

## BAB II TEORI DASAR

### 2.1 Gempa bumi dan Ukuran Gempa bumi

Gempa bumi adalah getaran yang terjadi di permukaan bumi akibat adanya proses pelepasan energi secara tiba-tiba di bawah permukaan bumi. Gempa bumi secara umum disebabkan karena adanya interaksi pergerakan lempeng kerak bumi. Interaksi antar lempeng kerak bumi atau lempeng tektonik dapat berupa subduksi atau penunjaman antar lempeng, pergeseran antar lempeng (*slip*), dan dua lempeng yang saling menjauh. Gempa bumi yang terjadi dapat mengakibatkan deformasi batuan. Deformasi batuan adalah proses perubahan pada tubuh batuan berupa perubahan volume, bentuk, dan posisi akibat adanya gaya yang bekerja pada tubuh batuan (Reid, 1910).

Gaya yang bekerja pada suatu medium batuan adalah tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Secara singkat dapat dijelaskan, apabila tekanan dan regangan diberikan secara terus menerus pada suatu tubuh batuan, maka kekuatan batuan akan mencapai batas maksimum hingga mengalami *failure* atau patah. Proses patahan secara tiba-tiba ini menyebabkan energi yang tersimpan terlepas dan terjadilah gempa bumi.

#### 2.1.1 Magnitude Gempa bumi

*Magnitude* gempa merupakan ukuran atau kekuatan gempa yang diukur secara kuantitatif dengan mengukur *ground motion* ketika terjadi gempa bumi.

##### 1. *Magnitude Lokal Richter* ( $M_l$ )

*Magnitude* lokal awalnya digagas oleh Charles F. Richter pada tahun 1933. Richter menjelaskan bahwa semakin besar energi gempa, maka semakin besar *amplitude* dari gerakan tanah pada jarak tertentu. *Amplitude* maksimum dari gelombang geser digunakan untuk mengukur skala *magnitude* gempa. Skala ini digunakan pada awal tahun 1933 dengan menggunakan data kejadian gempa wilayah

California yang direkam oleh seismograf Woods-Anderson dan umum digunakan pada seismometer di seluruh dunia. Penentuan nilai *magnitude* lokal menggunakan rumus empiris persamaan:

$$M_l = \log A + 3 \log \Delta - 2.92 \quad (2.1)$$

Dengan A adalah *amplitude* gerakan tanah ( $\mu m$ ), dan  $\Delta$  adalah jarak stasiun pencatat dengan sumber gempa (km).

## 2. *Magnitude Body* ( $M_b$ )

Skala *magnitude body* mendefinisikan berdasarkan catatan *amplitude* dari gelombang P yang menjalar di dalam bumi (Lay T. dan Wallace T.C., 1995). Skala *magnitude body* ini diperkenalkan oleh Gutenberg pada tahun 1945 dengan mengukur *amplitude* gempa dan siklus gelombang P. Skala ini lebih sesuai dalam mengukur kekuatan gempa pada kedalaman episenter lebih dari 70 km. Dalam mengukur *magnitude* gelombang badan dapat dihitung dengan persamaan:

$$M_b = \log A - \log T + 0.01\Delta + 5,9 \quad (2.2)$$

Dengan A adalah *amplitude* gerakan tanah ( $\mu m$ ), T adalah periode getaran (s), dan  $\Delta$  adalah jarak stasiun pencatat ke sumber gempa (km).

## 3. *Magnitude Permukaan* ( $M_s$ )

Skala *magnitude* permukaan umumnya digunakan untuk menentukan kekuatan gempa dengan kedalaman sekitar 60 km. Skala ini merupakan perkembangan dari skala *magnitude* lokal *Richter* yang tidak menjelaskan jenis gelombang gempa. Skala ini diperkenalkan oleh Gutenberg (1936) berdasarkan *amplitude* gelombang permukaan dengan menggunakan rumus:

$$M_s = \log A + 1,66 \log \Delta + 2 \quad (2.3)$$

Dengan A adalah *amplitude* gerakan tanah ( $\mu m$ ), dan  $\Delta$  adalah jarak stasiun pencatat ke sumber gempa (km).

#### 4. *Magnitude* Momen ( $M_w$ )

Kekuatan gempa bumi berkaitan dengan energi yang dilepaskan pada suatu sumber gempa. Energi tersebut mengalami pelemahan dalam penjarannya pada medium batuan. Berdasarkan teori *elastic rebound*, diperkenalkan istilah momen seismik dalam menentukan faktor panjang keruntuhan pada suatu sesar. Momen seismik secara empiris dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_o = \mu D A \quad (2.4)$$

Dengan  $M_o$  adalah momen seismik,  $\mu$  nilai rigiditas,  $D$  adalah pergeseran rata-rata bidang sesar, dan  $A$  adalah luas *area*.

*Magnitude* momen merupakan skala *magnitude* yang tidak tergantung pada besarnya *magnitude* permukaan. Skala ini menyatakan jumlah energi yang dilepaskan dari sumber gempa bumi dengan lebih akurat. Persamaan umum *magnitude* momen dirumuskan sebagai berikut:

$$M_w = \frac{\log M_o}{1,5} - 10.73 \quad (2.5)$$

Dengan  $M_o$  adalah momen seismik, dan  $M_w$  adalah momen *magnitude*.

## 2.2 Tegangan dan Regangan

### 2.2.1 Tegangan (*Stress*)

Tegangan atau *stress* merupakan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. Tegangan dikelompokkan menjadi tiga, yaitu tegangan normal (*normal stress*), tegangan geser (*shear stress*), dan tegangan volume. Dapat dikatakan bahwa tegangan adalah gaya persatuan luas, dan dapat dirumuskan dalam persamaan matematis:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

Dengan  $\sigma$  adalah tegangan ( $N/m^2$ ),  $F$ = gaya (N), dan  $A$ = Luas *area* ( $m^2$ )

*Normal stress* terdiri dari *normal compressional stress* dan *normal extentional stress*. *Shear stress* adalah tegangan geser yang merupakan kesejajaran gaya yang bekerja pada suatu benda dengan penampang. Sedangkan *stress volume* adalah gaya yang menyebabkan terjadinya perubahan volume tanpa mengubah geometri benda.

### 2.2.2 Regangan (*Strain*)

Regangan atau *strain* didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang suatu benda dengan panjang mula-mula. Regangan adalah ukuran seberapa besar benda tersebut berubah bentuk saat benda tersebut diberikan tegangan. Pada daerah elastik, besar tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perbandingan antara tegangan dengan regangan disebut sebagai modulus *Young*. Rumus umum regangan dalam persamaan matematis:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.7)$$

Dengan  $\varepsilon$  adalah regangan,  $\Delta L$  adalah pertambahan panjang (m), dan  $L$  adalah panjang awal (m).

Persamaan umum modulus *Young* secara matematis dirumuskan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

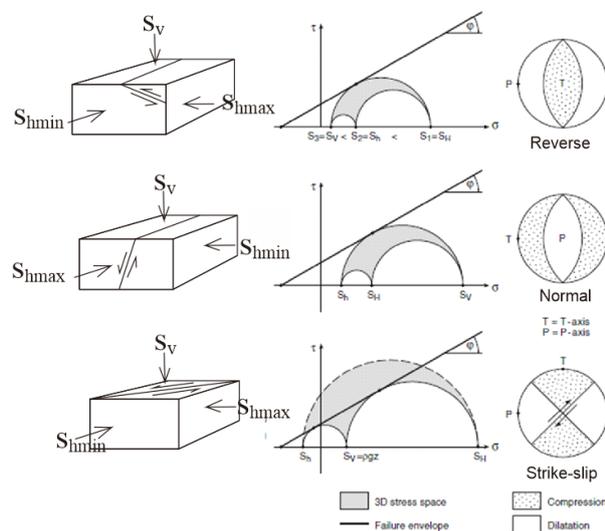
Dengan  $E$  adalah modulus *Young*,  $\sigma$  adalah tegangan ( $\text{N/m}^2$ ), dan  $\varepsilon$  adalah regangan.

## 2.3 Sesar (Patahan)

Sesar atau patahan adalah bidang diskontinuitas dalam volume batuan, dimana telah terjadi perpindahan secara signifikan massa batuan (Lutgens, 2013). Bidang sesar adalah bidang yang mewakili permukaan pada sesar dengan meninggalkan jejak garis sesar di permukaan bumi. Jejak garis sesar adalah perpotongan bidang sesar dengan permukaan tanah. Sesar yang berada di kerak bumi merupakan retakan atau *fracture* hasil dari gaya lempeng tektonik yang bekerja secara aktif dan mampu memberikan perubahan pada massa batuan.

### 2.3.1 Jenis Sesar

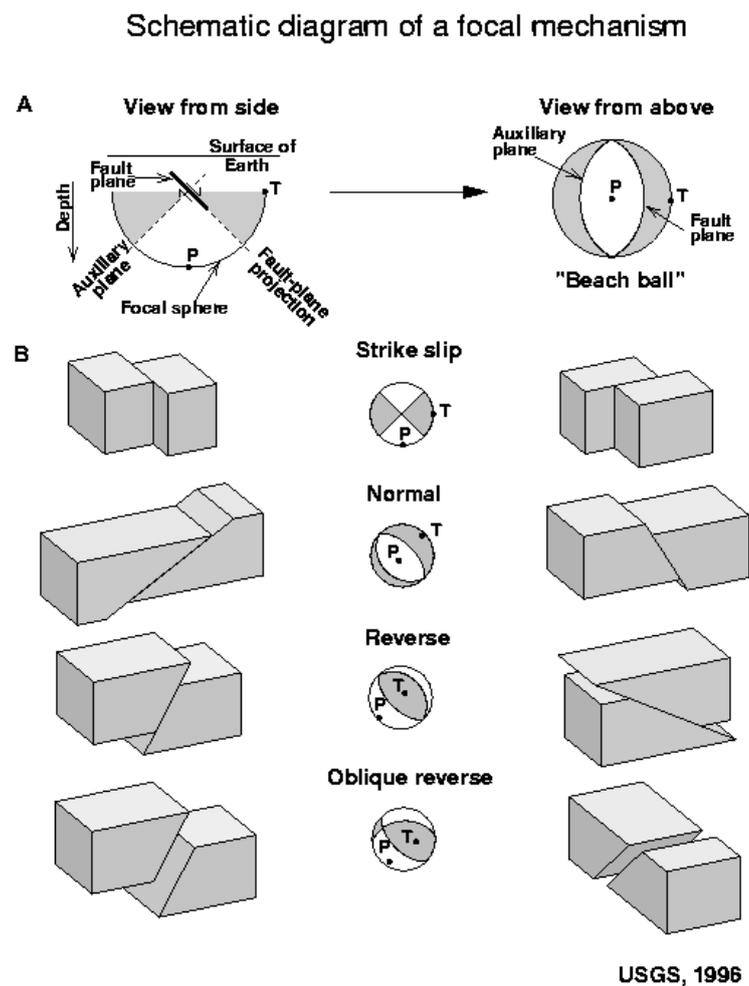
Jenis sesar dibedakan berdasarkan *principal stress* pada bidang sesar (Anderson, 1951). *Principal stress* adalah *stress* yang bekerja tegak lurus pada bidang, sehingga komponen tegangan gesernya bernilai nol. *Principal stress* terdiri dari  $S_1$ ,  $S_2$ , dan  $S_3$ , dimana nilai *principal stress*  $\sigma_1(S_1) > \sigma_2(S_2) > \sigma_3(S_3)$ . Tiga *principal stress* ini membentuk dua sumbu berdasarkan orientasinya, yaitu sumbu horizontal ( $S_h$ ) dan sumbu vertikal ( $S_v$ ). Untuk sumbu horizontal dibagi menjadi dua yaitu sumbu horizontal maksimum ( $S_{hmax}$ ) dan sumbu horizontal minimum ( $S_{hmin}$ ). Dalam analisa sesar, kita juga dapat mengetahui karakteristik jenis sesar dengan menggunakan lingkaran *mohr*. Komponen pembentuk lingkaran *mohr* adalah besar *stress* yang bekerja pada sumbu  $S_{hmax}$ ,  $S_{hmin}$ , dan  $S_v$ . Dominasi *stress* pada sumbu inilah yang membentuk klasifikasi sesar berupa sesar normal, sesar naik, dan sesar mendatar. Sesar normal terbentuk apabila  $S_{hmin} < S_{hmax} < S_v$ , sesar naik terbentuk apabila  $S_v < S_{hmin} < S_{hmax}$ , dan sesar mendatar terbentuk jika  $S_{hmin} < S_v < S_{hmax}$ .



**Gambar 2.1** Jenis sesar berdasarkan *principal stress* dan klasifikasi berdasarkan lingkaran *mohr*. T adalah komponen kompresi, P adalah komponen dilatasi (Anderson, 1951).

### 2.3.2 Solusi Mekanisme Fokus

Mekanisme fokus atau *focal mechanism* adalah solusi penentuan orientasi bidang sesar yang bergeser. Penentuan mekanisme fokus gempa bumi dihasilkan dengan mengidentifikasi pola pergerakan pertama (*first motion*) gempa bumi yang terekam. Mekanisme fokus digambarkan dengan menggunakan proyeksi stereografi bidang sesar. **Gambar 2.2** adalah mekanisme penggambaran proyeksi stereografi suatu bidang sesar hingga didapat empat penggambaran sesar, yaitu sesar mendatar, sesar normal, sesar naik, dan sesar *oblique*. Sesar *oblique* adalah sesar kombinasi normal yang bergeser atau sesar naik yang bergeser.

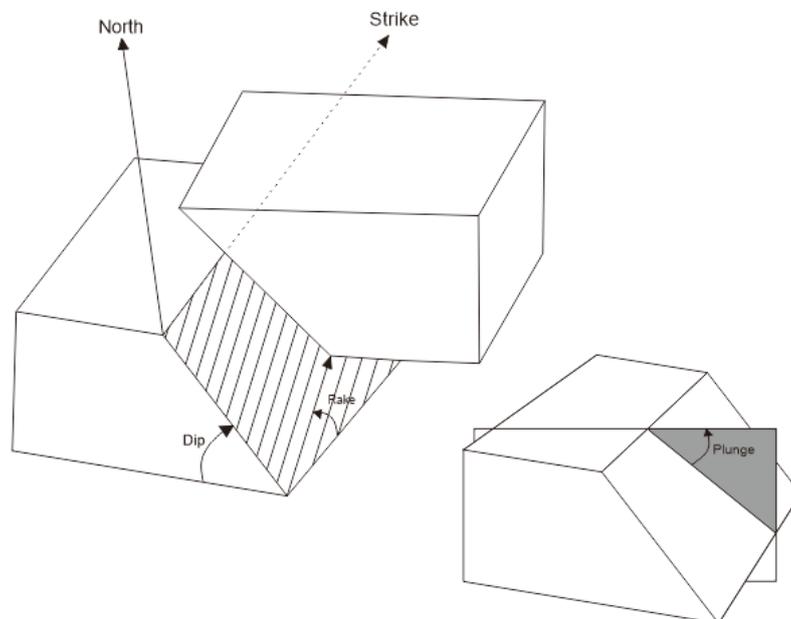


**Gambar 2.2** Skema diagram solusi mekanisme fokus (USGS, 1996).

### 2.3.3 Geometri Sesar

Untuk mengetahui geometri sesar, perlu dipahami komponen bidang yang ada pada suatu bidang sesar. Komponen untuk mengetahui geometri bidang sesar yaitu:

1. *Strike* ( $\varphi$ ) adalah sudut yang dibentuk oleh arah jurus sesar dengan arah Utara bumi. Umumnya pengukuran *strike* diukur searah dengan jarum jam.
2. *Dip* ( $\delta$ ) adalah sudut yang dibentuk oleh bidang sesar terhadap bidang horizontal dan diukur pada bidang vertikal yang arahnya tegak lurus terhadap *strike*.
3. *Plunge* ( $p$ ) adalah sudut yang dibentuk oleh struktur gores garis bidang sesar dengan bidang horizontal dan diukur pada bidang vertikal.
4. *Rake* ( $\lambda$ ) adalah sudut yang dibentuk dari arah jurus sesar dengan arah *slip*nya. *Rake* dapat bernilai positif pada sesar naik dan bernilai negatif pada sesar turun.



**Gambar 2.3** Ilustrasi komponen bidang sesar.

## 2.4 Inversi *Stress*

Dalam menentukan orientasi *stress* suatu wilayah dengan menggunakan metode inversi *stress* dibutuhkan beberapa asumsi. Asumsi pertama yaitu *stress* tektonik yang bekerja pada suatu wilayah harus bersifat homogen, asumsi yang kedua yaitu gempa bumi yang terjadi berada pada sesar yang sudah terbentuk sebelumnya dengan berbagai orientasi, dan asumsi yang ketiga yaitu titik-titik vektor slip berada pada arah dari *shear stress* pada suatu sesar (Bott, 1959; Wallace, 1951). Apabila asumsi ini telah terpenuhi, metode inversi *stress* dapat digunakan untuk menentukan parameter *stress tensor*. Parameter *stress tensor* terdiri dari tiga sumbu yang mendefinisikan arah dari *principal stress* yaitu  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , dan  $\sigma_3$ . Kemudian selain tiga sumbu *principal stress* parameter *stress tensor* yang digunakan adalah informasi *shape ratio*. *Shape ratio* digunakan untuk menentukan seberapa aktif seismisitas suatu wilayah dengan rumus:

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2.9)$$

Inversi *stress* membutuhkan informasi berupa bidang *nodal* pada suatu sesar. Pemilihan *nodal plane* pada tiap sesar dapat dilakukan secara acak dari solusi mekanisme fokus tanpa mengetahui bidang *nodal* yang tepat pada suatu sesar. Metode inversi *stress* ini telah dimodifikasi oleh Vavryčuk (2014) yang sebelumnya telah digagas oleh Michael (1984), Gephart & Forsyth (1984), dan Angelier (2002). Selain itu modifikasi dan ekstensi juga telah diusulkan oleh Arnold & Townend (2007), Michael (2006), dan Lund & Slunga (1999). Cara kerja metode inversi *stress* ini diawali dengan menggunakan perhitungan inversi *stress* yang dikembangkan oleh Michael (1984). Metode Michael diterapkan dengan tanpa mengetahui orientasi bidang sesar. Proses inversi dilakukan untuk mendapatkan *principal stress* dan nilai *shape ratio* yang sesuai. Setelah mendapatkan arah *principal stress* dan nilai *shape ratio*, nilai ini digunakan untuk menghitung *instability* pada *nodal plane*. *Instability nodal plane* berhubungan dengan kestabilan bidang sesar. Untuk mendapatkan nilai optimum proses inversi dilakukan secara iteratif. Hasil penentuan orientasi bidang sesar pada iterasi pertama akan digunakan pada iterasi kedua, kemudian

hasil penentuan orientasi bidang sesar pada iterasi kedua digunakan pada iterasi ketiga dan seterusnya hingga mendapatkan nilai optimal. Selain mendapatkan informasi berupa arah *principal stress* dan *shape ratio*, informasi lain yang didapatkan juga yaitu nilai koefisien friksi. Nilai koefisien friksi juga didapat dengan proses inversi secara iteratif.

#### 2.4.1 Metode Michael

Metode inversi *stress* yang dikembangkan oleh Michael (1984) menggunakan parameter dari *normal* dan *shear traction* pada suatu patahan  $\sigma_n$  dan  $\tau$ :

$$\sigma_n = T_i N_i = \tau_{ij} n_i n_j \quad (2.10)$$

$$\tau N_i = T_i - \sigma_n n_i = \tau_{ij} n_j - \tau_{jk} n_j n_k n_i = \tau_{kj} n_j (\delta_{ik} - n_i n_k) \quad (2.11)$$

Dimana  $\delta_{ik}$  merupakan *delta kronecker*,  $T$  merupakan traksi sepanjang bidang sesar,  $n$  adalah sesar normal, dan  $N$  adalah vektor satuan arah *shear stress* sepanjang bidang sesar. Persamaan 2.11 dapat dimodifikasi menjadi:

$$\tau_{kj} n_j (\delta_{ik} - n_i n_k) = \tau N_i \quad (2.12)$$

Sedangkan untuk dapat mengkalkulasi sisi bagian kanan persamaan 2.11 metode Michael menggunakan asumsi yang digagas oleh Wallace dan Bott dan mengidentifikasi arah dari *shear stress* ( $N$ ) dengan arah slip ( $s$ ) dari pergerakan pergeseran sepanjang sesar. Lebih lanjut lagi asumsi dari nilai *shear stress* ( $\tau$ ) pada sesar aktif memiliki nilai yang sama untuk mempelajari semua gempa bumi. Karena metode ini tidak dapat menentukan nilai *stress* absolut, nilai *shear stress* dinormalisasi menjadi 1 pada persamaan 2.12, sehingga persamaan 2.12 dapat diekspresikan dalam bentuk matriks :

$$A \cdot t = s \quad (2.13)$$

Dimana  $t$  adalah vektor komponen *stress* dengan matriks:

$$t = [\tau_{11} \tau_{12} \tau_{13} \tau_{22} \tau_{23}]^T \quad (2.14)$$

$A$  adalah matriks  $3 \times 5$  yang dikalkulasi dari *normal fault* ( $n$ ).  $N$  adalah jumlah data strike pada matriks:

$$\begin{pmatrix} n_1(n_2^2 + n_3^2) & n_2(-n_1^2 + n_3^2) & n_3(-2n_1^2 - n_2^2) \\ n_2(1 - 2n_1^2) & n_1(1 - 2n_2^2) & -2n_1n_2n_3 \\ n_3(1 - 2n_1^2) & -2n_1n_2n_3 & n_1(1 - 2n_3^2) \\ n_1(-n_2^2 + n_3^2) & n_2(n_1^2 - 2n_3^2) & n_3(-n_1^2 - 2n_2^2) \\ -2n_1n_2n_3 & n_3(1 - 2n_2^2) & n_2(1 - 2n_3^2) \end{pmatrix}^T \quad (2.15)$$

$S$  adalah vektor arah slip dengan matriks  $[N \times 1]$ . Untuk memperluas persamaan 2.15, diperoleh sistem persamaan linear *stress tensor*:

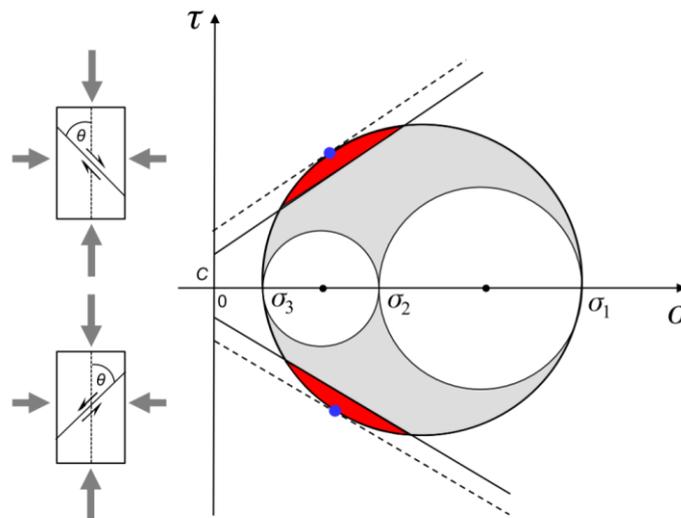
$$T_r(\tau) = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0 \quad (2.16)$$

Dan sistem penyelesaian menggunakan inversi linear secara umum:

$$t = A^{-1}s \quad (2.17)$$

#### 2.4.2 *Instability Patahan*

Adanya ambiguitas dalam mengidentifikasi bidang patahan dalam suatu mekanisme fokus dapat menyulitkan perhitungan inversi *stress*. Untuk itu diperlukan perhitungan instabilitas patahan. Perhitungan instabilitas patahan dapat menggunakan diagram *Mohr-Coulomb failure criterion*.



**Gambar 2.4** Diagram *Mohr-Coulomb failure criterion*,  $\tau$  merupakan *shear stress* dan  $\sigma$  merupakan *normal stress* efektif.  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , dan  $\sigma_3$  merupakan *principal stress* efektif. Area berwarna merah menunjukkan semua kemungkinan orientasi dari bidang patahan yang memenuhi *Mohr-Coulomb failure criterion*. Titik berwarna biru merupakan nilai optimal dari bidang patahan.  $C$  adalah nilai kohesi. Sisi atas dan sisi bawah diagram merupakan *conjugate* patahan (Vavrÿcuk, 2014).

Berdasarkan diagram pada **Gambar 2.4** untuk menentukan nilai *shear stress* ( $\tau$ ) dapat menggunakan rumus:

$$\tau_c = C + \mu(\sigma_n - P) \quad (2.18)$$

Dengan  $C$  merupakan kohesi,  $\mu$  merupakan koefisien friksi, dan  $P$  adalah tekanan pori.

Kemudian didapat persamaan yang digunakan untuk menentukan instabilitas patahan ( $I$ ) yang digagas oleh Vavrÿcuk (2014):

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - \sigma_1)}{\tau_c - \mu(\sigma_c - \sigma_1)} \quad (2.19)$$

Dengan  $\tau_c$  adalah *shear stress* optimal dan  $\sigma_1$  adalah *normal stress*.

## 2.5 Konsep Perubahan *Coulomb Stress*

*Coulomb stress* merupakan metode yang digunakan untuk mengamati distribusi *stress* yang sudah terlepas dan *stress* yang masih tersimpan ketika terjadi gempa bumi. Proses kalkulasi perubahan *stress* menggunakan model *elastic half space* pada model bidang sesar yang homogen. Dengan metode ini dapat ditentukan arah pergerakan *stress* yang membantu memperkirakan arah persebaran gempa susulan. Persamaan sederhana pada *coulomb failure stress* dinyatakan dengan persamaan:

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu(\sigma_\beta - p) \quad (2.20)$$

Dengan  $\sigma_f$  adalah *coulomb failure*,  $\tau_\beta$  adalah *shear stress*,  $\mu$  adalah koefisien friksi, dan  $p$  adalah tekanan pori. Nilai  $\sigma_f$  harus bernilai positif, namun proses perhitungan *stress* pada suatu sesar dapat bernilai positif atau negatif bergantung pada *slip* potensial yang mengarah ke kanan atau ke kiri.

Dalam bidang patahan dengan orientasi  $\beta$  ke sudut  $\sigma_1$  kita dapat menyebut komponen *stress* yang ditunjukkan sebagai *stress* utama.

$$\sigma_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (2.21)$$

$$\tau_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (2.22)$$

Dimana  $\sigma_1$  adalah *stress* utama terbesar dan  $\sigma_3$  adalah *stress* utama terkecil. Kemudian persamaan 2.20 dapat diubah menjadi:

$$\sigma_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\beta - \mu \cos 2\beta) - \frac{1}{2}\mu(\sigma_1 + \sigma_3) + \mu p \quad (2.23)$$

Kemudian persamaan 2.23 diturunkan sebagai fungsi  $\beta$  sehingga didapat nilai  $\sigma_f$  maksimum jika:

$$\cot 2\beta = -\frac{1}{\mu} \quad (2.24)$$

Untuk nilai koefisien friksi yang konstan, maka persamaan 2.20 dapat ditulis menjadi:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n - \Delta p) \quad (2.25)$$

Dengan  $p$  merupakan *normal stress* efektif. Dalam penelitian perubahan *coulomb stress* kita dapat menggunakan nilai koefisien friksi rata-rata  $\mu = 0.40$  (Stein dkk, 1983). Selanjutnya dengan asumsi bahwa nilai  $\sigma_f$  adalah nilai *stress*

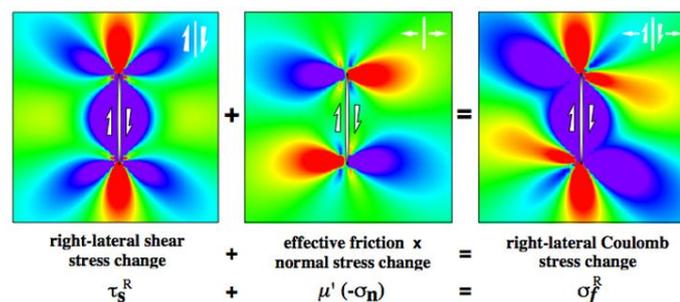
normal pada bidang, kemudian nilai  $\Delta\sigma_f$  dapat ditentukan dari perpindahan dari sumber patahan pada bidang patahan pertama dan arah *slip* pada bidang sesar kedua atau disebut dengan *source fault*. Metode *elastic half space* atau perpindahan setengah ruang digunakan untuk menghitung bidang regangan yang dikalikan dengan *elastic stiffness* untuk menurunkan perubahan tegangan. *Receiver fault* merupakan bidang yang terbentuk dengan adanya komponen *strike*, *dip*, dan *rake* dimana *stress* yang diberikan pada sumber patahan (*source fault*) dapat ditentukan. Kenaikan atau penurunan tegangan geser bergantung pada posisi, geometri, dan *slip* pada *source fault*, dan posisi dan geometri pada *receiver fault*. Sehingga didapat *coulomb failure criterion* dengan persamaan berikut:

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu'(\sigma_\beta) \quad (2.26)$$

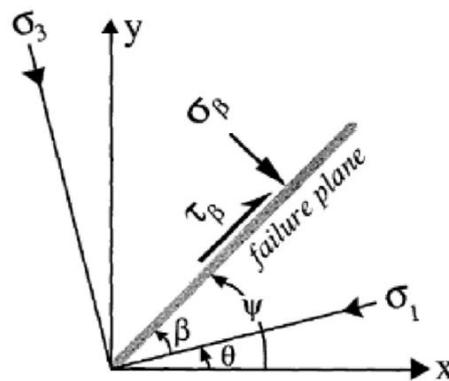
Dengan  $\mu'$  merupakan koefisien friksi efektif yang dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$\mu' = \mu(1 - B) \quad (2.27)$$

$\sigma_f$  merupakan *coulomb stress failure* pada *receiver fault* yang disebabkan oleh *slip* pada *source fault*. Jika nilai  $\sigma_f > 0$  maka akan terjadi kemungkinan kenaikan *slip potential*, dan jika  $\sigma_f < 0$  maka akan terjadi kemungkinan penurunan *slip potential*.  $\tau_\beta$  merupakan tegangan geser.  $\sigma_\beta$  adalah tegangan normal. Ilustrasi perubahan *coulomb stress* dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



**Gambar 2.5** Ilustrasi perhitungan perubahan *coulomb stress* untuk sesar lateral mengangan (*right-lateral*). Tingkatan warna merepresentasikan perubahan *stress* yang terjadi. Warna merah menunjukkan *area* yang mengalami peningkatan *stress*. Warna biru menunjukkan *area* yang mengalami penurunan *stress*.



**Gambar 2.6** Sistem koordinat sumbu yang digunakan untuk perhitungan *coulomb stress* pada bidang sesar optimum (King dkk, 1994).

Melalui sistem koordinat sumbu *stress* pada **Gambar 2.6** ditunjukkan bidang sesar (*failure plane*) yang diberikan *normal stress*  $\sigma_\beta$ . Selanjutnya orientasi bidang sesar dengan sudut  $\beta$  membentuk  $\sigma_1$  sebagai *stress* utama terbesar dan  $\sigma_3$  sebagai *stress* utama terkecil, dengan  $\tau_\beta$  adalah *shear stress* bidang sesar. Kompresi dan *shear stress* mengangan pada bidang sesar pada **Gambar 2.6** dianggap positif. Perubahan *coulomb stress* dalam bidang sesar optimal dapat dihitung sebagai hasil dari *slip* sesar utama tempat gempa bumi susulan diperkirakan terjadi pada bidang sesar tersebut.