

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gempa Bumi dan Teori Deformasi**

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempa bumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi [5].

Gempa bumi terjadi karena kekuatan tektonik lempeng memberikan sumber tekanan. Sebuah tekanan dalam arti ilmiah adalah kekuatan yang ada daerah tertentu. Gempa bumi terjadi di sepanjang pra-zona yang memiliki regangan yang dikenal sebagai sesar. Sesar mewakili zona yang memiliki regangan dalam kerak bumi, zona sepanjang gerakan yang akan cenderung ditampung, bahkan jika sesar tidak sempurna sejajar dengan kekuatan pendorong. Tekanan menyebabkan akumulasi ketegangan karena banyak sesar tidak dapat mengakomodasi tekanan. Ketika tekanan menguasai kapasitas suatu sesar untuk menolaknya, slip terjadi di sepanjang sesar secara mendadak disebut gempa [6].

Pergerakan lempeng tektonik menyebabkan proses dimana batuan secara fisik berubah bentuk sebagai tekanan pada lempeng tektonik. Deformasi adalah perubahan bentuk, dimensi dan posisi material dalam skala ruang dan waktu karena kekuatan. Untuk memahami deformasi interseismik karena interaksi lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia di Sumatera Selatan, deformasi kumulatif pada Sumatera Selatan harus dipahami. Kecepatan stasiun GPS (*Global Positioning System*) di Sumatera Selatan dijelaskan pada [7]. Kecepatan stasiun GPS disebut mengarah ke lempeng Sundaland. Batuan memiliki respon yang berbeda terhadap tegangan sehingga ada beberapa jenis deformasi batuan sebagai respon terhadap tegangan [8] yaitu:

1. Deformasi Elastis

Lempeng tektonik akan mengalami perubahan bentuk dan ukuran (cacat) ketika lempeng tektonik di bawah tegangan. Pelat tektonik yang cacat dapat kembali ke keadaan semula setelah tekanan dilepas.

2. Deformasi Plastik

Proses dimana lempeng tektonik di bawah tegangan di luar tingkat elastisitas lempeng tektonik, lempeng tektonik mengalami perubahan bentuk dan ukuran (cacat) secara teratur. Perubahan ireversibel meskipun tekanan dihapus. Dalam deformasi plastik, lempeng tektonik meringkuk atau bengkok dalam menanggapi tegangan.

3. Deformasi Rapuh

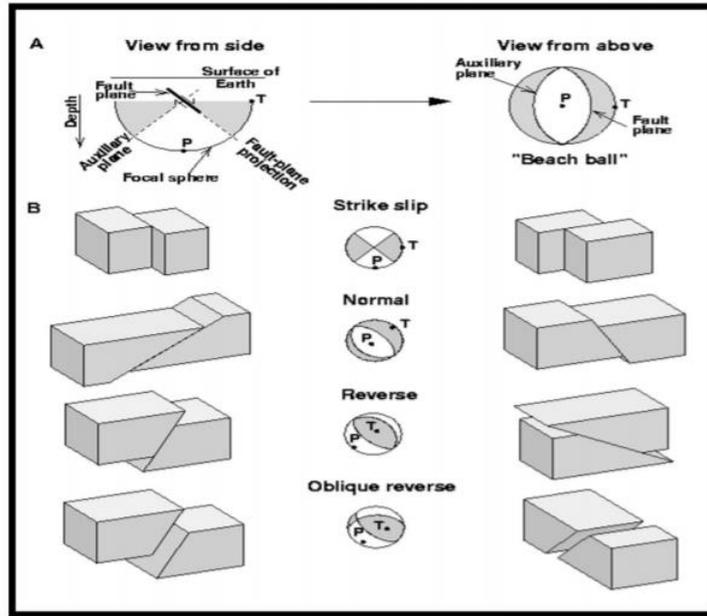
Proses deformasi membelah atau melanggar ke blok kecil. Ini terjadi di lempeng tektonik yang memiliki elastisitas rendah dan rapuh ketika berada di bawah tegangan di luar tingkat elastisitas lempeng tektonik. Deformasi rapuh lebih mudah dikenali, di hadapan kesalahan dalam lempeng tektonik.

## 2.2 Subduksi dan Sesar Sumatra

Sesar merupakan salah satu bentuk patahan dari lapisan batuan yang mengakibatkan suatu lapisan bergerak naik atau turun, ataupun bergerak kanan atau kiri. Dalam beberapa kasus, hal ini berhubungan pada peristiwa patahan yang mengacu pada orientasi bidang sesar yang bergeser. Berdasarkan pergerakannya, sesar dikelompokkan menjadi tiga bagian (Gambar 2.2) :

1. Patahan naik (*reverse fault*) merupakan patahan yang disebabkan batuan bergerak saling mendekat sehingga terjadi gaya tekan dengan sudut kemiringan  $<45^\circ$  (Gambar 2.2).
2. Sesar normal (*normal fault*) merupakan patahan dengan arah vertikal dengan sudut kemiringan cukup besar dibandingkan dengan jenis sebelumnya (Gambar 2.2).
3. Sesar geser (*strike fault*) merupakan patahan dengan arah horizontal (Gambar 2.2).

4. Sesar miring (*oblique fault*) merupakan patahan kombinasi dari sesar normal dan sesar geser, sehingga mengalami pergerakan horizontal kanan ataupun kiri (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Jenis-jenis Sesar [9]

Salah satu sumber pembangkit gempa bumi di Sumatera adalah sesar besar Sumatera atau dikenal dengan sebutan Patahan Semangko. Sesar mendatar dengan orientasi menganan (*dextral strike slip fault*) sepanjang 1900 Km ini terbagi atas 19 segmen utama dengan tujuh segmen yang mempengaruhi kondisi seismisitas di wilayah Sumatera Barat. Segmen tersebut adalah Segmen Angkola, Segmen Barumon, Segmen Sumpur, Segmen Sianok, Segmen Sumani, Segmen Suliti dan sebagian Segmen Siluak [10]. Segmen Semangko memanjang dari Teluk Semangko sepanjang 6 km ke arah Barat. Berdasarkan PuSGeN 2017, Sesar Semangko terbagi menjadi Semangko Graben (3 mm/tahun, berpotensi M6.5), Semangko Timur-A (5 mm/tahun, berpotensi M6.5), Semangko Timur-B (3 mm/tahun, berpotensi M6.9), Semangko Barat-A (8 mm/tahun, berpotensi M7.4), dan Semangko Barat-B (8 mm/tahun, M7.3). Laut yang mengakibatkan terbentuknya Lembah Suoh di Lampung Barat [11].

Zona subduksi di sebelah barat Sumatera terbentuk dari lempeng Indo-Australia yang menunjam di bawah lempeng Eurasia, dengan kemiringan sekitar  $40^\circ$  dengan kecepatan pergerakan 52 mm/tahun di bagian utara dan 60 mm/tahun di bagian selatan [12].

### 2.3 GNSS (Global Navigation Satellite System)

Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk pengamatan deformasi yaitu dengan mengamati pergerakan titik stasiun GNSS secara berkala. GNSS merupakan teknologi yang digunakan untuk menentukan posisi atau lokasi (lintang, bujur dan ketinggian) serta waktu dalam satuan ilmiah di bumi. Satelit akan mentransmisikan sinyal radio dengan frekuensi tinggi yang berisi data waktu dan posisi yang dapat diambil oleh penerima yang memungkinkan pengguna untuk mengetahui lokasi tepat mereka di permukaan bumi.

Konsep penentuan posisi dengan GNSS adalah reseksi (pengikatan ke belakang) dengan jarak yaitu dengan pengukuran jarak secara simultan ke beberapa satelit yang koordinatnya telah diketahui. Survei GNSS pada prinsipnya bertumpu pada metode-metode penentuan posisi statik secara diferensial dengan menggunakan data fase. Pengamatan satelit GNSS umumnya dilakukan *baseline* per-*baseline* selama selang waktu tertentu dalam suatu jaringan (kerangka) dari titik-titik yang akan ditentukan posisinya [13]. GNSS dapat digunakan untuk pemantauan deformasi secara berkala sebagai instalasi permanen, saat pekerjaan perbaikan sementara, atau disaat pekerjaan yang kiranya memiliki potensi bahaya. GNSS mampu menghasilkan data *real-time* untuk aktivitas pemantauan. Pada umumnya, pengamatan GNSS secara berkala digunakan untuk pemantauan pergerakan lempeng dan studi tektonik mencakup area regional yang luas. Salah satu kelebihan dari pengamatan GNSS secara berkala yaitu dapat mengumpulkan data posisi dalam rentang waktu sangat panjang yang dapat diproses dan disimpan dalam sesi waktu harian. Kelebihan lain dari pengamatan GNSS secara berkala dalam aktivitas pemantauan yaitu mampu menyesuaikan hasil data pengamatan, seperti contohnya pada akurasi tinggi, adanya peningkatan

sensitivitas terhadap gerakan pada arah tertentu, atau mampu memperingatkan pengguna apabila gerakan yang terjadi melebihi ambang batas aman [14].

## 2.4 Regangan

Regangan diperoleh dari nilai koordinat yang dihitung berdasarkan nilai kecepatan masing-masing titik yang terlibat, dari koordinat pengamatan GNSS yang dilakukan transformasi koordinat ke toposentrik. Regangan atau *strain* didefinisikan sebagai perubahan relatif dari posisi partikel-partikel suatu benda yang ditimbulkan karena adanya *stress* terhadap posisi asalnya [15]. Regangan merupakan salah satu bentuk dari adanya deformasi. Regangan dapat pula diartikan sebagai gaya-gaya yang bekerja pada suatu benda yang meregangkan benda tersebut. Perubahan secara fraksional suatu benda yang bersifat elastik baik bentuk maupun dimensinya dinamakan dengan regangan (*strain*). Untuk memonitoring perpindahan pergeseran dari stasiun pengamatan bisa dilihat dengan menggunakan cara pengukuran berulang jaring geodesi pada waktu yang berbeda.

Pengukuran perubahan horizontal dan vertikal dalam jaring geodetik dilakukan dengan metode yang berbeda dan analisis-analisis tersebut biasanya dilakukan secara terpisah untuk *strain* horizontal dan vertikal. Konsep *strain* untuk deformasi tidak hanya dalam dua dimensi, tapi formulasi tersebut dapat diperluas ke tiga dimensi [16].

Analisis regangan tektonik di Selat Sunda, sekitar daerah Bakauheni dominan mengalami ekstensi, sedangkan bagian barat daya Selat Sunda cenderung mengalami kompresi meskipun nilainya sangat kecil [17]. Pola ekstensi terjadi karena adanya fase poseismik dari gempa sebelumnya. Sedangkan pola kompresi ini menunjukkan adanya energi yang belum lepas dan potensial menjadi koseismik atau menjadi gempa pada masa mendatang [18].

## 2.5 Perhitungan Kecepatan

Setelah memperoleh nilai koordinat dari pengolahan data dengan GAMIT pada masing-masing stasiun pengamatan, dilakukan perhitungan kecepatan. Adapun persamaan linear (2.5.1) yang digunakan :

$$y(t) = vt + c \quad (2.5.1)$$

Dengan  $y(t)$  adalah posisi pada epok;  $T$  dan  $v$  adalah gradien dari fungsi linear yang diestimasi sebagai kecepatan setiap stasiun pengamatan mengacu pada kerangka referensi ITRF2000 dan  $c$  adalah konstanta. Nilai  $v$  dan  $c$  diperoleh dari perhitungan *least square* seperti Persamaan (2.5.2) sampai persamaan (2.5.8) di bawah ini [19] :

$$X = (A^T P A)^{-1} (A^T P F) \quad (2.5.2)$$

$$A = \begin{bmatrix} t1 & 1 \\ t2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ tn & 1 \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} y1 \\ y2 \\ \vdots \\ yn \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} v \\ c \end{bmatrix} \quad (2.5.3)$$

$$AX = F + V \quad (2.5.4)$$

$$V = AX - F \quad (2.5.5)$$

$$P = \sigma_0 \begin{bmatrix} \sigma_{y1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{y2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_{yn} \end{bmatrix} \quad (2.5.6)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{V^T P V}{r} \quad (2.5.7)$$

$$\Sigma_{xx} = \sigma_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (2.5.8)$$

Dengan  $A$  = matriks desain;  $X$  = matriks parameter;  $F$  = matriks koordinat harian setiap stasiun;  $V$  = matriks residu;  $t1, t2, tn$  = waktu pengamatan;  $y1, y2, yn$  = besar perpindahan di setiap waktu pengamatan;  $v, c$  = kecepatan stasiun GNSS dan konstanta;  $r$  = derajat kebebasan;  $\sigma_0$  = standar deviasi apriori;  $\sigma_0^2$  = variansi aposteriori;  $P$  matriks bobot; dan  $\Sigma_{xx}$  matriks variansi-kovariansi parameter (kecepatan stasiun pengamatan).

## 2.6 Transformasi Kerangka Referensi Lempeng Sundaland

Transformasi kerangka referensi lempeng Sundaland dilakukan karena kecepatan transformasi yang diamati mengacu pada ITRF2000. Persamaan untuk melakukan transformasi lempeng Sundaland terdapat pada persamaan 2.6.1 sampai 2.6.10 [20] :

$$a = \cos^{-1}[\sin \lambda_x \sin \lambda_p + \cos \lambda_x \cos \lambda_p \cos(\varphi_p - \varphi_x)] \quad (2.6.1)$$

$$C = \sin^{-1}\left(\frac{\cos \lambda_p \sin(\varphi_p - \varphi_x)}{\sin a}\right) \quad (2.6.2)$$

$$v = \omega R \sin a \quad (2.6.3)$$

$$\beta = 90 + C \quad (2.6.4)$$

$$ve_{slb} = v \sin \beta \quad (2.6.5)$$

$$vn_{slb} = v \cos \alpha \quad (2.6.6)$$

$$ve_{slbr} = ve - ve_{slb} \quad (2.6.7)$$

$$vn_{slbr} = vn - vn_{slb} \quad (2.6.8)$$

$$de_{slbr} = de - ve_{slb} \quad (2.6.9)$$

$$dn_{slbr} = dn - vn_{slb} \quad (2.6.10)$$

Dengan :  $\lambda_x$  = bujur euler pole;  $\lambda_p$  = bujur titik;  $\varphi_p$  = lintang euler pole;  $\varphi_x$  = lintang titik;  $a$ ;  $C$  = parameter untuk menghitung kecepatan titik;  $\omega$  = kecepatan sudut blok;  $R$  = jari-jari bumi;  $v$  = kecepatan yang dihasilkan dari titik karena pergerakan lempeng Sundaland menuju ITRF2000;  $\beta$  = kecepatan azimuth titik karena pergerakan lempeng Sundaland menuju ITRF2000;  $ve_{slb}$  = kecepatan titik karena pergerakan lempeng Sundaland di komponen timur-barat;  $vn_{slb}$  = kecepatan titik karena pergerakan lempeng Sundaland di komponen utara-selatan;  $ve$  = kecepatan titik dalam komponen timur-barat;  $vn$  = kecepatan titik dalam komponen utara-selatan;

$v_{e_{slbr}}$ =kecepatan titik mengacu pada lempeng Sundaland di komponen timur-barat;  $v_{n_{slbr}}$ = kecepatan titik mengacu pada lempeng Sundaland di komponen utara-selatan;  $de$  = perpindahan titik dalam komponen timur-barat;  $dn$  = perpindahan titik dalam komponen utara-selatan;  $de_{slbr}$  = perpindahan titik mengacu pada lempeng Sundaland di komponen timur-barat;  $dn_{slbr}$  = perpindahan titik mengacu pada lempeng Sundaland di komponen utara-selatan. Nilai bujur dari euler pole adalah  $85.899^\circ$  W. Lintang euler pole adalah  $46.202^\circ$  N dan kecepatan sudut lempeng adalah  $0.37^\circ$ /tahun [21].

## 2.7 Uji Statistik

Uji statistik dilakukan menggunakan tabel distribusi normal dengan Persamaan 2.7.1 sampai 2.7.4.

$$P = \sqrt{(dn^2 + de^2)} \quad 2.7.1$$

Dengan  $P$  = variabel pergeseran titik;  $dn$  = vektor komponen utara-selatan;  $de$  = vektor komponen timur-barat. Selanjutnya dihitung standar deviasi  $P$  dengan menggunakan rumus :

$$StdP = \sqrt{(Stdn^2 + Stde^2)} \quad 2.7.2$$

Dengan  $StdP$  = standar deviasi resultan;  $Stdn$  = standar deviasi komponen utara-selatan;  $Stde$  = standar deviasi komponen timur-barat. Pada tes ini, hipotesis nol ( $P=0$ ) menunjukkan bahwa pergeseran tidak signifikan. Sedangkan bila  $P$  bukan sama dengan 0, menunjukkan bahwa pergeseran cukup signifikan. Statistik yang digunakan dalam pengujian pergeseran titik ini :

$$T = \frac{P}{StdP} \quad 2.7.3$$

Dengan  $T$  merupakan besaran yang menunjukkan signifikan atau tidaknya pergeseran yang terjadi. Pergeseran dinyatakan dengan signifikan atau hipotesa nol ditolak apabila [19] :

$$T > t_{df, \alpha/2} \quad 2.7.4$$

Dengan  $df$  = derajat kebebasan;  $\alpha$  = level signifikan yang digunakan untuk uji statistik.

## 2.8 Perhitungan Regangan

Perhitungan regangan dilakukan dengan masukan berupa nilai kecepatan dalam komponen utara-selatan dan timur-barat setiap stasiun pengamatan yang bereferensi ke lempeng Sundaland serta koordinat geodetikanya. Regangan dihitung dengan menggunakan metode *delaunay triangle*, yaitu dengan membentuk jaring-jaring segitiga yang menghubungkan setiap tiga stasiun pengamatan. Persamaan yang digunakan untuk menghitung regangan dapat dilihat pada Persamaan 2.8.1 hingga Persamaan 2.8.6.

$$T_x - L \omega + B \varepsilon_{xx} + L \varepsilon_{xy} = V_E \quad (2.8.1)$$

$$T_y - L \omega + B \varepsilon_{xy} + L \varepsilon_{yy} = V_N \quad (2.8.2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -L1 & B1 & L1 & 0 \\ 0 & 1 & B1 & 0 & B1 & L1 \\ 1 & 0 & -L2 & B2 & L2 & 0 \\ 0 & 1 & B2 & 0 & B2 & L2 \\ 1 & 0 & -L3 & B3 & L3 & 0 \\ 0 & 1 & B3 & 0 & B3 & L3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ \omega \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{E1} \\ V_{N1} \\ V_{E2} \\ V_{N2} \\ V_{E3} \\ V_{N3} \end{bmatrix} \quad (2.8.3)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \varepsilon_{xy}^2} \quad (2.8.4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \varepsilon_{xy}^2} \quad (2.8.5)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 \varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (2.8.6)$$

Dengan :  $L1, L2, L3$  = lintang dari titik 1, 2 dan 3;  $B1, B2, B3$  = bujur dari titik 1, 2 dan 3;  $V_{E1}, V_{E2}, V_{E3}$  = kecepatan titik 1, 2 dan 3 dalam komponen timur-barat;  $V_{N1}, V_{N2}, V_{N3}$  = kecepatan titik 1, 2 dan 3 dalam komponen utara-selatan;  $T_x$  = translasi *centroid* dalam komponen timur-barat;  $T_y$  = translasi *centroid* dalam komponen utara-selatan;  $\omega$  = rotasi dari *centroid*;  $\varepsilon_x$  = nilai regangan normal dalam komponen timur-barat;  $\varepsilon_y$  = nilai regangan normal dalam komponen utara-selatan;  $\varepsilon_{xy}$  = nilai regangan geser;  $\varepsilon_1; \varepsilon_2; \theta$  = komponen *principal strain*.