

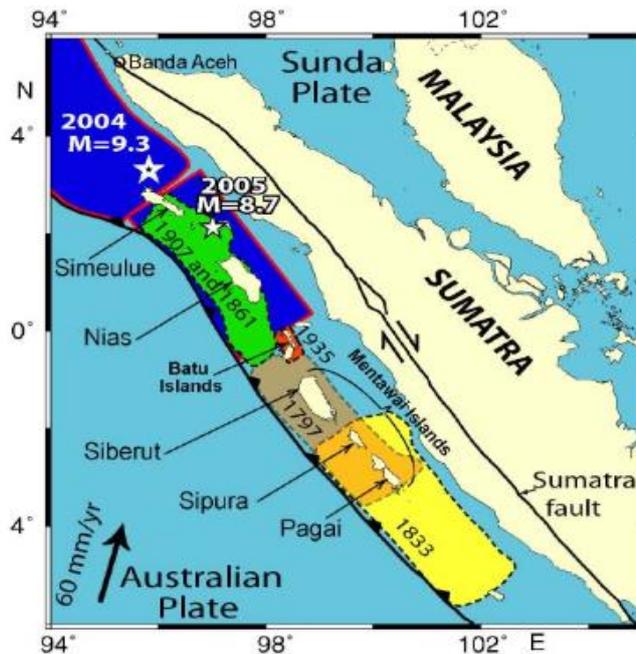
BAB II Teori Koseismik Gempa menggunakan Data GNSS

2.1 Gempa

Gempa didefinisikan sebagai getaran sesaat akibat terjadi pergeseran secara tiba-tiba pada kerak bumi. Penyebab bersumber karena adanya kekuatan. Penyebab utama gempa akibat adanya energi dari inti bumi yang menekan kerak bumi yang bersifat rapuh, sehingga kerak bumi tidak lagi kuat menahan respon gaya gerak energi dari dalam bumi tersebut maka akan terjadi batuan terpecahkan secara tiba-tiba. Siklus gempa bersifat berulang, perulangan gempa bumi dinamakan siklus gempa. Satu siklus berlangsung dalam kurun waktu seratusan tahun. Dalam satu siklus terdapat tahapan mekanisme terjadinya gempa yaitu fase interseismik, koseismik, dan postseismik. Pada penelitian ini tahapan mekanisme saat fase koseismik.

2.1.1 Sejarah Gempa di Zona Subduksi Sumatera 222 Tahun Terakhir.

Gempa besar yang terjadi di Sumatera sangat dipengaruhi oleh aktivitas tektonik zona subduksi Sumatera. Sebagian besar gempa yang terjadi di Sumatera, baik gempa kecil maupun gempa besar, berasal dari zona subduksi tersebut. Sejarah gempa yang cukup besar terjadi di zona subduksi Sumatera [9], antara lain di Kepulauan Mentawai dan Kepulauan Batu tahun 1797 (M8.3), 1833 (M9.0), dan 1935 (M7.7), di Nias-Sumeuleu tahun 1861 (M8.5) dan 1907 (M8.5), di Sumatera Barat tahun 2009 (M7.6), di Sumatera Utara tahun 2010 (M7.8), di Aceh tahun 2010 (M7.2) dan 2012 (M8.6), di Samudera Hindia tahun 2016 (M7.8) dan di Selat Sunda tahun 2019 (M6.9) dengan bidang patah masing-masing gempa seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Bengkulu untuk pertama kali mengalami bencana gempa pada tanggal 11 Desember 1681, kemudian 3 November 1756, 18 Maret 1818, 24 November 1883. 27 Juni 1902, 15 Desember 1979, 4 Juni 2000 dan gempa besar terakhir terjadi 12 September 2007 dengan kekuatan M8.5. Provinsi Bengkulu berada di daerah rawan gempa dimana gempa ringan yang seringkali terjadi cukup dirasakan oleh warga Bengkulu.



Gambar 2.1 Sejarah Gempa Besar di Zona Subduksi Sumatera [3]

2.1.2 Tektonik Lempeng

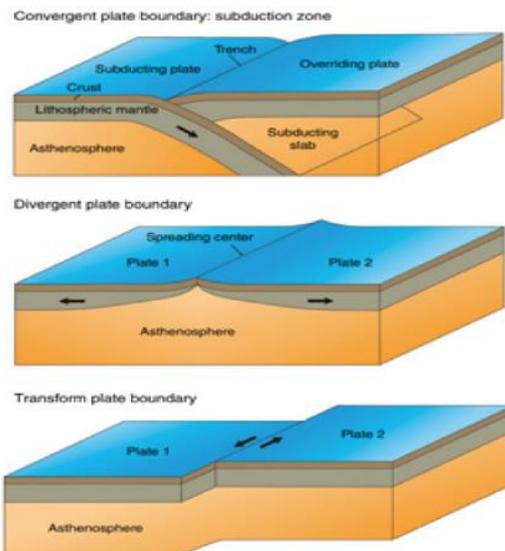
Tektonik Lempeng merupakan lapisan terluar bumi yang tersusun dari lempeng-lempeng besar maupun kecil, yang dimana lempeng-lempeng akan saling bergerak satu dan lainnya. Hal ini mengakibatkan bila sebagian bergerak maka lempeng lainnya akan bergerak. Perubahan kecil akan terjadi dan akan menimbulkan kerusakan besar karena bersinggungan langsung dengan lempeng lainnya. Secara umum pergerakan lempeng digolongkan dalam 3 jenis (Gambar 2.2) adalah:

1. *Transform* merupakan pergerakan sejajar antar dua lempeng secara horizontal.
2. *Convergence* merupakan pergerakan antar dua lempeng yang saling mendekat. Pada batas antara kedua lempeng yang bergerak dapat dibagi menjadi dua zona adalah:
 - a. Zona tumbukan, pergerakan ini akan mengakibatkan terbentuknya pegunungan.
 - b. Zona subduksi, pergerakan ini akan mengakibatkan gempa karena terjadinya tumbukan antar dua lempeng dengan berat jenis kedua lempeng berbeda. Pada zona subduksi terdapat *slab* yang

merupakan gaya tarik menarik antar lempeng tektonik yang menghunjam di batas subduksi.

3. *Divergence* merupakan pergerakan antar dua lempeng yang saling menjauh (berlawanan arah).

Salah satu pengukuran yang bertujuan melakukan mitigasi bencana yaitu pengukuran pergerakan lempeng. Bumi kita terdiri dari lapisan yang mempunyai karakteristik sendiri. Litosfer yang merupakan tempat berpijaknya benua dan samudera, berada di atas lapisan yang bersifat fluida yaitu lapisan astenofor dan mesosfer. Litosfer seolah-olah mengapung dan selalu dalam keadaan tidak stabil sangat mudah bergerak jika ada beban atau gaya yang bekerja padanya. Salah satu gaya yang menyebabkan terjadinya pergerakan lempeng adalah arus konveksi.



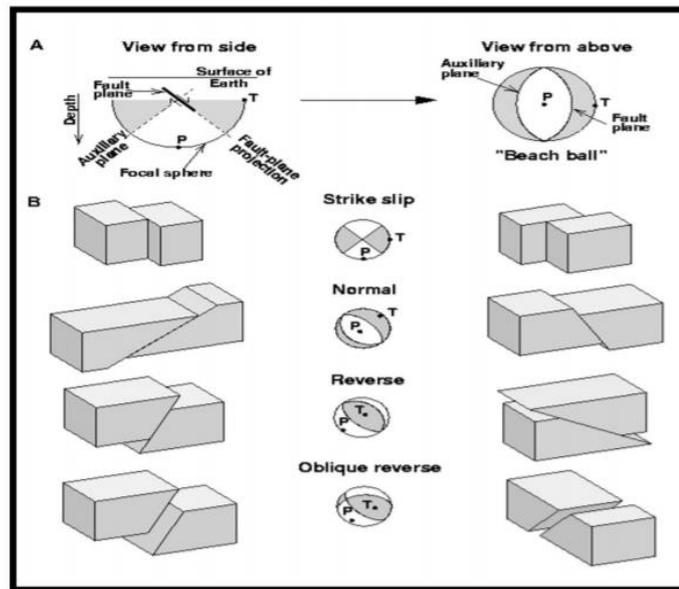
Gambar 2.2 Jenis Pergerakan Lempeng [11]

2.1.3 Mekanisme Gempa

Aktivitas lempeng merupakan penyebab terjadinya gempa, sebagian besar terjadi pada inti bumi yang dalam. Istilah mekanisme gempa digunakan untuk mempelajari pelepasan energi dari sumber gempa, dimana patahan merupakan mekanisme sering digunakan untuk menjelaskan pelepasan energi dari sumber gempa. Sumber dari gempa dikaitkan dengan bidang geometris gempa yang merupakan suatu bidang,

yang penyebaran energinya sangat dipengaruhi oleh lokasi, dimensi (panjang dan lebar), serta parameter-parameter geometris lainnya. Pada bidang geometri gempa terdapat *slip* yang merupakan pergeseran pada bidang geometris dengan kedalaman tertentu. 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 yang bergeser. Berdasarkan pergerakannya, patahan dikelompokkan menjadi empat bagian (Gambar 2.3) adalah:

1. Patahan naik merupakan patahan yang disebabkan batuan bergerak saling mendekat sehingga terjadi gaya tekan dengan sudut kemiringan $<45^\circ$ (Gambar 2.3).
2. Patahan normal merupakan patahan dengan arah vertikal dengan sudut kemiringan cukup besar dibandingkan dengan jenis sebelumnya (Gambar 2.3).
3. Patahan geser merupakan patahan dengan arah horizontal (Gambar 2.3).
4. Patahan miring merupakan patahan kombinasi dari patahan normal dan patahan geser, sehingga mengalami pergerakan horizontal kanan ataupun kiri (Gambar 2.3).

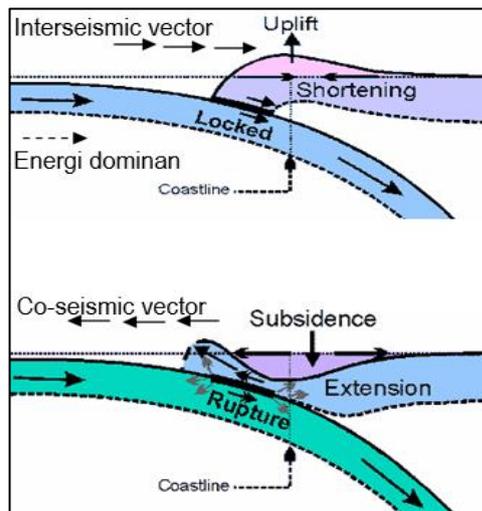


Gambar 2.3 Bentuk Mekanisme Gempa dan Jenis-jenis Patahan [12]

2.1.4 Koseismik

Koseismik merupakan fase ketika terjadi gempa, dimana getaran pada bumi terasa paling kuat karena terjadinya pergeseran secara tiba-tiba pada kerak bumi. Tahap koseismik dapat menyebabkan sebagian kerak bumi mengalami deformasi mencapai meter. Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda [10]. Berdasarkan definisi deformasi dalam konteks yaitu pergerakan lempeng adalah perubahan dan pergerakan titik-titik yang diletakkan pada lempeng yang akan diamati pola deformasinya dalam selang waktu tertentu sehingga dapat menunjukkan adanya perubahan dalam besaran tertentu secara absolut maupun relatif. Prinsip pengukuran deformasi adalah dengan memantau jarak, beda tinggi, sudut maupun koordinat antara titik-titik yang mewakili daerah tersebut [11]. Dikatakan titik bergerak absolut apabila dilakukan pemantauan perilaku gerakan dari titik itu sendiri. Sedangkan titik bergerak secara relatif apabila dilakukan pemantauan perilaku gerakan dari titik yang lain. Menganalisa deformasi dalam survei ini bertujuan untuk menentukan kuantitas pergeseran dan parameter-parameter deformasi yang memiliki karakteristik dalam ruang dan waktu [12].

Deformasi koseismik terjadi secara vertikal dan horizontal. Pada zona subduksi adanya aktivitas lempeng samudera yang menghujam terhadap lempeng lainnya. Pertemuan antar lempeng tersebut dapat terjadi pada sumber gempa. Energi dominan yang datang dari lempeng samudera bersifat kontinyu dan menyebabkan akumulasi energi di daerah sumber gempa, dapat dilihat pada Gambar 2.4 arah pergerakan koseismik. Energi yang telah diakumulasikan maka dapat terjadi deformasi interseismik. Interseismik searah dengan laju pergerakan lempeng samudera. Ketika energi deformasi lebih besar dari gaya antar lempeng, dapat terjadi koseismik dari gempa: bagian lempeng tergeser atau terdeformasi secara tiba-tiba dan diiringi dengan getaran yang kuat di permukaan bumi dan laju dari arah pergerakan koseismik ini berlawanan arah dengan arah laju interseismik. Dalam menganalisis pergerakan koseismik dapat dilakukan secara geometrik [12]. Dalam mengamati fase koseismik dapat menggunakan metode *Global Navigation Satellite System* (GNSS).



Gambar 2.4 Arah Pergerakan Koseismik [15]

2.2 *Global Navigation Satellite System*

Global Navigation Satellite System (GNSS) teknologi yang dapat mengamati fase gempa yaitu: interseismik, koseismik, dan postseismik [3, 5, 6, 7, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22] dan GNSS merupakan sistem penentuan posisi yang berbasis satelit dengan tambahan sesuai dengan kebutuhan dalam mendukung operasi yang

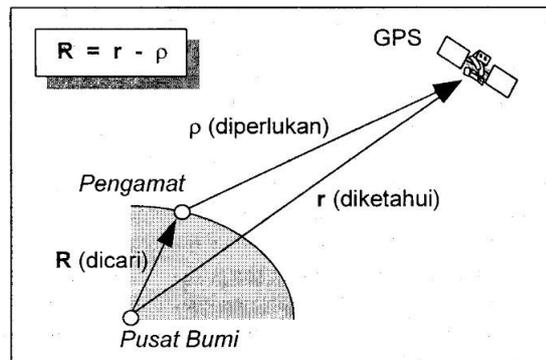
diinginkan, yang menyediakan posisi tiga dimensi, kecepatan, dan informasi waktu kepada pengguna yang berada atau di dekat permukaan bumi selama 24 jam [13]. Pengukuran GNSS sekarang telah banyak digunakan dalam mempelajari dinamika sistem bumi (geodinamika), yang salah satunya adalah fenomena gempa. Pada fenomena gempa dengan GNSS dapat mengamati perubahan koordinat dari titik-titik pengamatan yang dilakukan secara kontinyu atau berkala (periodik), dengan ketelitian orde hingga millimeter. Penelitian ini fenomena gempa yaitu fase koseismik, sehingga menggunakan metode GNSS untuk melihat pergeseran akibat gempa. Dalam melakukan pengamatan menggunakan GNSS terdapat kesalahan bias dan sumber kesalahan. Berikut bias dan sumber kesalahan pada pengamatan GNSS adalah:

1. Kesalahan orbit satelit, merupakan kesalahan pada letak/posisi orbit satelit yang dimana tidak sama dengan orbit satelit yang sebenarnya.
2. *Cycle slips*, merupakan kesalahan ketidakkontinuan dalam jumlah gelombang yang diterima karena data pengamatan sinyal oleh *receiver* terputus oleh hal tertentu.
3. *Multipath*, merupakan kesalahan pada lintasan yang melalui dua atau lebih karena efek pantulan benda-benda di sekitar pengamat.
4. Ambiguitas fase, merupakan kesalahan jumlah gelombang penuh yang tidak terukur oleh *receiver*.
5. Kesalahan jam satelit dan *receiver*, merupakan kesalahan penyimpangan pada sistem waktu satelit.
6. Kesalahan antena, merupakan kesalahan yang terjadi perbedaan lokasi antara pusat fase dan pusat geometris antena yang menyebabkan kesalahan jarak ukuran.
7. Refraksi troposfer, merupakan kesalahan pada lapisan dari atmosfer yang akan menyebabkan kesalahan terhadap hasil ukuran jarak.
8. Refraksi ionosfer, merupakan kesalahan atas dari atmosfer yang akan menyebabkan sinyal pada *pseudorange* melambat sehingga mempengaruhi ukuran jarak dari pengamat ke satelit.

2.2.1 Konsep Penentuan Posisi dengan GNSS

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. Prinsip dasar penentuan posisi dengan GNSS diperlihatkan pada Gambar 2.5. Dalam pengolahan GNSS yang dihasilkan masih dalam koordinat geosentrik. Ada tahapan selanjutnya yaitu proses transformasi koordinat geosentrik ke koordinat toposentrik yang pusat sumbunya berada di permukaan bumi sehingga dapat memperlihatkan besarnya pergeseran pada permukaan bumi. Dalam hal ini parameter yang akan ditentukan adalah posisi geosentrik pengamat (R). Untuk itu, karena posisi geosentrik satelit (r) telah diketahui, maka yang perlu ditentukan adalah posisi toposentrik satelit terhadap pengamat (ρ). 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). Maka persamaan yang disusun untuk pengamatan jarak:

$$\sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2} + c \cdot dt = \rho_i \quad (2.0)$$



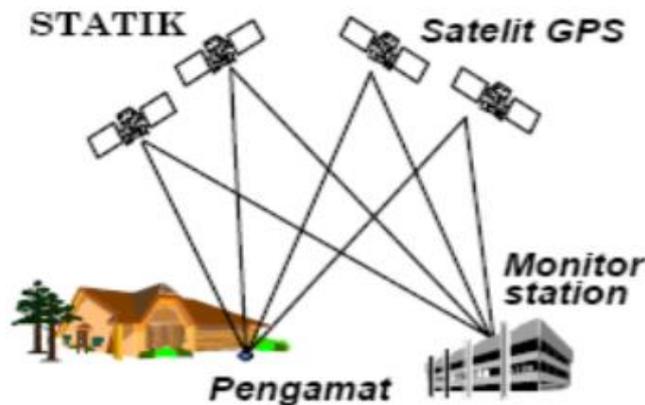
Gambar 2.5 Prinsip Dasar Penentuan Posisi dengan GNSS [17]

2.2.2 Global Navigation Satellite System dalam Studi Geodinamika.

Metode GNSS terdapat 3 macam tipe *receiver* [14] adalah tipe navigasi (*handheld*), tipe geodetik *single frekuensi*, dan tipe geodetik *dual frekuensi*. Dalam studi geodinamika seperti gempa menggunakan metode *static diferensial* dengan tipe geodetik *dual frekuensi* (Gambar 2.6).

Metode *static differential* merupakan metode yang baik untuk mengamati aktivitas gempa dengan ketelitian sampai milimeter. Berikut efektivitas dari metode *static differential* sangat tergantung pada faktor-faktor, sebagai berikut:

1. Jarak antara titik referensi dengan titik yang akan ditentukan posisinya (*baseline*), dimana semakin pendek *baseline* semakin efektif pengamatan yang dilakukan terhadap satelit yang sama antar titik-titik *baseline*.
2. Lama pengamatan yang dilakukan, dimana semakin lama pengamatan akan semakin banyak data posisi yang diterima oleh *receiver* dari satelit.
3. Strategi pengolahan data, dimana dalam studi potensi gempa biasanya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ilmiah seperti GAMIT dan *Bernesse*.



Gambar 2.6 Metode Statik Diferensial [17]

2.2.3 Stasiun Data SuGAR (*Sumatran GPS Array*)

Sumatran GPS Array (SuGAR) dibuat dan dioperasikan oleh anggota *Earth Observatory of Singapore* (EOS) dan Lembaga Ilmu Penelitian Indonesia (LIPI). Data pengamatan GNSS ini memiliki interval waktu pengamatan 15 detik. Sejak tahun 2002, SuGAR secara berkelanjutan memonitor pergerakan tektonik di sepanjang pantai barat Sumatra dan Kepulauan Mentawai [15]. Pengoperasian SuGAR dimulai dengan memasang enam stasiun cGPS (*continued GPS*) pada tahun 2002 dan terus dipelihara dan dikembangkan, baik dari segi jumlah peralatan yang terus

ditingkatkan dan sistem data jaringannya. Tahun 2008, SuGAR telah memiliki stasiun cGPS sebanyak 33 buah tersebar di wilayah Sumatera yang ditunjukkan simbol kotak hijau (Gambar 2.7) yang setiap harinya merekam data GNSS secara kontinyu. Stasiun SuGAR dapat merekam data pengukuran 100 kbytes sampai mbytes per hari dengan *sampling rate* yang digunakan adalah 15 detik [2]. *Sumatran GPS Array* (SuGAR) berharga secara ilmiah, sebagai berikut:

1. Banyak stasiun GNSS terletak di pulau-pulau yang secara langsung untuk merekam deformasi pada zona subduksi.
2. Beberapa gempa hebat telah terjadi di sepanjang Sumatera sejak jaringan telah diimplementasikan, dan satu bahkan telah diperkirakan.



Gambar 2.7 Sebaran Stasiun GPS Kontinyu SuGAR [19]

2.2.4 Perhitungan Vektor

Persamaan yang digunakan untuk menghitung koseismik menggunakan metode perataan parameter adalah [16].

$$T = \begin{bmatrix} n \\ e \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\sigma_T = \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_e \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$X = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (2.3)$$

$$X = \begin{bmatrix} v \\ a \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} Y_1 & 1 \\ Y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ Y_n & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$L = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$P = \sigma_a / \begin{bmatrix} \sigma_{T_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{T_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{T_n} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$V = BX - L \quad (2.8)$$

$$\sigma_{apos} = \frac{v^T PV}{n-1} \quad (2.9)$$

$$Q_{xx} = (B^T PB)^{-1} \quad (2.10)$$

$$Q_{vv} = P^{-1} - (BQ_{xx}B^T) \quad (2.11)$$

$$Q_{LL} = P^{-1} - Q_{vv} \quad (2.12)$$

$$\Sigma_{LL} = \sigma_{apos} \times Q_{LL} \quad (2.13)$$

$$\Sigma_{LL} = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & \sigma_{va} \\ \sigma_{va} & \sigma_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Keterangan:

T = Koordinat toposentrik

σ_T = Standar deviasi koordinat toposentrik

B = Matriks penyesuaian untuk kuadrat terkecil

X = Matriks tidak diketahui untuk kuadrat terkecil

L = Matriks diketahui untuk kuadrat terkecil

P = Matriks bobot untuk kuadrat terkecil

V = Matriks residual

v = Kecepatan

σ_a = Nilai apriori

σ_{apos} = Nilai aposteriori

σ_v = Standar deviasi kecepatan

Berikut persamaan untuk mencari ketelitian pergeseran adalah:

$$dn = n_{i+1} - n_i \quad (2.15)$$

$$de = e_{i+1} - e_i \quad (2.16)$$

$$\sigma_{dn} = \sqrt{\sigma_{n_{i+1}}^2 + \sigma_{n_i}^2} \quad (2.17)$$

$$\sigma_{de} = \sqrt{\sigma_{e_{i+1}}^2 + \sigma_{e_i}^2} \quad (2.18)$$

Keterangan:

n, e = Koordinat toposentrik

dn = Vektor komponen utara dan selatan

de = Vektor komponen timur dan barat

σ_{de} = Standar deviasi de

2.2.5 Uji Statistik

Uji statistik ini dilakukan dengan cara menguji variable pergeseran titik (P) yang dimana nilainya dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P = (dn^2 + de^2)^{1/2} \quad (2.19)$$

Keterangan:

P = Variabel pergeseran titik

dn = Vektor komponen utara dan selatan

de = Vektor komponen timur dan barat

Untuk mendapatkan standar deviasi P (stdP) dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

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

Keterangan:

$StdP$ = Resultan standar deviasi

σ_{dn} = Standar deviasi dn

σ_{de} = Standar deviasi de

Pada tes ini, hipotesis nol ($P=0$) menunjukkan bahwa pergeseran tidak signifikan, sedangkan ($P \neq 0$) menunjukkan bahwa pergeseran cukup signifikan. Statistik yang digunakan dalam menguji pergeseran titik-titik pengamatan adalah:

$$T = \frac{P}{StdP} \quad (2.21)$$

Keterangan:

P = Variabel pergeseran titik

$StdP$ = Resultan standar deviasi

T = Besaran yang menunjukkan signifikan pergeseran.

Pergeseran dinyatakan signifikan atau hipotesa nol ditolak adalah:

$$T > t_{df, \alpha/2} \quad (2.22)$$

Keterangan:

df = Derajat kebebasan (diasumsikan tak hingga)

α = Level signifikan yang digunakan.

Oleh karena itu digunakan tabel distribusi normal dengan selang kepercayaan 95% maka nilai $T > t_{df, \alpha/2}$ adalah 1.96.