

***Continuous GPS Time Series Data
Analysis in Sumatera; Case of Study :
Continuous Data SuGAR (Sumatran
GPS Array) 2004-2007***

**Analisis Data *Time Series* GPS
Kontinu di Daerah Sumatera
(Studi Kasus : Data *Continuous* SuGAR
(*Sumatran GPS Array*) Tahun 2004-
2007)**

Sarah Leila Hanief
Irwan Meilano
Dudy Darmawan Wijaya

***Continous GPS Time Series Data Analysis in Sumatera;
Case of Study : Continous Data SuGAR (Sumatran GPS
Array) 2004-2007***

**Analisis Data Time Series GPS Kontinu di Daerah
Sumatera; Studi Kasus : Data Continous SuGAR
(Sumateran GPS Array) Tahun 2004-2007**

Sarah Leila Hanief, Irwan Meilano, Dudy Darmawan Wijaya

Geodesy Research Division, Faculty Earth Sciences and Technology, Institut Teknologi
Bandung, Ganesha 10, Bandung 40132, West Java, INDONESIA

Abstract. In each GPS time series data, there are signals which exist and affect the result that has been received, which is called noise. Those noise components will form certain pattern in time series. Basically, time series has periodic component which commonly not being able to be detected directly. To detect which periodic component that dominantly affect the time series, there is a way which is called spectral analysis. With acknowledge periodic component in a time series, we can know the characteristic of the time series and then we can determine how many parameters will be needed to do curve fitting. There are two approximations in fitting, it is either linier fitting only or linier fitting with including periodic component. As a comparison between these two methods, we need to estimate displacements velocity rate in a year. From the analysis that has been done, the result is that the biggest difference of displacements velocity rate between these two methods is 3.7 milimeters per year.

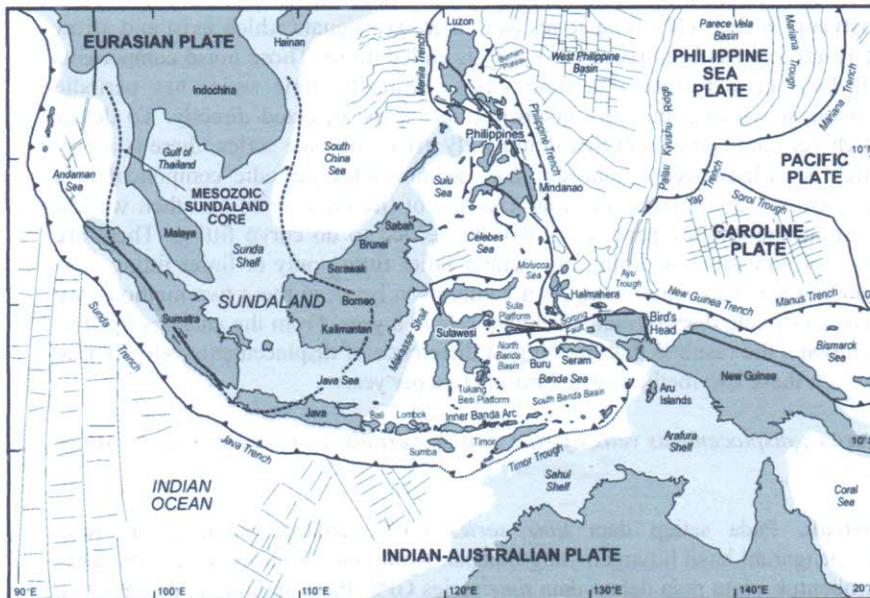
Keywords : *displacements velocity rate, fitting, periodic component, spectral analysis, time series.*

Abstrak. Pada setiap data *time series* GPS, terdapat sinyal-sinyal yang mempengaruhi hasil hitungan yang didapat. Komponen-komponen tersebut akan membentuk suatu pola dalam data *time series* GPS. Pada umumnya, dalam suatu data *time series* GPS terdapat komponen periodik yang biasanya tidak dapat dideteksi dengan langsung. Untuk mendeteksi komponen periodik yang berpengaruh dominan dalam suatu data *time series*, maka dilakukan analisis spektral. Dengan mengetahui jenis dari komponen periodiknya, maka kita bisa mengetahui karakteristik dari data *time series* tersebut dan kemudian dapat ditentukan berapa jenis parameter yang dibutuhkan untuk melakukan *curve fitting*. Dalam melakukan *fitting*, digunakan dua buah pendekatan, yaitu *fitting* secara linier saja dan *fitting* linier dengan memperhitungkan komponen periodik. Sebagai bahan perbandingan antara kedua metode ini, maka dihitung pula laju pergeseran titik pengamatan per tahunnya. Dari analisis yang dilakukan terhadap kedua metode ini, didapat bahwa perbedaan laju pergeseran per tahun ketika menggunakan metode *fitting* linier dan ketika menggunakan metode *fitting* linier dengan memperhitungkan komponen periodik yang paling besar yaitu bernilai 3.7 mm per tahun.

Kata kunci : *analisis spektral, fitting, komponen periodik, laju pergeseran, time series.*

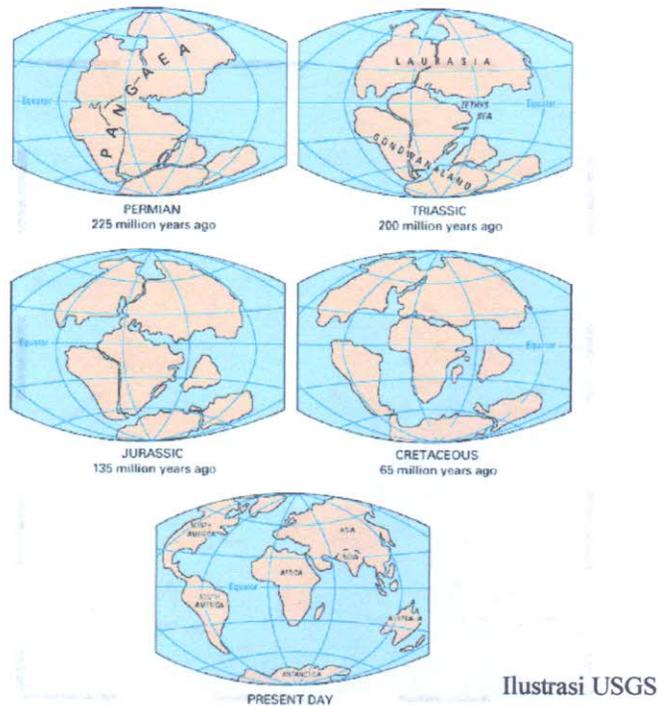
1 Pendahuluan

Gempa bumi dengan magnitudo besar yang berpusat di lepas pantai barat propinsi Nangroe Aceh Darussalam kemudian disusul dengan bencana tsunami dahsyat, telah menyadarkan banyak orang bahwa ternyata Indonesia; khususnya wilayah Sumatera; memiliki potensi bencana alam gempa bumi. Alasan dibalik mengapa Indonesia memiliki potensi tersebut ialah letak Indonesia yang merupakan pusat pertemuan dari lempeng-lempeng antara lain Eurasia, Filipina, Caroline, Indo-Australia, Pasifik, dan beberapa lempeng minor [Hamilton, 1979]. Terkait dengan lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia memiliki pergerakan rata-rata ke arah utara, sedangkan pergerakan lempeng Filipina cenderung ke arah barat laut [Hamilton, 1979 & Puspito, 1995 dalam USGS, 2011]. Terkait dengan lempeng Filipina, lempeng Caroline memiliki pergerakan ke arah tenggara di bagian palung Aru dan ke arah barat laut di bagian palung Yap [Seno, et.al, 1992 dalam USGS, 2011].



Gambar 1.1 Batas pertemuan lempeng di Indonesia [Hall, 2002].

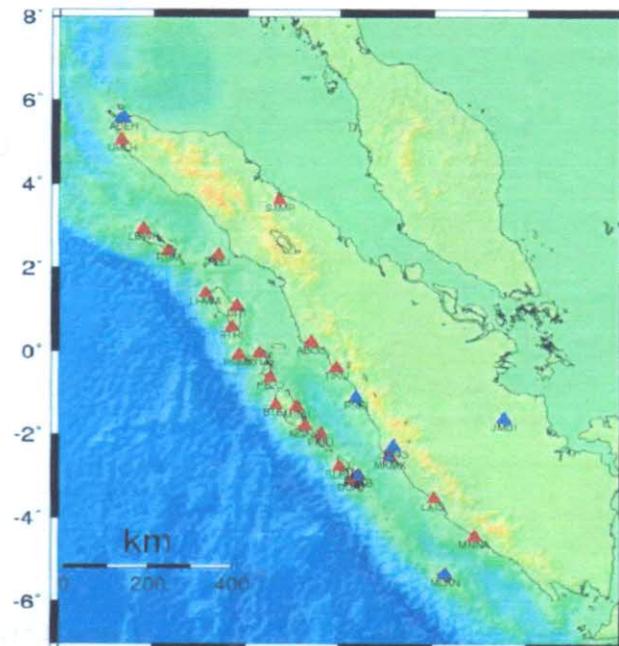
Dengan kondisi tersebut, merupakan hal yang wajar jika Indonesia sering mengalami bencana gempa bumi yang diakibatkan aktifitas tektonik lempeng-lempeng yang mengelilinginya. Aktifitas tektonik sendiri merupakan teori baru yang dikemukakan oleh Alfred Lothar Wegener pada tahun 1912. Teori yang dikenal dengan *Continental Drift* (pergeseran benua) ini mengemukakan bahwa sekitar 200 tahun yang lalu, daratan yang sangat luas yang dinamakan *Pangaea*, mulai terpisah. Alexander Du Toit, seorang professor di bidang geologi dari Universitas Witwatersrand yang juga salah satu pendukung Wegener yang setia, mengemukakan bahwa *Pangaea* pertama kalinya pecah menjadi dua buah daratan yang sangat luas, yaitu *Laurasia* di belahan bumi bagian utara, dan *Gondwanaland* di belahan bumi bagian selatan [USGS, 2011].



Gambar 1.2 Perkembangan Benua di Bumi Berdasarkan Teori *Continental Drift*.

Teori tektonik lempeng ini memiliki prinsip dasar yaitu bahwa bumi ditutupi oleh lapisan yang dingin dan tipis yang disebut litosfer. Lapisan ini mengambang di atas lapisan yang lebih padat dan memiliki suhu lebih hangat yang dapat mengalir, yang disebut mantel. Lapisan litosfer ini terpecah-pecah menjadi beberapa bagian yang disebut lempeng. Batuan yang berbentuk *semi-liquid* yang berada di bawah mantel ini bergerak karena pengaruh dari panas yang berasal dari inti bumi dan mengakibatkan lempeng yang ada di atas mantel bergerak satu sama lain. Hal itulah yang menyebabkan fenomena alam seperti gempa bumi, gunung meletus, terbentuknya jajaran pegunungan, terbentuknya palung laut, dan sebagainya [Noyes, 2011].

Pantai barat Sumatera adalah salah satu daerah rawan gempa di Indonesia dikarenakan letaknya yang berdekatan dengan salah satu perbatasan lempeng aktif, yaitu antar lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia. Karena hal tersebut, Pulau Sumatera memiliki catatan gempa yang sangat panjang. Dalam kurun waktu 5 tahun saja, yaitu dari tahun 2004 hingga tahun 2008, sudah terjadi lebih dari 10 buah gempa bumi dengan magnitudo rata-rata tinggi (5-9 MW) [USGS, 2008]. Dengan potensi tersebut, maka sejak tahun 2002, Geoteknologi LIPI bekerjasama dengan Tectonic Observatory Caltech sudah mengembangkan stasiun GPS kontinu yang dinamakan Sumatran GPS Array (SuGAR). Stasiun SuGAR ini tersebar memanjang di pantai barat Pulau Sumatera sehingga diharapkan setiap perubahan yang terjadi akibat pergerakan batas lempeng Indo-Australia dan Eurasia dapat teramati.



Gambar 1.3 Persebaran titik-titik Stasiun SuGAR [Rahman, 2011 dengan sedikit perubahan]

Dari data-data yang didapat dari pengukuran Stasiun GPS SuGAR ini kita dapat menghitung perubahan naik-turun dan juga pergerakan horizontal dari muka bumi dengan sangat akurat. Dari pengukuran ini kemudian kita juga dapat melakukan studi deformasi yang terjadi, antara lain mengenai siklus gempa bumi, atau kita juga dapat memodelkan dimensi dan kekuatan dari sumber gempa.

Dalam menganalisis data *time series* hasil pengamatan geodetik, kadang kala dapat dilakukan dengan mudah jika data tersebut tidak memiliki tren dan memiliki rasio *noise-to-signal* yang kecil. Tapi pada kenyataannya, hasil data pengamatan yang didapat seringkali memiliki rasio *noise-to-signal* yang tinggi, atau terdiri atas gabungan dari bermacam-macam jenis sinyal yang berbeda. Untuk itulah teknik analisis spektral dapat menyajikan hasil yang terbaik [Pytharouli, et.al, 2004].

2 Metodologi

2.1 Deret Waktu

Deret waktu (*time series*) merupakan sederetan pengamatan yang dihubungkan dengan ruang waktu [Box and Jenkins, 1970 dalam Wijaksana, 2009]. Jika suatu pengukuran dilakukan dalam suatu selang waktu tertentu, maka akan diperoleh data ukuran deret waktu yang diskrit (*lead time - t*). Deret waktu digunakan untuk menggambarkan sifat dari suatu variabel pada waktu yang lalu sebagai acuan untuk menentukan sifat variabel tersebut pada waktu tertentu, baik interpolasi maupun ekstrapolasi.

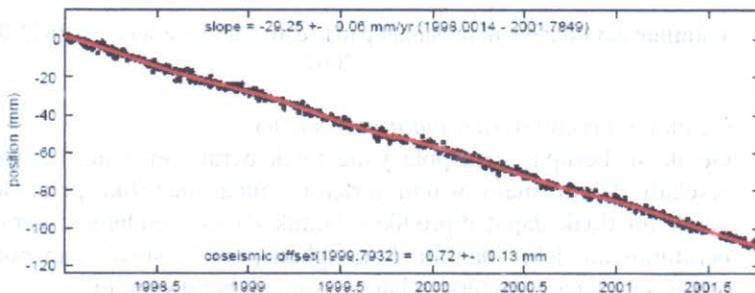
Secara klasik, deret waktu terbagi atas empat kategori [Wijaksana, 2009], yaitu :

- a. Kecenderungan (*trend* atau *long term movement*)
 Kecenderungan merupakan gerak yang menunjukkan tren dari deret waktu yang biasanya dalam jangka yang lama dan menggambarkan sifat kekontinuitasan dari waktu ke waktu selama jangka waktu tersebut.

Sebagai contoh jika suatu data memiliki tren linier, maka model matematis dari plot data tersebut yaitu memenuhi persamaan :

$$y(t) = ax + b \dots\dots\dots [1]$$

dimana *x* merupakan waktu pengamatan dan *y(t)* merupakan data pergerakan berdasarkan suatu deret waktu, adapun *a* dan *b* merupakan parameter yang nilainya ditentukan berdasarkan semua nilai data pengamatan. Gambar berikut adalah contoh data yaitu data *time series* GPS yang memiliki tren linier.

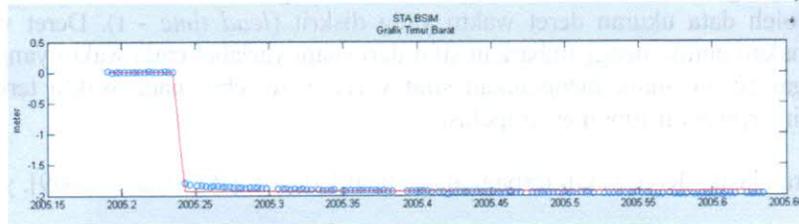


Gambar 2.1 Tren linier dalam suatu data pengamatan *time series* GPS [Nikolaidis, 2002].

Dalam pengamatan *time series* GPS, pola linier merupakan pola deformasi yang diamati. Akan tetapi, pola deformasi yang diperoleh dalam setiap pengamatan GPS tidak pernah lepas dari pengaruh pola musiman, pola naik-turun, dan pola tak beraturan.

b. Gerak naik-turun (*cyclical movement*)

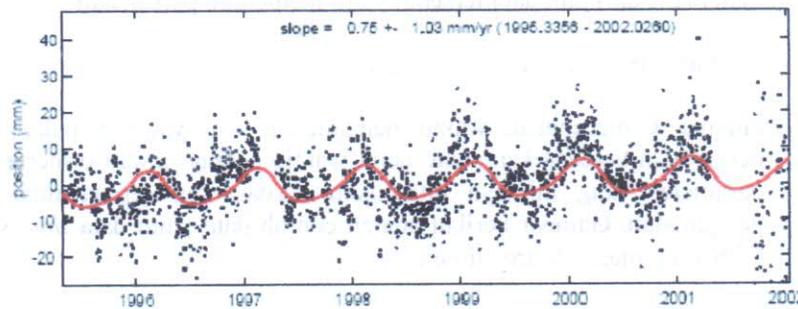
Gerak naik-turun merupakan pola yang disebabkan oleh beberapa faktor tertentu yang menyebabkan terdapatnya perubahan signifikan terhadap suatu tren data. Contohnya pada suatu data *time series* berikut, dimana pola naik-turun diakibatkan oleh adanya aktivitas koseismik di titik pengamatan tersebut, yaitu gempa bumi Nias pada bulan Maret 2005.



Gambar 2.2 Pola naik-turun dalam suatu data *time series* GPS.

c. Gerak musiman (*seasonal variation*)

Gerak musiman merupakan pola yang teratur dan relatif serupa yang bersifat periodik, yaitu gerakan yang memiliki periode berulang dalam selang waktu tertentu. Berikut adalah contoh dari pola gerak musiman.

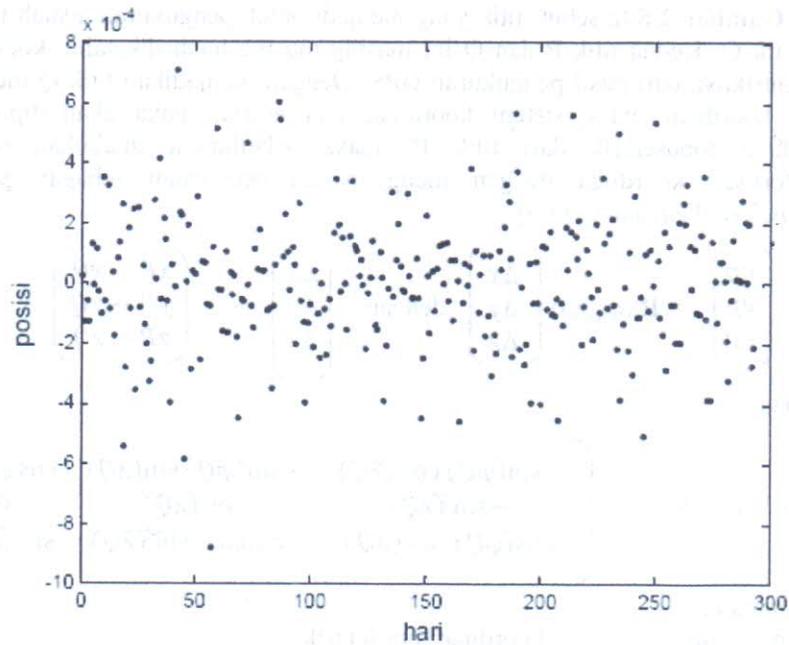


Gambar 2.3 Pola gerak musiman pada suatu data *time series* GPS [Nikolaidis, 2002].

d. Gerak tak beraturan (*irregular movement*)

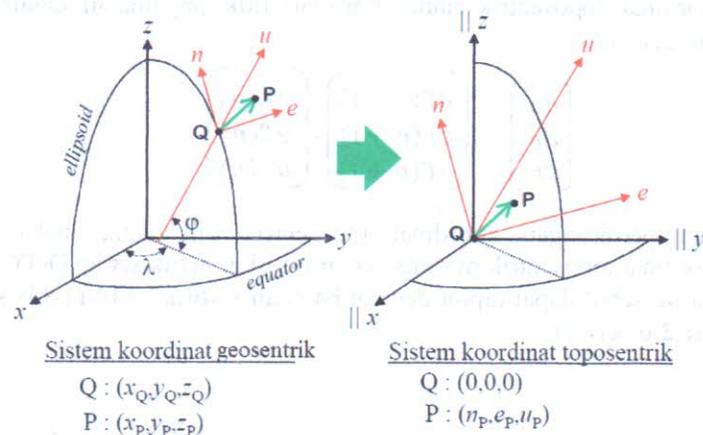
Gerak ini berupa suatu pola yang tidak beraturan, yang hanya terjadi sesekali dalam suatu waktu tertentu tanpa memiliki pola, sehingga gerak ini tidak dapat diprediksi. Untuk dapat mendeteksi gerakan tak beraturan ini, lebih dahulu dihilangkan pola musiman dan pola naik-turun, sehingga yang tersisa hanya pola tak beraturan ini.

Dalam pengamatan GPS, pola tak beraturan ini merupakan indikasi adanya data *outlier* atau data yang masih memiliki kesalahan besar. Data *outlier* ini merupakan data yang seharusnya tidak digunakan dalam suatu data pengamatan, sehingga keberadaannya harus dihilangkan. Berikut adalah contoh data *time series* GPS yang dipengaruhi oleh *outlier*.



Gambar 2.4 Pola tak beraturan dalam suatu data *time series* GPS [Casimin, 2009].

Untuk keperluan pengamatan deformasi pada suatu titik-titik pengamatan, diperlukan data deret waktu yang terjadi pada titik-titik pengamatan tersebut dalam suatu kurun waktu tertentu. Pada awalnya, data pengamatan yang diperoleh dari pengukuran GPS adalah data koordinat posisi titik pengamatan dalam sistem koordinat geosentrik. Data posisi tersebut kemudian ditransformasi ke dalam sistem koordinat toposentrik.



Gambar 2.5 Hubungan antara sistem koordinat geosentrik dengan sistem koordinat toposentrik [Kosasih & Wedyanto, 2005].

Pada **Gambar 2.5** tersebut, titik yang menjadi objek pengukuran adalah titik P dan titik Q. Kedua titik P dan Q ini masing-masing telah diketahui koordinat geosentriknya dari hasil pengukuran GPS. Dengan menjadikan titik Q menjadi pusat koordinat untuk sistem koordinat toposentrik, maka akan diperoleh koordinat toposentrik dari titik P, maka selanjutnya dilakukan proses transformasi koordinat dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [Kosasih & Wedyanto, 2005] :

$$\begin{pmatrix} np \\ ep \\ up \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\varphi_Q, \lambda_Q) \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad \text{dengan} \quad \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^P - x^Q \\ y^P - y^Q \\ z^P - z^Q \end{pmatrix}$$

Adapun

$$\mathbf{R}(\varphi_Q, \lambda_Q) = \begin{pmatrix} -\sin(\varphi_Q) \cos(\lambda_Q) & -\sin(\varphi_Q) \sin(\lambda_Q) & \cos(\varphi_Q) \\ -\sin(\lambda_Q) & \cos(\lambda_Q) & 0 \\ \cos(\varphi_Q) \cos(\lambda_Q) & \cos(\varphi_Q) \sin(\lambda_Q) & \sin(\varphi_Q) \end{pmatrix}$$

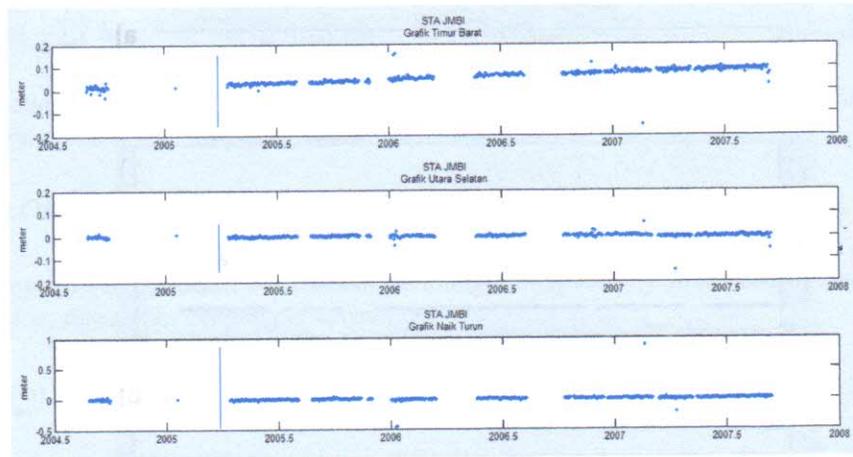
Keterangan :

np, ep, up	= koordinat toposentrik
φ_Q, λ_Q	= lintang geodetik dan bujur geodetik dari titik Q
x_Q, y_Q, z_Q	= koordinat titik ikat (geosentrik)
x_P, y_P, z_P	= koordinat titik pantau (geosentrik)
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	= selisih antara koordinat titik pantau dan titik ikat
\mathbf{R}	= matriks rotasi

Dalam membuat suatu data deret waktu untuk tiap stasiun, maka dalam proses perhitungan koordinat toposentrik ini yang menjadi titik pusat koordinat adalah yaitu koordinat titik pada kala (n), dan untuk data koordinat selanjutnya yaitu koordinat titik pada kala (n+i) untuk "i" yaitu *day of year* (DOY) pengamatan, sehingga koordinat toposentrik untuk tiap-tiap titik pengamatan dalam kala waktu tertentu adalah :

$$\begin{pmatrix} dn \\ de \\ du \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nT(n+i) \\ eT(n+i) \\ uT(n+i) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} nT(n) \\ eT(n) \\ uT(n) \end{pmatrix}$$

Maka setelah perhitungan koordinat toposentrik dilakukan, maka dapat diperoleh koordinat toposentrik masing-masing stasiun untuk setiap DOY. Hasil dari koordinat tersebut dapat diplot dengan bantuan *software* MATLAB seperti pada **Gambar 2.6** berikut.



Gambar 2.6 Hasil plot dari koordinat toposentrik stasiun JMBI per-DOY.

Proses selanjutnya adalah melakukan *fitting* linier terhadap data mentah dari koordinat toposentrik masing-masing stasiun. Dari *fitting* linier tersebut, maka dihitung residu pengukuran dengan rumus :

$$v \text{ (residu)} = \text{data observasi} - \text{data model} \dots \dots \dots [2]$$

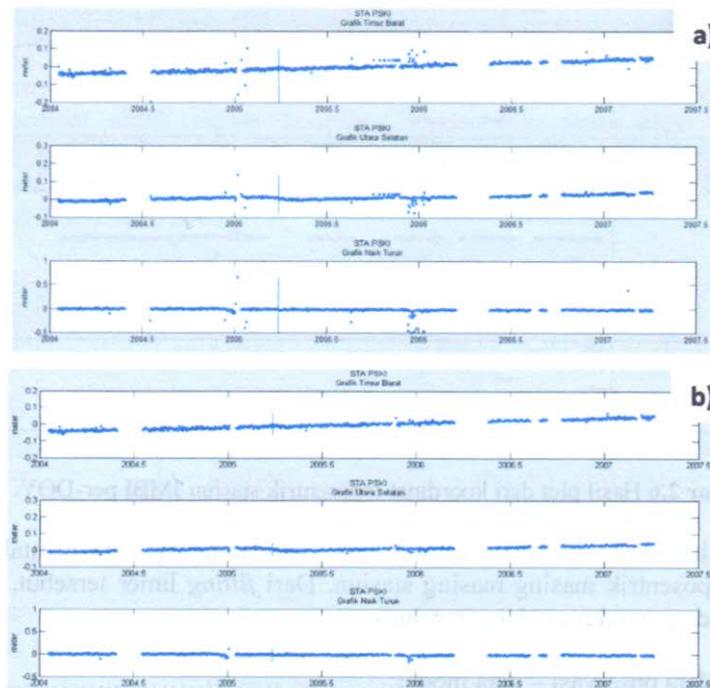
Dari data residu tersebut, kemudian dilakukan penghitungan terhadap standar deviasi. Rumus yang digunakan dalam menghitung standar deviasi adalah sebagai berikut.

$$\sigma = [\sum (x_i - \mu)^2]^{1/2} / (N-1) \dots \dots \dots [3]$$

dengan :

- σ = standar deviasi
- x_i = data ke-i
- μ = mean (rata-rata) sampel
- $N-1$ = jumlah sampel

Data yang tidak digunakan adalah data yang nilai residunya lebih dari 3 kali standar deviasi yang dianggap sebagai outlier. Setelah data outlier tersebut direduksi, barulah kita dapatkan data yang telah bersih. Sebagai contoh, berikut adalah gambar dari stasiun PSKI pada saat outlier belum direduksi dan setelah outlier direduksi.



Gambar 2.7 Perbandingan antara data *time series* stasiun PSKI sebelum outlier dihilangkan (a) dan sesudah outlier dihilangkan (b).

2.2 Analisis Spektral dengan Metode Normalisasi Periodogram Lomb

Sebuah data *time series* yang dianalisis secara detail dapat mengungkap informasi penting dengan lebih jauh lagi. Analisis mengenai karakteristik *noise* dan sinyal musiman dalam suatu *time series* membuat kita dapat mengetahui lebih dalam mengenai suatu proses dalam suatu jaring GPS, bahkan mengenai lingkungan sekitar suatu stasiun dipasang. Hal ini memungkinkan kita untuk memperoleh estimasi dari ketelitian kecepatan dan memperoleh informasi tentang kestabilan monumen GPS [Kenyeres, 2006].

Analisis dengan metode Periodogram Lomb dimaksudkan untuk mendeteksi adanya periodisitas dalam data pengamatan. Metode ini secara umum merupakan suatu cara yang ampuh dalam mendeteksi dan menguji signifikansi dari sinyal periodik yang pada dasarnya sulit dideteksi [Press, 1989]. Metode periodogram yang dikembangkan oleh Lomb (1976) dan Scargle (1982) merupakan pengembangan dari analisis tipe periodogram yang lain yaitu spektrum Fourier. Dasarnya adalah jika kita memiliki suatu set data yang bernilai h_i , dengan $i = 1, \dots, N$ dengan waktu pengamatan masing-masing data yaitu t_i , maka periodogramnya dibentuk dengan tahapan-tahapan sebagai berikut [Press, 1989] :

Pertama-tama yaitu menghitung rata-rata dan variansi dari set data dengan persamaan :

$$\bar{h} \equiv \frac{1}{N} \sum_1^N h_i, \quad \sigma^2 \equiv \frac{1}{N-1} \sum_1^N (h_i - \bar{h})^2 \dots\dots\dots [4]$$

Kedua, untuk tiap frekuensi angular yang memenuhi syarat $\omega \equiv 2\pi f > 0$, maka hitung *time-offset* τ dengan persamaan :

$$\tan (2\omega\tau) = \frac{\sum_i \sin 2\omega t_i}{\sum_i \cos 2\omega t_i} \dots\dots\dots [5]$$

Langkah ketiga adalah normalisasi periodogram (*spectral power* sebagai fungsi dari ω , dijelaskan dengan persamaan :

$$P_N(\omega) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{[\sum_i (h_i - \bar{h}) \cos \omega (t_i - \tau)]^2}{\sum_i \cos^2 \omega (t_i - \tau)} + \frac{[\sum_i (h_i - \bar{h}) \sin \omega (t_i - \tau)]^2}{\sum_i \sin^2 \omega (t_i - \tau)} \right\} \dots\dots\dots [6]$$

Nilai τ yang konstan membuat nilai $P_N(\omega)$ benar-benar independen, tidak dipengaruhi oleh perubahan dari t_i dengan nilai konstanta berapa pun. Lomb (1976) menunjukkan bahwa keputusan untuk memilih *offset* metode ini memiliki efek lain yang lebih penting; yaitu membuat persamaan [8] identik dengan persamaan dalam mengestimasi komponen harmonik dalam suatu data set, pada frekuensi ω , dengan menerapkan fitting linier kuadrat terkecil terhadap model pada persamaan berikut,

$$h(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t \dots\dots\dots [7]$$

maka dari itu, metode ini cocok diterapkan pada data yang tidak tersebar merata karena metode ini menekankan akan data per titik, bukan data per selang waktu.

2.3 Metode Menghitung Laju Pergeseran di Setiap Titik

Persamaan pengamatan untuk pergerakan yang terjadi pada tiap titik yaitu [Nikolaidis, 2002] :

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{g_j}) + v_i \dots\dots\dots [8]$$

- Keterangan :
- y(t_i) = pergeseran titik pada t_i,
 - t_i = data epok untuk i = 1, ..., n dalam satuan tahun,
 - a = koordinat awal stasiun GPS,
 - b = laju pergeseran dalam satuan meter/tahun,
 - c dan d = koefisien dari pergerakan yang bersifat periodik tahunan,
 - e dan f = koefisien dari pergerakan yang bersifat periodik semi-tahunan,
 - H = fungsi *Heaviside* ,
 - g = besar *magnitudes*,
 - T_g = epok.

Jika diasumsikan offset dari epok diketahui, maka model persamaan liniernya memiliki koefisien sebagai berikut

$$x = [a \ b \ c \ d \ e \ f \ g]^T \dots\dots\dots [9]$$

maka,

$$y = Ax \dots\dots\dots [10]$$

dimana A merupakan matriks desain yang berasal dari turunan parsial. Adapun untuk menghitung parameter yang tidak diketahui adalah :

$$x = A^{-1} y \dots\dots\dots [11]$$

Untuk mencegah hasil perhitungan yang *error* akibat dari kondisi matriks A yang tidak simetris, maka matriks A dikalikan dengan matriks transpose-nya, sehingga dihasilkan matriks A yang simetris. Jika matriks A dikalikan dengan matriks A transpose, maka matriks y pun harus dikalikan dengan faktor pengali yang sama, sehingga persamaannya menjadi,

$$x = [A^T A]^{-1} A^T y \dots\dots\dots [12]$$

3 Hasil dan Analisis

3.1 Analisis Komponen Periodik pada Setiap Data *Time Series* per Stasiun

Analisis untuk mendeteksi periodisitas suatu data *time series* dilakukan dengan menerapkan metode Periodogram Lomb yang merupakan teknik yang digunakan untuk data-data yang bersifat *unequally spaced* atau tidak tersebar secara merata.

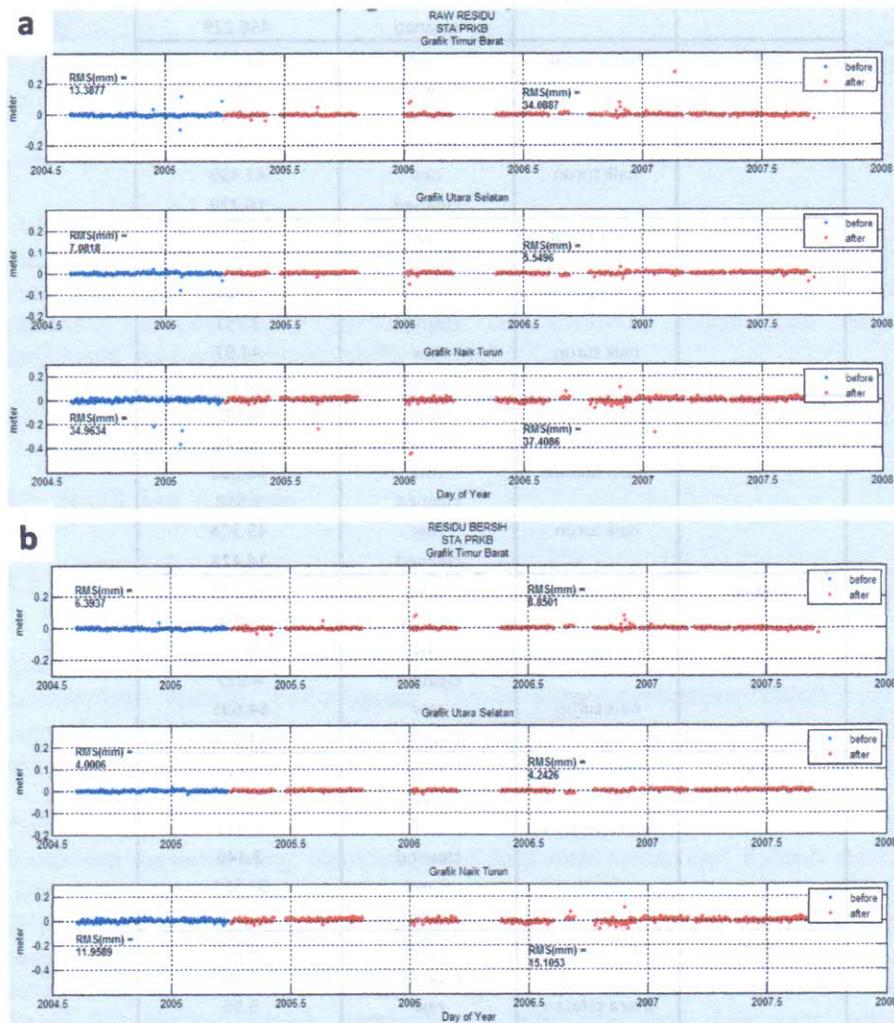
Pada kali ini, metode Periodogram Lomb digunakan untuk mendeteksi komponen periodik yang mempengaruhi data *time series* dari 8 buah stasiun GPS SuGAR, yaitu stasiun ACEH, BAKO, JMBI, LNNG, MKMK, MSAI, PRKB, dan PSKI, dalam selang waktu tahun 2004 - 2007. Teknik ini diterapkan pada data *time series* yang masih mengandung *outlier* dan pada data yang telah bebas *outlier* dengan *outlier* dihitung dengan menggunakan persamaan [3]. Pada **Tabel 3.1** berikut adalah perbandingan nilai rms dari data yang masih mengandung *outlier* dengan data yang *outlier*-nya telah direduksi.

Tabel 3.1 Daftar perbandingan nilai rms antara data yang mengandung *outlier* dengan data yang telah bebas *outlier*.

Stasiun GPS	Komponen	Time Series	RMS (mm)
ACEH	timur barat	raw	437.097
		cleaned	271.2924
	utara selatan	raw	177.704
		cleaned	123.591
	naik turun	raw	640.463
		cleaned	456.229
BAKO	timur barat	raw	14.741
		cleaned	7.07
	utara selatan	raw	11.149
		cleaned	5.416
	naik turun	raw	41.459
		cleaned	16.779
JMBI	timur barat	raw	12.7
		cleaned	5.132
	utara selatan	raw	7.947
		cleaned	3.757
	naik turun	raw	44.97
		cleaned	10.172
LNNG	timur barat	raw	34.603
		cleaned	9.676
	utara selatan	raw	48.082
		cleaned	8.558
	naik turun	raw	49.304
		cleaned	14.428
MKMK	timur barat	raw	17.327
		cleaned	6.286
	utara selatan	raw	10.365
		cleaned	4.217
	naik turun	raw	54.695
		cleaned	17.656
MSAI	timur barat	raw	7.212
		cleaned	4.494
	utara selatan	raw	5.451
		cleaned	3.446
	naik turun	raw	34.551
		cleaned	11.606
PRKB	timur barat	raw	34.089
		cleaned	6.85
	utara selatan	raw	5.55
		cleaned	4.243
	naik turun	raw	37.409
		cleaned	15.105
PSKI	timur barat	raw	10.718
		cleaned	5.391
	utara selatan	raw	8.333
		cleaned	5.055
	naik turun	raw	54.33
		cleaned	17.46

Dari data rms di atas dapat disimpulkan bahwa stasiun ACEH memiliki rms yang paling besar. Hal ini dapat diakibatkan akibat ketidak-kontinuitasan datanya yang sangat tinggi atau rendahnya rasio *signal-to-noise* yang terjadi tiap harinya.

Adapun gambar berikut memperlihatkan perbandingan rms antara data *time series* sebelum dan sesudah *outlier* dibuang.

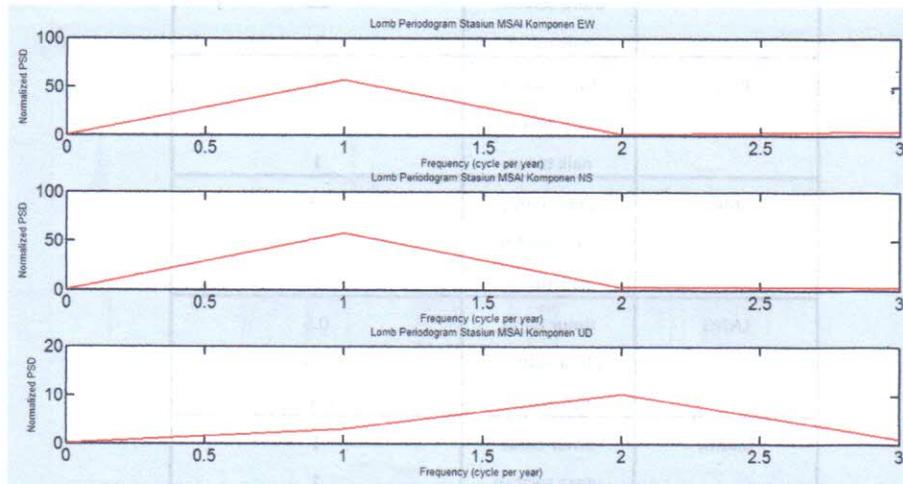


Gambar 3.1 Perbandingan *Root Mean Square* (rms) dari data *time series* sebelum *outlier* dibuang (a) dan sesudah *outlier* dibuang (b).

Sebagai contoh yang ditampilkan sebelumnya yaitu data *time series* stasiun PRKB.

Selanjutnya, tahap analisis periodesitas dilakukan terhadap data yang telah bebas dari outlier. Analisis ini dilakukan dengan tujuan untuk mendeteksi sinyal

periodesitas annual dan/atau semi-annual pada suatu data *time series*. Periodesitas ini dideteksi dengan menggunakan *software* MATLAB. Dengan menjadikan data hari dan data pergeseran per harinya sebagai input, maka hasilnya adalah sebagai berikut.



Gambar 3.2 Periodogram Lomb dari Stasiun MSAI untuk komponen EW, NS, dan UD.

Dari Periodogram Lomb pada **Gambar 3.2**, dapat dilihat bahwa data *time series* stasiun MSAI memiliki komponen sinyal periodik yang ditandai dengan adanya nilai frekuensi yang dominan. Pada komponen EW (*East West* – Timur Barat), dapat dilihat bahwa untuk frekuensi dengan nilai 1 *cycle per year* (cpy) memiliki nilai yang paling tinggi, artinya dalam komponen tersebut terdapat sinyal periodik yang mengalami perulangan sebanyak satu kali dalam satu tahun atau periodesitasnya yaitu satu tahun (annual). Begitu pula yang terjadi pada komponen NS (*North South* – Utara Selatan), terdapat sinyal periodik yang mengalami perulangan sebanyak satu kali dalam setahun. Lain halnya dengan yang terjadi dalam komponen UD (*Up Down* – Naik Turun), dimana nilai frekuensi yang dominan yaitu bernilai 2 cpy, yang artinya sinyal periodik yang terjadi mengalami perulangan yaitu dua kali dalam satu tahun, atau periodesitasnya yaitu setengah tahun (semi-annual). Berikut pada **Tabel 3.2** memuat periodesitas dari semua stasiun pengamatan lainnya.

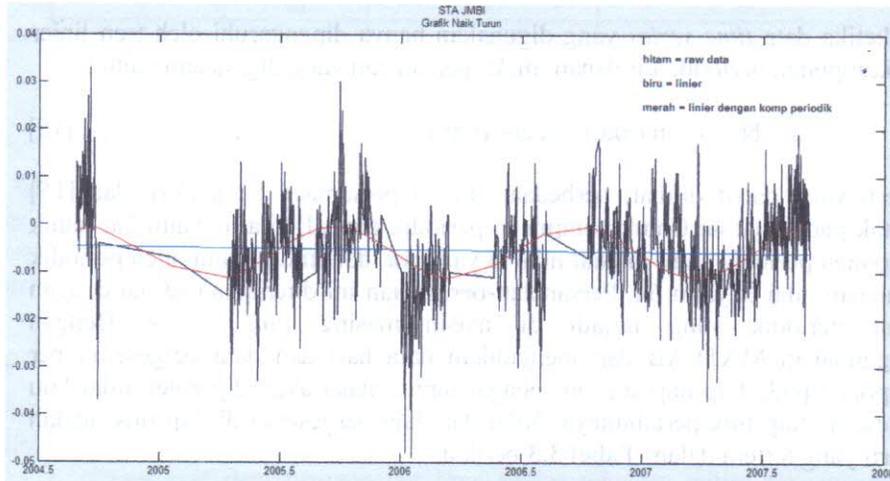
Tabel 3.2 Periodesitas Tiap-tiap stasiun GPS

Stasiun GPS	Komponen	Periodesitas (tahun)
ACEH	timur barat	0.5
	utara selatan	0.5
	naik turun	1
BAKO	timur barat	1
	utara selatan	1
	naik turun	1
JMBI	timur barat	0.5
	utara selatan	1
	naik turun	1
LNNG	timur barat	0.5
	utara selatan	0.5
	naik turun	0.33
MKMK	timur barat	1
	utara selatan	1
	naik turun	0.33
MSAI	timur barat	1
	utara selatan	1
	naik turun	0.5
PRKB	timur barat	1
	utara selatan	0.5
	naik turun	0.5
PSKI	timur barat	1
	utara selatan	1
	naik turun	0.5

Dari hasil yang dapat dilihat pada **Tabel 3.2**, pada umumnya komponen annual dan komponen semi-annual terjadi pada setiap stasiun. Sebanyak 7 buah stasiun memiliki komponen annual dan komponen semi-annual untuk setiap komponen yang berbeda, adapun pada stasiun LNNG dan MKMK komponen naik turun memiliki sinyal periodik dengan perulangan 4 bulan. Faktor utama yang menyebabkan terjadinya variasi nilai periodesitas pada tiap-tiap data *time series* adalah diantaranya faktor stimulasi gravitasi, efek udara panas, dinamika hidrologi, dan sebagainya [Xu, et.al, 2009]. Sedangkan untuk komponen annual, biasanya muncul akibat faktor-faktor yang di antaranya karena kesalahan pada parameter troposfer dan pengaruh perubahan massa atmosfer yang diakibatkan oleh tutupan salju, tekstur tanah, dan massa air laut [Poutanen, et.al, 2001].

3.2 Analisis Laju Pergeseran per Tahun

Analisis ini dilakukan untuk membandingkan perbedaan laju pergeseran suatu titik per tahunnya ketika suatu data *time series* dipengaruhi sinyal periodik dan ketika tidak dipengaruhi sinyal periodik.



Gambar 3.3 Sinyal yang dipengaruhi komponen periodik adalah sinyal yang berwarna merah sedangkan sinyal yang tidak dipengaruhi komponen periodik adalah sinyal yang berwarna biru.

Untuk menghitung laju pergeseran tiap titik pertahunnya dapat dilakukan dengan menerapkan persamaan berikut [Nikolaidis, 2002] :

$$y(t_i) = a + bt_i + c\sin(2\pi t_i) + d\cos(2\pi t_i) + e\sin(4\pi t_i) + f\cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{g_j}) + v_i$$

Persamaan tersebut digunakan karena memuat seluruh parameter untuk komponen-komponen yang mungkin terjadi dalam suatu data *time series*, antara lain komponen linier (a dan b), komponen periodik (c, d, e dan f), serta *Heaviside* (g). Dengan menerapkan persamaan tersebut, akan diperoleh laju pergeseran tiap titik, baik ketika tidak dipengaruhi komponen periodik maupun ketika data dipengaruhi sinyal periodik. Ketika data *time series* yang digunakan hanya dipengaruhi oleh tren linier dan komponen periodik annual, maka persamaan yang digunakan yaitu :

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) \dots\dots\dots[13]$$

dengan :

- a = posisi titik,
- b = laju pergeseran linier,
- c dan d = parameter komponen periodik,
- t_i = epok pengamatan dalam satuan hari dengan i = 1,...,N.

Sedangkan ketika data *time series* yang digunakan hanya dipengaruhi oleh tren linier dan komponen periodik semi-annual, maka persamaan yang digunakan yaitu :

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(4\pi t_i) + d \cos(4\pi t_i) \dots\dots\dots[14]$$

dan ketika data *time series* yang digunakan hanya dipengaruhi oleh tren linier dan komponen periodik 4 bulanan, maka persamaan yang digunakan yaitu :

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(6\pi t_i) + d \cos(6\pi t_i) \dots\dots\dots[15]$$

Seperti yang dapat dilihat, perbedaan antara persamaan [13], [14], dan [15] terletak pada nilai ω . Untuk komponen periodik annual, nilai ω yaitu 2π , untuk komponen periodik semi-annual nilai ω yaitu 4π , dan untuk komponen periodik 4 bulanan nilai ω yaitu 6π . Persamaan-persamaan ini diterapkan sesuai dengan sinyal periodik yang terjadi di masing-masing *time series*. Dengan menggunakan MATLAB dan menjadikan data hari dan data pergeseran per komponen pada tiap-tiap stasiun sebagai input, maka akan diperoleh nilai laju pergeseran tiap titik pertahunnya. Nilai dari laju pergeseran di tiap titik adalah seperti yang tertera dalam **Tabel 3.3** berikut.

Tabel 3.3 Perbandingan laju pergeseran per komponen di tiap titik antara kurva linier dengan kurva yang memiliki komponen periodik

Nama Stasiun	Komponen	Kec/Tahun (Linier)	Kec/Tahun (Periodik)
		(mm/tahun)	(mm/tahun)
ACEH	ew	-146.118	-145.282
	ns	-113.518	-109.898
	ud	129.758	133.432
BAKO	ew	26.822	26.754
	ns	-6.048	-5.965
	ud	-18.921	-19.073
JMBI	ew	27.613	27.464
	ns	-1.136	-0.945
	ud	-0.457	0.363
LNNG	ew	31.733	31.636
	ns	17.408	17.287
	ud	-3.548	-3.572
MKMK	ew	34.046	33.919
	ns	19.218	19.398
	ud	-2.576	-2.557
MSAI	ew	52.409	53.745
	ns	24.889	23.453
	ud	-13.386	-12.751

Tabel 3.3 Perbandingan laju pergeseran per komponen di tiap titik antara kurva linier dengan kurva yang memiliki komponen periodik (lanjutan)

PRKB	ew	38.795	38.65
	ns	34.75	34.639
	ud	-6.97	-6.76
PSKI	ew	28.24	28.32
	ns	12.88	12.493
	ud	-5.928	-5.393

Dari **Tabel 3.3** diperoleh bahwa perbedaan laju pergeseran per tahun yang terjadi di tiap stasiun antara kurva linier dan kurva dengan komponen periodik berkisar antara 0.1 mm/tahun hingga 4 mm/tahun dengan perbedaan terbesar terjadi di stasiun ACEH komponen UD, yaitu sebesar 3.7 mm/tahun.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, maka dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan yaitu antara lain :

1. Level rms data pengamatan *time series* sebelum outlier dibuang dan sesudah outlier dibuang berkurang menjadi lebih kecil. Dari 8 buah stasiun yang menjadi sasaran penelitian, data pengamatan stasiun ACEH memiliki pengurangan nilai rms yang paling besar. Untuk komponen timur-barat, nilai rms-nya berkurang hingga 16.6 cm, sedangkan untuk komponen utara-selatan berkurang hingga 5.4 cm. Adapun pada komponen naik-turun, rms-nya berkurang 18.4 cm. Untuk stasiun selain ACEH, perubahan nilai rms-nya yaitu berkisar antara 1-40 mm.
2. Dengan menggunakan metode Periodogram Lomb, dapat dideteksi bahwa dalam seluruh data *time series* yang menjadi studi kasus dalam kajian ini terdapat komponen periodik yang mempengaruhi sinyal deformasi yang ada pada tiap-tiap data pengamatan. Komponen periodik tersebut antara lain yaitu komponen annual, yaitu komponen yang mengalami perulangan sebanyak 1 kali dalam setahun, ditandai dengan nilai periodesitas 1; komponen semi-annual yaitu komponen yang mengalami perulangan sebanyak 2 kali dalam setahun, yang ditandai dengan nilai periodesitas 0.5; dan terakhir komponen 4 bulanan yaitu komponen yang mengalami perulangan sebanyak 3 kali dalam setahun, yang ditandai dengan nilai periodesitas 0.33.
3. Terdapat perbedaan besarnya laju pergeseran per tahun antara data yang menggunakan fitting linier dengan data yang memiliki komponen periodik. Perbedaan yang paling besar terjadi pada stasiun ACEH komponen naik-turun dengan nilai sebesar 3.7 mm/tahun.

5 Daftar Pustaka

- [1] Abidin, H.Z., *GPS Positioning*, Modul Perkuliahan Survey Satelit, Bandung, 2007.

- [2] Abidin, H.Z., *Introduction to GPS*, Modul Perkuliahan Geodesi Satelit, Bandung, 2007.
- [3] Abidin, H.Z., Jones, A. & Kahar, Joenil, *Survey Dengan GPS*, PT Pradnya Paramita, 2007.
- [4] Hall, Robert, *Cenozoic Geological and Plate Tectonic Evolution of SE Asia and The SW Pasific : Computer-Based Reconstructions, Model and Animations*, Journal of Asian Earth Sciences 20 (2002) 353-432, 2002.
- [5] Kenyeres, A. & Bruyninx, C., *Seasonal Terms in GPS Coordinate Time Series : Artifact or Real Signal?*, American Geophysical Union, 2006.
- [6] Kuntjoro, W. & Prijatna, K., *Sistem Koordinat dan Datum Geodetik*, Modul Perkuliahan Ilmu Hitung Geodesi II, Bandung, 2005.
- [7] Lomb, N.R., *Least Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data*, Astrophysics and Space Science 39 (1976) 447-462, 1976.
- [8] NASA, *Earth Fact Sheet*, site : <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>, (7 Juni 2012).
- [9] NASA, *Structure Of Earth*, site : <http://scign.jpl.nasa.gov/learn/plate1.htm>, (7 Juni 2012).
- [10] Nikolaidis, Rosanne, *Observation of Geodetic and Seismic Deformation with The Global Positioning System*, PhD dissertation, Earth Sciences, University of California, San Diego, 2002.
- [11] Noyes, T. James, *Plate Tectonic*, Lecture Module, El Camino College, 2011.
- [12] Phytaroulli, S., Kontogianni, V., Psimoulis, P. & Stiros, S., *Spectral Analysis Techniques in Deformation Analysis Studies*, INGENO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying November 11-13, Bratislava, Slovakia, 2004.
- [13] Press, William H. & Rybicki, George B., *Fast Algorithm for Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data*, The Astrophysical Journal, 338:227-280, 1989.
- [14] Rahman, Adhita T., *Aplikasi Teknik Spatial Filtering Untuk Menghitung Pergeseran Coseismic Gempa Simeuleu Februari 2008 Berdasarkan Data GPS SuGAR (Sumatran GPS Array)*, Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika FITB ITB, 2011.
- [15] Rino, *Regangan Tektonik di Sumatera Berdasarkan Pengamatan Kontinu Sumatran GPS Array (SUGAR) Tahun 2007-2008*, Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika FITB ITB, 2011.
- [16] Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. & Meindl, M., *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute University of Berne, 2007.
- [17] Wijaksana, Bagja Aryasa, *Analisis Deret Waktu Data Pengamatan GPS Kontinu di Jawa Barat*, Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika FITB ITB, 2009.
- [18] USGS, *Developing the Theory; Historical Perspective; Understanding Plate Motions*, site : <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/.html>, (7 Juni 2012).
- [19] Xu, Y., Liu, H., Lü, Q.S., *Research on The Stability of GPS Reference Stations in Tianjin CORS*, China Satellite Navigation Conference Proceeding, Lecture Notes in electrical Engineering Volume 159, pp 195-203, 2012.