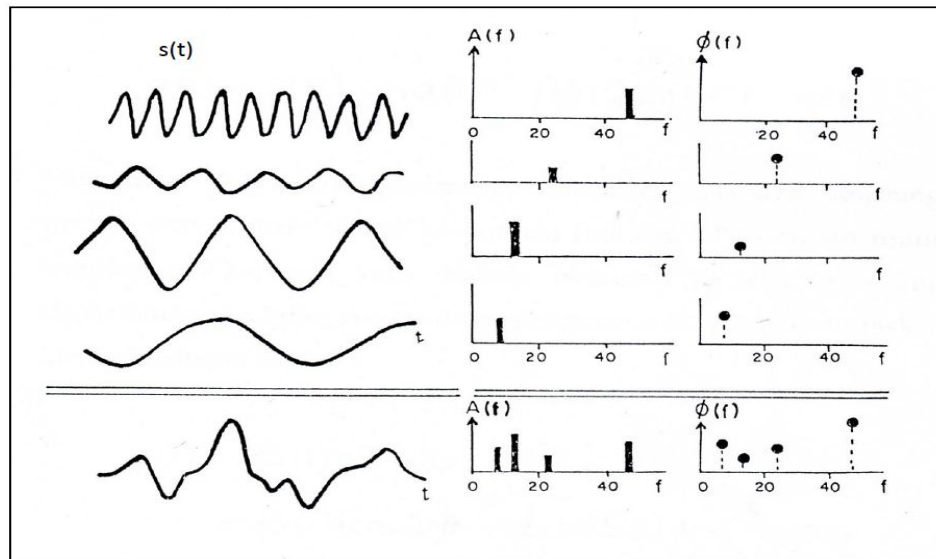
$$s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cos 2\pi f t dt - j \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sin 2\pi f t dt \quad (6)$$

$$= Re(f) - jI_m(f) \quad (7)$$

Jadi spektrum sinyal $s(t)$ yakni $S(f)$ ternyata terdiri atas bagian riil yakni $Re(f)$ dan bagian imajiner yakni $I_m(f)$ karena spektrum fasa.

$$\phi(f) = \arctg \left[\frac{Im(f)}{Re(f)} \right] \quad (8)$$

Ini berarti untuk mendefinisikan sinyal $s(t)$ diperlukan tidak hanya spektrum amplitudo, tetapi juga spektrum fasa (**Gambar 3.7**)

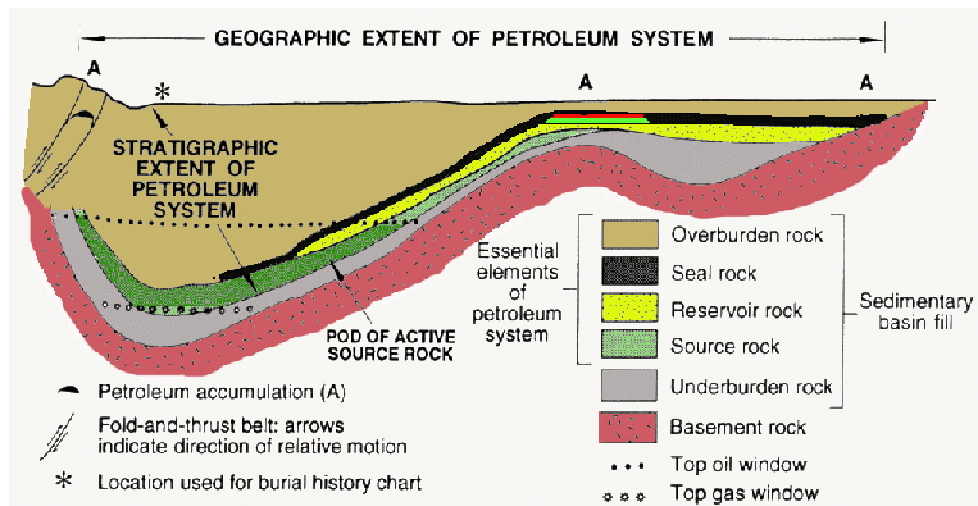


Gambar 3.7. Untuk mendefinisikan $s(t)$ di domain frekuensi diperlukan $A(f)$ dan $\Phi(f)$ (Munadi, 2003)

3.6 Petroleum Sistem

Berikut merupakan penyusun sistem petroleum :

1. *Source Rock*
2. *Generation (Maturity)*
3. *Migration Path*
4. *Trap*
5. *Reservoir Rock*
6. *Seal (Cap Rock)*



Gambar 3.8 Komponen Sistem Petroleum (Magoon, 1995)

1. *Source Rock*

Merupakan endapan sedimen yang mengandung bahan-bahan organik yang cukup untuk dapat menghasilkan minyak dan gas bumi ketika endapan tersebut tertimbun dan terpanaskan, dan dapat mengeluarkan minyak dan gas bumi tersebut dalam jumlah yang ekonomis. Bahan organik yang terkandung disebut kerogen. Kerogen memiliki 4 tipe yaitu:

Tipe 1

Alga dari lingkungan pengendapan *lacustrine* dan *lagoon*. Tipe seperti ini dapat menghasilkan minyak dengan kualitas baik dan mampu menghasilkan gas.

Tipe 2

Campuran dari tumbuhan dan mikroorganisme laut. Tipe seperti ini merupakan bahan utama minyak dan gas bumi.

Tipe 3

Tanaman darat dalam endapan yang mengandung batubara. Tipe seperti ini umumnya menghasilkan gas dan sedikit minyak.

Tipe 4

Bahan bahan tanaman yang teroksidasi. Tipe seperti ini tidak mampu menghasilkan minyak dan gas.

2. Maturity (Kematangan)

Maturity pada batuan merupakan proses pematangan minyak bumi yang dipengaruhi oleh tekanan dan gradien geotermal.

3. Migrasi

Proses transportasi minyak dan gas dari batuan sumber menuju reservoir. Dalam transportasi hidrokarbon terjadi beberapa proses yaitu:

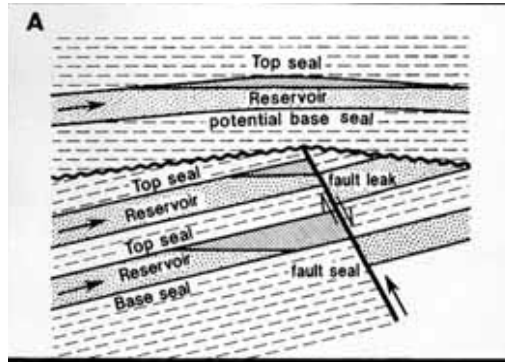
- Migrasi primer = Migrasi didalam skuen dari *Source Rock*
- Ekspulsion = Dari sekuen *Source Rock* menuju *carrier bed*
- Migrasi Sekunder = Transportasi *carrier bed* menuju menuju ke *trap*

4. Trap (Perangkap)

Perangkap unsur pembentuk reservoir yang bentuknya sedemikian rupa sehingga lapisan & penutupnya merupakan bentuk konkaf ke bawah yang menyebabkan migas berada di bagian atas reservoir. Adapun tipe perangkap yaitu:

a. Perangkap Struktural

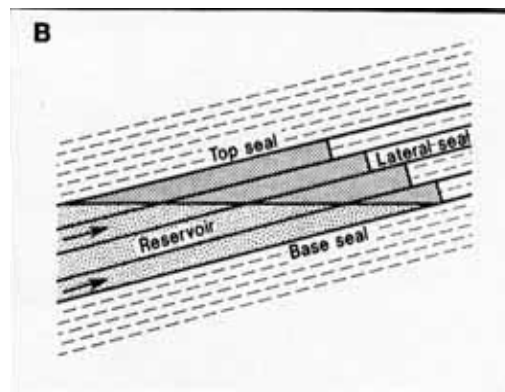
Perangkap dipengaruhi oleh kejadian deformasi perlapisan dengan terbentuknya struktur lipatan dan patahan yang merupakan respon dari kejadian tektonik dan merupakan perangkap yang paling asli dan perangkap yang paling penting.



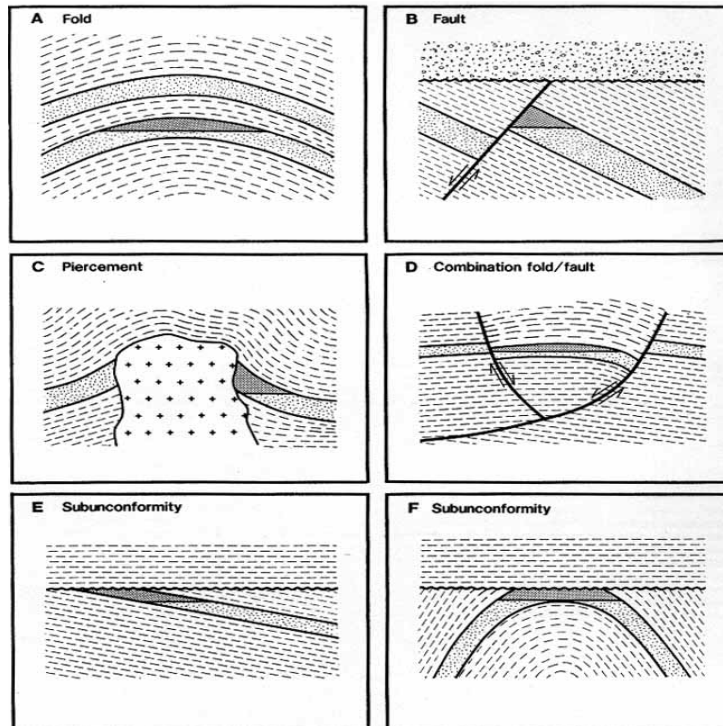
Gambar 3.9. Perangkap Struktural (Magoon, 1995).

b. Perangkap Stratigrafi

Perangkap yang dipengaruhi oleh variasi perlapisan secara vertikal dan lateral, perubahan facies batuan dan ketidakselarasan dan variasi lateral dalam litologi pada suatu lapisan reservoir dalam perpindahan minyak bumi.



Gambar3.10. Perangkap Stratigrafi (Magoon, 1995).



Gambar 3.11. Klasifikasi *trap* (perangkap) (Magoon, 1995).

c. Perangkap Kombinasi

Kombinasi antara struktural dan stratigrafi. Dimana pada perangkap jenis ini merupakan faktor bersama dalam membatasi Bergeraknya atau menjebak minyak bumi. Perangkap kombinasi ini terdapat pada gambar 2.9 gambar D.

5. Batuan *Reservoir*

Batuan reservoir merupakan batuan yang mampu menyimpan dan meloloskan fluida (migas), contoh: pasir & gamping (Magoon, 1995).

6. Lapisan Penutup (*Cap Rock*)

Lapisan penutup (*cap rock*) adalah batuan yang mampu mencegah fluida untuk lolos, contoh : *seal* atau lempung (Magoon, 1995).