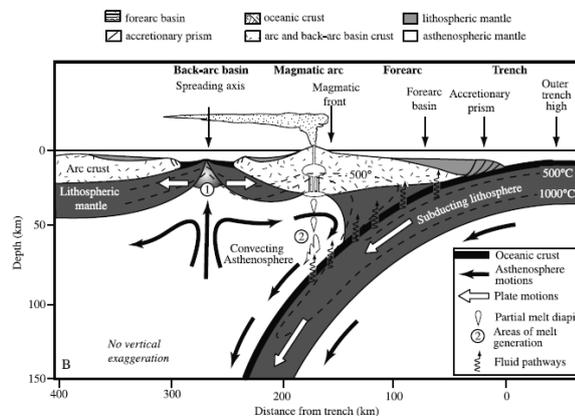


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sesar Semangko Selat Sunda

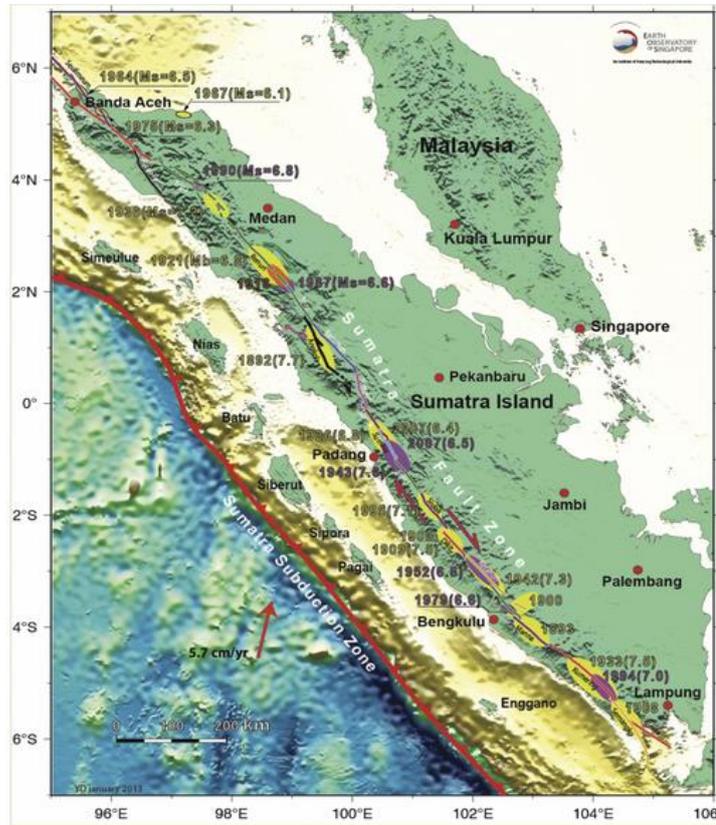
Selat Sunda terletak pada wilayah transisi dari segmen zona penunjaman normal di Pulau Jawa ke zona benturan miring di Pulau Sumatra, dengan kedalaman gempa tektonik sampai dengan 250 km dan kecepatan 7.7 cm/tahun. Daerah ini sangat terbebani oleh perubahan pola sesar mendatar yang lebih cepat ke arah Andaman, ke gerak normal di Jawa [6]. Oleh karena itu daerah ini berkecenderungan bentangan dan perluasan Selat Sunda, lebih didominasi oleh suatu deformasi lokal seperti di antaranya gerak graben dan sejumlah patahan normal. Lajur kemiringan gempa mencapai 350 km dan kesenjangan terjadi pada kedalaman 200 km [11]. Maksimum magnitudo gempa dari aktivitas penunjaman di Selat Sunda mencapai 7.9 Mw pada kedalaman 80 km [12]. Pada zona subduksi ini (Gambar 2.1), pada tanggal 24 November 1833 berdasarkan catatan sejarah pernah terjadi gempa bumi sebesar 8.8 M yang bersifat destruktif sehingga menimbulkan tsunami. Selain zona subduksi, deformasi di Selat Sunda juga ditimbulkan oleh sumber gempa lain yaitu zona Patahan Sumatra yang masuk kedalam segmen Selat Sunda, di mana patahan ini bergerak ke arah kanan (*dextral*) dengan panjang kira-kira 1900 km.



Gambar 2. 1 Skematik zona subduksi [13]

Wilayah Sumatera mempunyai kondisi tektonik yang paling aktif di sepanjang busur Sunda. *Slab* subduksi di Sumatera berusia lebih muda (49-96 Ma) dan mempunyai sudut penunjaman yang lebih landai yaitu 30° (kedalaman slab sekitar 250 km) dari pada *slab* subduksi di selatan Jawa hingga Nusa Tenggara (96-134 Ma) serta mempunyai kedalaman slab mencapai 670 km dan sudut penunjaman hingga sebesar 60° [14]. Dari gambaran hasil penampang vertikal dapat dilihat untuk sudut penunjaman subduksi di Sumatera bagian selatan dari utara ke selatan terlihat semakin curam karena sebenarnya usia dari zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia semakin ke selatan semakin tua dan tidak mudah patah sehingga tingkat kegempaan yang terjadi dan gempa yang paling dalam tersebut terjadi pada lempeng yang menunjam pertama kali dan lebih dulu masuk ke dalam lempeng yang ditunjam [15]. Sedangkan semakin ke utara terlihat semakin landai karena usia dari zona subduksi nya lebih muda dan lebih rapuh serta mudah mengalami gesekan sehingga tingkat kegempaan yang terjadi lebih banyak terjadi. Karena semakin ke utara maka lempeng tersebut menunjam lebih akhir sehingga lebih dangkal dibandingkan lempeng di selatan yang lebih dalam. Dari zona penunjaman dan subduksi lempeng akhirnya dapat menggambarkan aktivitas gempa yang terjadi [15]. Salah satu hal yang berpengaruh terhadap sudut penunjaman adalah umur dari kerak bumi yang membentuk zona subduksi. Interaksi dari zona subduksi ini menimbulkan beberapa Gunung Api aktif (dari Banda Aceh di ujung Barat Laut sampai dengan Kota Agung di ujung Tenggara, representasi dari aktivitas tektonik ini adalah terbentuknya pegunungan Bukit Barisan yang merupakan perwujudan dari Patahan Sumatra. Berdasarkan kenampakan morfologinya Patahan Sumatra terbagi dalam tiga segmen yaitu : segmen Utara, Tengah dan Selatan. Selat Sunda termasuk dalam segmen selatan (*southern domain*) [3]. Zona deformasi yang terdapat dalam Selat Sunda dibatasi (Gambar 2.2) di bagian Barat Daya Jawa Barat oleh batuan vulkanik andesit pada masa Miosen sampai ke Barat bukit-bukit yang dibatasi oleh garis pantai, di sebelah Timur bukit-bukit berada dalam sedimen Pliosen

Neritik, Di sebelah Utara, sedimen Pliosen secara ekstensif tercakup pada masa Kuartar (0.02 Ma). Di ujung Selatan Sumatra terdapat pantai curam di sekitar Teluk Semangko dan Lampung adalah dikendalikan oleh Patahan Sumatra [12].



Gambar 2. 2 Sesar Sumatra [4]

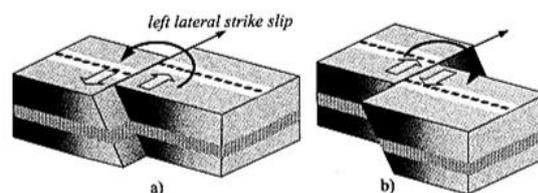
2.2 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran pada bumi yang disebabkan oleh tumbukan. Tumbukan tersebut dapat terjadi oleh beberapa hal, di antaranya interaksi antar lempeng bumi, patahan aktif aktivitas gunung api, atau runtuhannya batuan. Kekuatan gempa yang disebabkan aktifitas gunung api dan runtuhannya batuan relatif kecil dibandingkan akibat tumbukan antar lempeng bumi dan patahan aktif. Gempa bumi adalah perambatan energi pada medium rambat batuan atau lapisan batuan. Gempa bumi terjadi ketika lempeng samudra dengan rapat massa lebih besar bertumbukkan dengan lempeng benua di zona tumbukan (subduksi) dan menyusup ke bawah. Gerakan tersebut mengalami perlambatan akibat gesekan dari selubung bumi dan menyebabkan

penumpukkan energi di zona subduksi dan patahan, sehingga terjadi tekanan, tarikan, dan getaran. Pada saat batas elastisitas lempeng terlampaui terjadi patahan batuan yang diikuti lepasnya energi secara tiba-tiba pada *slab* (penunjaman) sehingga terbentuk bidang gempa sepanjang proses tersebut. Proses ini menimbulkan getaran partikel ke segala arah yang disebut gelombang gempa bumi. Pengelompokan gempa berdasarkan kedalaman fokal terbagi menjadi 3 kelompok, yakni gempa dangkal dengan pusat kurang dari 60 km, gempa menengah dengan pusat antara 60 sampai 300 km, dan gempa dalam dengan pusat lebih dari 300 km. Berdasarkan episenter gempa terbagi menjadi dua yaitu episenter linier dan sentral, di mana episenter linier adalah gempa dengan episentrum berbentuk garis yang berasal dari sumber gempa yaitu garis linier akibat patahan, sedangkan gempa sentral adalah gempa dengan episentrum berbentuk titik yang berasal dari gempa vulkanik dan gempa runtuh. Dan berdasarkan kekuatan gempa atau besarnya energi yang dilepaskan oleh sumber gempa (magnitudo) diukur dengan satuan *Skala Richter* (SR) terbagi menjadi 4 kelompok, yakni gempa lemah dengan *magnitudo* kurang dari 3.5 SR, gempa sedang dengan *magnitudo* antara 3.5 SR hingga 5.5 SR, gempa kuat dengan *magnitudo* antara 5.5 SR hingga 7 SR, dan gempa kuat dengan *magnitudo* lebih dari 7 SR. Sedangkan skala intensitas gempa diukur melalui MMI (*Modified Mercally Intensity*) berskala I-XII [16, 17]. Secara umum pergerakan lempeng digolongkan dalam 3 jenis yaitu :

a. Sesar Mendatar

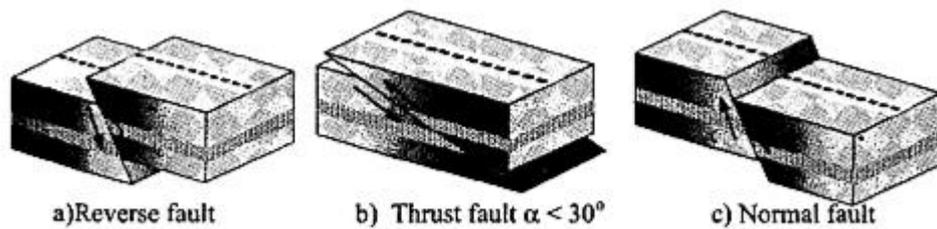
Sesar mendatar adalah patahan yang mana massa batuan menggeser secara horizontal, patahan ini terjadi akibat dua lempeng tektonik atau dua massa batuan yang bergerak horizontal secara berlawanan (Gambar 2.3).



Gambar 2. 3 Sesar Mendatar [18]

b. Sesar Menaik Turun

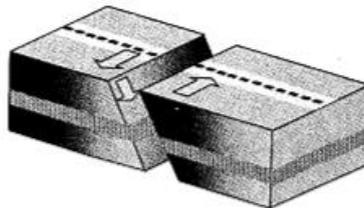
Sesar mendatar massa batuan searah dengan *strike vector* (mendatar), maka pada *dip-slip*, slipnya massa batuan akan searah dengan *dip vector* (*slip* ke atas/kebawah). Slip jenis ini dikategorikan menjadi dua hal pokok yaitu slip akibat gaya desak (*compression stress*) dan *slip* akibat gaya tarik (*tension stress*) pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. *Reverse, Thrust dan Normal Fault* [18]

c. Sesar Miring

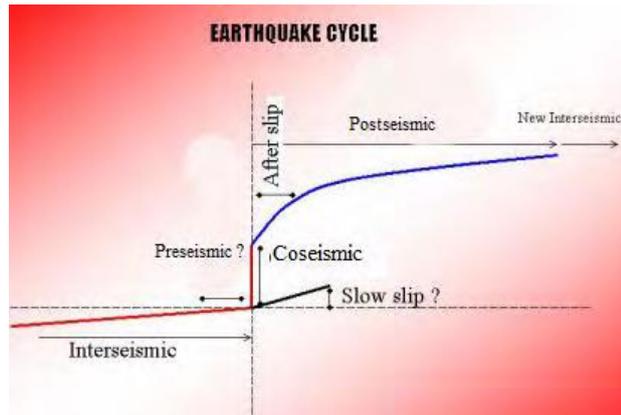
Pada gambar 2.5 merupakan kombinasi antara sesar mendatar dengan sesar menaik turun. Patahan kombinasi ini umumnya disebut *oblique fault* (OF).



Gambar 2. 5 Sesar Miring [18]

2.3 Siklus Gempa

Gempa bumi mempunyai sifat berulang, perulangan gempa bumi ini dinamakan siklus gempa. Satu siklus berlangsung dalam kurun waktu seratusan tahun. Dalam satu siklus gempa terdapat beberapa tahapan mekanisme terjadinya gempa bumi: fase *interseismi*, *preseismic*, *coseismic*, dan *postseismic*.



Gambar 2. 6 Ilustrasi Siklus Gempa pada Zona Subduksi [19]

Tahapan interseismic merupakan tahapan awal dari suatu siklus gempa bumi. Pada tahap ini, arus konveksi di lapisan dalam bumi menyebabkan pergerakan lempeng sehingga menimbulkan akumulasi energi di tempat batas antara dua lempeng, tempat biasanya terjadi gempa bumi. Koseismik merupakan fase pada saat terjadinya gempa yang terjadi akibat adanya tumbukan pada zona subduksi (Gambar 2.6). Ketika energi deformasi lebih besar dari gaya gesek antar lempeng, maka terjadinya fase *coseismic* dari gempa bumi: bagian lempeng tergeser atau terdeformasi secara tiba-tiba (*coseismic deformation*) diiringi getaran yang kuat di permukaan bumi. *Coseismic* vektor berlawanan arah dengan *interseismic* vektor. Sedangkan tahapan *postseismic* merupakan tahapan ketika sisa-sisa energi gempa bumi terlepas secara perlahan dalam kurun waktu tertentu sampai kembali ke tahap kesetimbangan awal yang baru [19]. Penentuan nilai pergeseran dapat menggunakan pengamatan GNSS secara episodik maupun kontinu untuk mendapatkan nilai dengan tingkat ketelitian akurasi dan presisi yang baik dengan mengkombinasikan deret waktu koordinat [20].

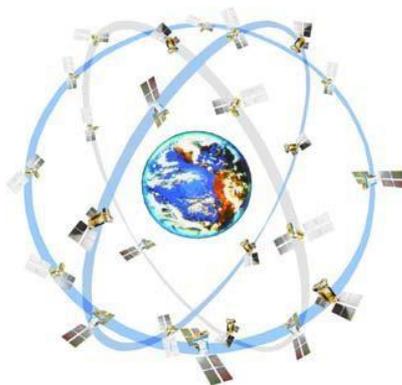
2.4 Pengamatan *Global Navigation Satellite System* (GNSS)

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) adalah suatu sistem satelit yang terdiri dari konstelasi satelit yang menyediakan informasi waktu dan lokasi, memancarkan macam-macam sinar dalam berbagai frekuensi secara terus-menerus, yang tedia di semua lokasi di atas permukaan bumi. GNSS memiliki peranan penting dalam navigasi. GNSS yang ada saat ini adalah

GPS (*Global Positioning System*) yang dimiliki dan dikelola oleh Amerika Serikat, GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) milik Rusia, Galileo milik Uni Eropa, dan Compass atau Beidou milik Cina. India dan Jepang telah mengembangkan kemampuan GNSS regional dengan meluncurkan sejumlah satelit ke antariksa untuk menambah kemampuan yang sudah disediakan oleh sistem global dalam menyediakan tambahan cakupan regional [21].

GPS (*Global Positioning System*) adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi yang dimiliki dan dikelola oleh Amerika Serikat. Sistem ini didesain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga dimensi serta informasi mengenai waktu, secara kontinu di seluruh dunia tanpa bergantung waktu dan cuaca, dan bagi banyak orang secara simultan. Saat ini GPS sudah banyak digunakan orang di seluruh dunia dalam berbagai bidang aplikasi yang menuntut informasi tentang posisi, kecepatan, percepatan ataupun waktu yang teliti. GPS dapat memberikan informasi posisi dengan ketelitian bervariasi dari beberapa millimeter (orde nol) sampai dengan puluhan meter [22]. Beberapa kemampuan GPS antara lain dapat memberikan informasi tentang posisi, kecepatan, dan waktu secara cepat, akurat, murah, di mana saja di bumi ini tanpa tergantung cuaca. Hal yang perlu dicatat bahwa GPS adalah satu-satunya sistem navigasi ataupun sistem penentuan posisi dalam beberapa abad ini yang memiliki kemampuan handal seperti itu [22]. Pesan navigasi ditransmisikan dari satelit ke pengguna dan memberikan pengenalan satelit bersama dengan informasi tentang kondisi satelit, prediksi akurasi jarak, koefisien koreksi ionosfer dan jam serta orbital ephemeris untuk memungkinkan penerima menghitung posisi satelit. Pesan tersebut juga berisi referensi yang memberikan status, lokasi dan informasi pengenalan semua satelit dalam konstelasi tersebut [21].

Gambar 2.7 merupakan Konstelasi satelit GLONASS yang terdiri dari 24 satelit yang tersebar dalam 3 orbit, yang melingkari bumi dengan sudut kemiringan $64,8^\circ$ terhadap equator. Ketinggian dari orbit ini adalah 19.100 km. Periode orbit masing-masing satelit adalah 11 jam, 15 menit, 45 detik.

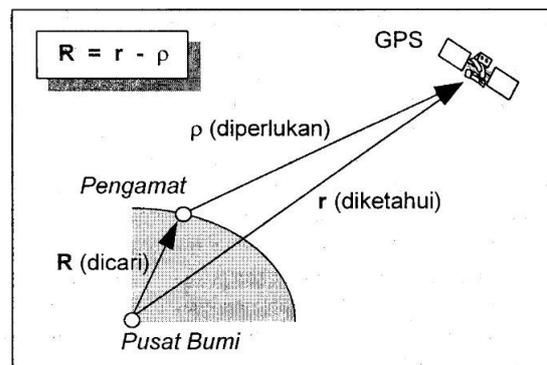


Gambar 2. 7 Konstelasi satelit [21]

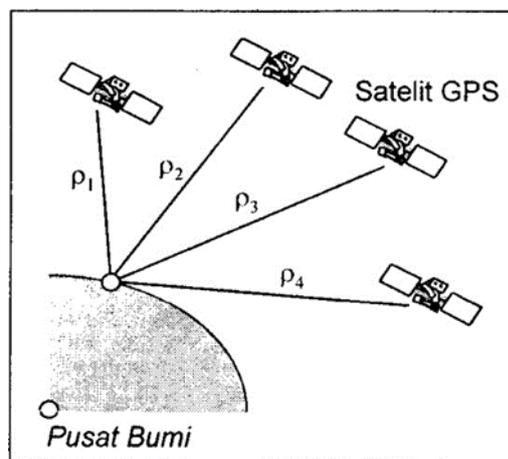
Pergerakan bumi yang dinamis menghasilkan deformasi yang terjadi pada lempeng. Pergerakan yang terjadi pada distribusi titik pengamatan di atas permukaan bumi dalam rentang waktu tertentu sehingga menghasilkan nilai tertentu. Analisis deformasi digunakan untuk menentukan kuantitas pergeseran dan parameternya yang mempunyai ciri khas dan karakteristik dalam ruang dan waktu dan dimanifestasikan dengan pergeseran koordinat suatu titik pengamatan yang dilakukan secara episodik dan kontinyu. Dalam studi deformasi akibat pergerakan kerak bumi, perubahan posisi titik pengamatan adalah perubahan atau pergerakan titik-titik pengamatan yang diletakkan di sekitar daerah-daerah patahan aktif yang diperkirakan berpotensi terjadi gempa bumi. Penggunaan dua *receiver* GPS atau lebih secara statik (*static differential*) akan memberikan hasil kualitas ketelitian yang tinggi. Salah satu metode yang diterapkan guna melihat deformasi adalah menggunakan pengamatan GPS baik secara episodik maupun kontinyu yang memiliki ketelitian dan presisi yang tinggi hingga beberapa milimeter. Dasar dari aplikasi GPS untuk geodinamika adalah perhitungan perbedaan koordinat dari titik GPS dari waktu ke waktu [22]. Data GPS *campaign* dan pengamatan berkelanjutan di Sumatra selatan digunakan sebagai alat untuk menganalisis deformasi kerak di Sumatra selatan. Setelah menghilangkan efek GSF (*Great Sumatran Fault*), semua stasiun GPS mengalami arah barat laut-bangsang yang sesuai dengan deformasi postseismik dari gempa Bengkulu 2007 dan gempa bumi Samudra Hindia 2012 [23].

2.4.1 Penentuan Posisi Dengan GNSS

Pada dasarnya konsep dasar penentuan posisi dengan GPS adalah reseksi (pengikatan ke belakang) dengan jarak: dengan pengukuran jarak secara simultan ke beberapa satelit GPS [24]. Prinsip dasar penentuan posisi dengan GPS diperlihatkan oleh gambar 2.9. parameter yang akan ditentukan adalah vektor posisi geosentrik pengamat (R). Sedangkan vektor posisi geosentrik satelit GPS (r) diketahui, maka perlu dilakukan pengukuran untuk mendapatkan posisi toposentris satelit terhadap pengamat (ρ). Namun pada pengukuran dengan GPS hanya bisa didapatkan jarak antara satelit dengan pengamat, sehingga rumus pada Gambar 2.8 tidak dapat diterapkan. Sehingga perlu dilakukan pengamatan pada beberapa satelit secara simultan seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 8 Prinsip Dasar Penentuan Posisi Dengan GPS [24]



Gambar 2. 9 Prinsip Pengamatan Beberapa Satelit [24]

Pada penentuan koordinat kartesian 3D dari suatu pengamat (X_p, Y_p, Z_p) dengan menggunakan metode penentuan posisi absolut, pengamat pada dasarnya mengukur jarak (ρ) ke beberapa satelit yang sudah diketahui koordinatnya (X_i, Y_i, Z_i). Seperti pada gambar 2.9, maka ada empat persamaan rumus 2.1 yang disusun untuk pengamatan jarak ke empat satelit GPS.

$$\sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2} + c \cdot dt = p_i \quad (2.1)$$

Dengan c adalah kecepatan cahaya dan dt adalah kesalahan dan *offset* dari jam *receiver*. Pada persamaan di atas, ada empat parameter yang harus ditentukan/diestimasi yaitu :

1. koordinat pengamat (X_P, Y_P, Z_P).
2. kesalahan dan *offset* dari jam receiver GPS (dt).

Oleh sebab itu, untuk penentuan posisi 3D pada satu epok dengan menggunakan data *pseudorange* diperlukan minimal pengamatan ke empat buah satelit GPS.

2.4.2 Data Pengamatan GNSS

Data pengamatan dasar GPS adalah waktu tempuh (Δt) dari kode – kode P dan C/A serta fase (*carrier phase*, ϕ) dari gelombang pembawa L1 dan L2. Pengiriman sinyal GPS disertai dengan informasi tentang kedudukan satelit serta jarak satelit tersebut ke pengamat. Selain itu sinyal GPS mengirimkan informasi pendukung lainnya seperti parameter koreksi jam satelit, parameter model ionosfer, transformasi waktu dari GPS ke UTC dan konstelasi satelit.

Pada dasarnya ada 3 komponen sinyal GPS yaitu:

1. Jarak berupa kode P(Y) dan C/A.
2. Posisi satelit dalam *navigation message*.
3. Gelombang pembawa (*carrier wave*) L1 dan L2.

Pada kegiatan pengamatan, dapat diamati sebagian atau seluruh jenis pengamatan tersebut tergantung pada jenis dan tipe alat penerima sinyal

GPS yang digunakan [25]. Hasil pengamatan tersebut terkait dengan posisi pengamatan (x,y,z) serta parameter – parameter lainnya melalui hubungan yang diformulasikan pada persamaan *pseudorange* ditunjukkan pada 2.2 dan persamaan fase ditunjukkan pada 2.3.

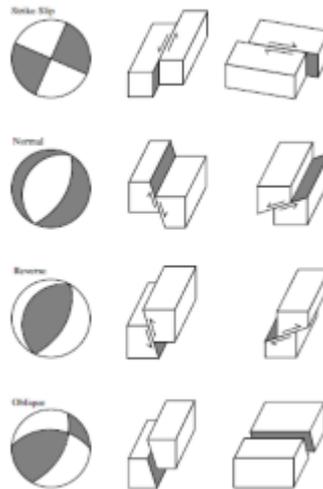
$$P_i = \rho + d\rho + dtrop + dion_i + (dt - dT) + MP_i + \vartheta P_i \quad (2.2)$$

$$L_i = \rho + d\rho + dtrop - dion_i + (dt - dT) + MC_i - \lambda_i \cdot N_i + \vartheta C_i \quad (2.3)$$

Dengan P_i adalah *pseudorange* pada frekuensi f_i (m), ($I = 1,2$); L_i adalah jarak fase; P adalah jarak geometris antara pengamatan; c adalah kecepatan cahaya (m/s); λ adalah Panjang gelombang; $d\rho$ adalah kesalahan jarak yang disebabkan oleh kesalahan *ephemeris* (orbit); $dtrop$ adalah bias yang disebabkan oleh refraksi troposfer (m); $dion_i$ adalah bias yang disebabkan oleh refraksi ionosfer (m); dt, dT adalah kesalahan dan *offset* dari jam *receiver* dan jam satelit (m); MP_i, MC_i adalah efek *multipath* pada hasil pengamatan P_i dan L_i (m); N adalah ambiguitas fase dari fase sinyal; $\vartheta P_i, \vartheta C_i$ adalah gangguan (*noise*) pada hasil pengamatan (m).

2.5 Fokal Mekanisme

Fokal mekanisme adalah visualisasi dari pergerakan lempeng bumi yang digambarkan dalam bentuk diagram bola atau *beachball* berdasarkan pergerakan arah lempeng secara horizontal atau vertikal maupun keduanya (Gambar 2.10). Bentuk gelombang seismik juga tergantung dari sumber gempa yang berupa sesar atau patahan. Oleh karena itu dengan informasi gelombang seismik yang tercatat di dalam seismogram dapat ditentukan karakteristik sesar atau patahannya. Untuk mengetahui karakteristik tersebut diperlukan analisis tentang mekanisme pusat gempa bumi yaitu penentuan orientasi bidang sesar yang antara lain meliputi penentuan harga *strike* dan *dip* [26].



Gambar 2. 10 Focal Sphere Sesar [27]

2.7 Perhitungan Vektor Pergeseran

Perhitungan arah pergeseran digunakan untuk mengetahui nilai pergeseran gempa yang terjadi. Vektor pergeseran adalah besaran yang menyatakan perubahan suatu titik pengamatan dalam selang waktu tertentu, sehingga bisa menjadi indikator terjadinya deformasi di daerah pengamatan. Dalam hal ini menggunakan metode *linear fit* persamaan 2.4.

$$y = ax + b \quad (2.4)$$

Dengan y adalah data pada waktu pengamatan GNSS, Di mana x adalah waktu pengamatan, kemudian a dan b merupakan nilai yang ditentukan dengan menggunakan metode kuadrat terkecil yang ditunjukkan pada persamaan 2.5 sampai 2.15.

$$T = \begin{bmatrix} n \\ e \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$V = BX + F \quad (2.6)$$

$$X = (B^T PB)^{-1} B^T PL \quad (2.7)$$

$$X = \begin{bmatrix} v \\ a \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$B = \begin{bmatrix} Y_1 & 1 \\ Y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ Y_n & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$L = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$P = \sigma_a / \begin{bmatrix} \sigma_{T_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{T_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{T_n} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$V = BX - L \quad (2.12)$$

$$\sigma_o = \frac{V^T P V}{n-1} \quad (2.13)$$

$$Q_{xx} = (B^T P B)^{-1} \quad (2.14)$$

$$\Sigma_{xx} = \sigma_{apos} \times Q_{xx} \quad (2.15)$$

Dengan T merupakan koordinat toposentrik; V adalah matriks persamaan dasar; X adalah desain matriks parameter yang tidak diketahui untuk perataan kuadrat terkecil; L adalah matriks parameter yang diketahui untuk perataan kuadrat terkecil; P adalah matriks bobot untuk penyesuaian kuadrat terkecil; V adalah nilai sisa matriks; σ_o adalah nilai apriori; σ_T adalah standar deviasi dari koordinat toposentrik.

Vektor pegeseran dari setiap stasiun pengamatan merupakan sistem koordinat toposentrik *North, East, Up* (n, e, u) yang sumbunya berpusat di permukaan bumi sehingga pergeseran di permukaan bumi dapat terlihat. Adapun karena sistem koordinat hasil pengolahan data GPS adalah sistem koordinat geosentrik (X, Y, Z), maka perlu dilakukan transformasi dengan rumus transformasi yang ditunjukkan pada persamaan 2.16 sampai 2.18 [28].

$$\begin{bmatrix} np \\ ep \\ up \end{bmatrix} = R(\varphi_o, \lambda_o) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Xp - Xo \\ Yp - Yo \\ Zp - Zo \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

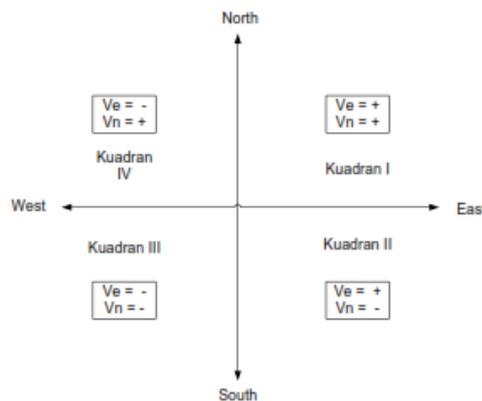
$$R(\varphi_0, \lambda_0) = \begin{pmatrix} -\sin\varphi_0 \cos\lambda_0 & -\sin\varphi_0 \sin\lambda_0 & \cos\varphi_0 \\ \sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ \cos\varphi_0 \cos\lambda_0 & \cos\varphi_0 \sin\lambda_0 & \sin\varphi_0 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Dengan koordinat n_p, e_p, u_p adalah koordinat toposentrik pada titik P; (φ_0, λ_0) adalah koordinat geodetik bujur dan lintang pada titik ikat; X_0, Y_0, Z_0 adalah koordinat geosentrik titik ikat (0,0,0); X_p, Y_p, Z_p adalah koordinat geosentrik titik yang akan ditentukan; sedangkan $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ adalah selisih koordinat geosentrik titik ikat dan titik yang akan ditentukan R adalah matriks rotasi.

Dalam menentukan arah vektor pergeseran (α) persamaan 2.19 ditentukan dengan nilai pergeseran yang diketahui dari menghitung parameter V_n dan V_e .

$$\alpha = \arctan \frac{V_e}{V_n} \quad (2.19)$$

Menentukan arah vektor pergeseran dapat diilustrasikan dengan berdasarkan nilai positif (+) dan negative (-) parameter V_n dan V_e yang ditunjukkan dalam gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Kuadran Arah Vektor Pergeseran

2.8 Uji Statistik

Outlier adalah data yang menyimpang terlalu jauh dengan data lainnya pada suatu rangkaian data, sehingga menyebabkan bias pada analisa data karena data outlier tidak menggambarkan kondisi sebenarnya. Fungsi dari uji statistik ini adalah mendeteksi dan menghilangkan data pengamatan GNSS yang *outlier* berdasarkan data deret waktu koordinat dengan melakukan uji

statistik. Menghilangkan *outlier* bertujuan untuk meningkatkan kualitas data sehingga memberikan hasil yang lebih baik. Menghilangkan outliers dapat dilakukan dengan menghitung rata-rata dan standard deviasi dari data [29]. Penelitian ini menggunakan selang kepercayaan (*Level of Confidence*) sebesar 95%. Uji statistik ini dilakukan dengan cara menguji variabel pergeseran titik (P) yang dimana nilainya dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2.20.

$$P = \sqrt{dn^2 + de^2} \quad (2.20)$$

Dengan P adalah variabel pergeseran titik; *dn* adalah vektor komponen utara-selatan; *de* adalah vektor komponen timur-barat. Penentuan nilai standar deviasi diketahui dengan selisih rata-rata nilai sesudah terjadi gempa dan sebelum terjadi gempa pada rumus 2.21 pada utara-selatan dan 2.22 pada timur-barat.

$$Std_n = \sqrt{Std_{nb}^2 - Std_{na}^2} \quad (2.21)$$

$$Std_e = \sqrt{Std_{eb}^2 - Std_{ea}^2} \quad (2.22)$$

Dengan *Std_{nb}* adalah nilai standar deviasi titik utara-selatan pada sesudah gempa; *Std_{na}* adalah nilai standar deviasi titik utara-selatan pada sebelum gempa; *Std_{eb}* adalah nilai standar deviasi titik timur-barat pada sesudah gempa; *Std_{ea}* adalah nilai standar deviasi titik timur-barat pada sebelum gempa; Kemudian menentukan nilai standar deviasi dari nilai P (*stdP*) dihitung dengan menggunakan persamaan 2.23.

$$StdP = \sqrt{Std_n^2 + Std_e^2} \quad (2.23)$$

Dengan *StdP* adalah Standar deviasi resultan; *Std_n* adalah Standar deviasi komponen utara-selatan; *Std_e* adalah Standar deviasi komponen timur-barat.

Uji hipotesis apabila $P = 0$ menunjukkan bahwa pergeseran titik tidak signifikan, sedangkan apabila $P \neq 0$ menunjukkan bahwa pergeseran titik yang terjadi cukup signifikan. Rumus 2.24 digunakan untuk melakukan pengujian statistik.

$$T = \frac{P}{StdP} \quad (2.24)$$

Dengan T merupakan besaran nilai yang menunjukkan signifikan tidaknya pergeseran yang terjadi. Persamaan 2.25 menyatakan pergeseran signifikan atau hipotesa nol ditolak [30].

$$T > t_{df,\alpha/2} \quad (2.25)$$

Dengan df adalah derajat kebebasan dan α adalah level signifikan yang digunakan untuk uji statistik. df diasumsikan tak hingga karena data pengamatan titik yang digunakan banyak dengan nilai $T > t_{df,\alpha/2}$ adalah 1,96.