

## Analisis Fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) Akibat Gempa Palu dengan Formosat-3 / COSMIC

Atika Sari<sup>1</sup> dan Mokhamad Nur Cahyadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

<sup>2</sup>Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, ITS, Surabaya, Indonesia

[atika.sari@eng.unila.ac.id](mailto:atika.sari@eng.unila.ac.id), [cahyadi\\_geod@yahoo.com](mailto:cahyadi_geod@yahoo.com)

### Abstrak

Gempa bumi merupakan getaran yang terjadi akibat dari adanya pergeseran lempeng. Gempa bumi yang terjadi akan menimbulkan 3 macam gelombang dan salah satunya adalah gelombang akustik yang bergerak secara vertikal dan mempengaruhi *electron* yang bergerak bebas di lapisan ionosfer. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) akibat gempa dengan menggunakan data FORMOSAT-3 / COSMIC. Metode yang digunakan adalah analisis waktu serta lokasi terjadinya fluktuasi TEC dari hasil *plotting* data FORMOSAT-3 / COSMIC terhadap waktu dan lokasi terjadinya gempa. Data yang digunakan adalah data netCDF yang berisi informasi nilai TEC dan waktu okultasi yang pada FORMOSAT-3 / COSMIC data tersebut diambil dengan menggunakan Teknik Global *Positioning System Radio Occultation* (GPSRO). Hasil dari Pada Gempa Palu 28 September 2018 diperoleh 28 okultasi dengan waktu anomali 10 menit setelah gempa dan jarak dengan episenter adalah  $\pm 3700$  km.

Kata kunci: ionosfer, gempa bumi, formosat-3/COSMIC, okultasi

### Abstract

Earthquakes are vibrations that occur as a result of plate shifts. When an earthquake occurs, it will cause three kinds of waves, and one of them is an acoustic wave that moves vertically and affects electrons that move freely in the ionosphere. This study aims to analyze Total Electron Content (TEC) fluctuations due to earthquakes using FORMOSAT-3 / COSMIC data. The method used is the analysis of the time and location of the occurrence of TEC fluctuations from the results of plotting the FORMOSAT-3 / COSMIC data against the time and location of the earthquake. The data used is netCDF data, which contains information on the TEC value and occultation time which on FORMOSAT-3 / COSMIC, the data was taken using the Global Positioning System Radio Occultation (GPSRO) technique. The results of the Palu earthquake on September 28, 2018 obtained 28 occultations with an anomaly time of 10 minutes after the earthquake and the distance to the epicenter was  $\pm 3700$  km.

Keywords: ionosphere, earthquake, formosat-3/COSMIC, occultation

### 1. Pendahuluan

Gempa merupakan getaran sesaat yang terjadi akibat pergeseran kerak bumi (Andreas, dkk. 2006). Semakin besar magnitudo gempa yang terjadi maka gangguan yang akan dihasilkan pada atmosfer akan besar juga. Hal ini disebabkan karena besarnya energi tersebut dapat mengganggu densitas elektron yang ada di ionosfer hingga radius 400 km dari pusat gempa (Cahyadi & Heki, 2013). Ada tiga jenis gelombang yang dihasilkan oleh gempa bumi: (1) gelombang akustik yang merambat dengan kecepatan 1 km/s selama  $\pm 10$  menit secara vertikal sampai pada lapisan F ionosfer, (2) gelombang gravitasi merambat dengan kecepatan 0,3 km/s yang ditimbulkan oleh gempa bumi, tsunami dan gerakan besar bumi (3) Gelombang Rayleigh merambat dengan kecepatan 4 km/s, yang ditimbulkan oleh gelombang permukaan dan merambat dari pusat gempa secara horizontal (Muslim, 2015). Pemantauan efek dari gempa bumi terhadap ionosfer dalam penelitian menggunakan satelit FORMOSAT -3 / *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate* (COSMIC). Misi dari mikrosatelit tersebut adalah untuk peramalan cuaca, pemantauan iklim, dan penelitian atmosfer, ionosfer dan geodesi. Mikrosatelit tersebut merupakan eksperimen sains Taiwan – AS yang berkolaborasi untuk mengorbitkan enam konstelasi mikrosatelit di *Low Earth Orbital* (LEO) yang memiliki ketinggian 750-800 km. Masing-masing satelit terdiri dari misi yaitu : *GPS Occultation Experiment* (GOX), *Tiny Ionospheric Photometer* (TIP) dan *Tri-Band Beacon* (TBB). GOX berfungsi untuk mengumpulkan sinyal *Global Positioning System* (GPS) untuk studi atmosfer, ionosfer dan geodesi. TIP dan TBB memberikan informasi distribusi elektron untuk penelitian ionosfer (Wu, dkk. 2005).

Analisis fluktuasi TEC yang terjadi setelah adanya gempa dengan menggunakan FORMOSAT-3/COSMIC. Mengetahui adanya fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) dengan menggunakan data FORMOSAT ini dapat digunakan sebagai langkah *Early Warning System* (EWS) apabila pengamatan ini dilakukan secara kontinyu. Salah satu anomali yang terjadi sebelum gempa didapatkan dari pengukuran variasi TEC menggunakan data GPS (Subakti, 2008). Fluktuasi TEC pada *Coseismic Ionospheric Disturbance* (CID) terjadi 15 menit hingga 1 jam setelah terjadinya gempa. Fluktuasi pada CID digunakan

#### Info Makalah:

Dikirim : 06-03-23;  
Revisi 1 : 07-28-23;  
Revisi 2 : 09-16-23;  
Revisi 3 : 10-06-23;  
Revisi 4 : 10-21-23;  
Diterima : 10-24-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 822-3130-1125  
e-mail : [atika.sari@eng.unila.ac.id](mailto:atika.sari@eng.unila.ac.id)

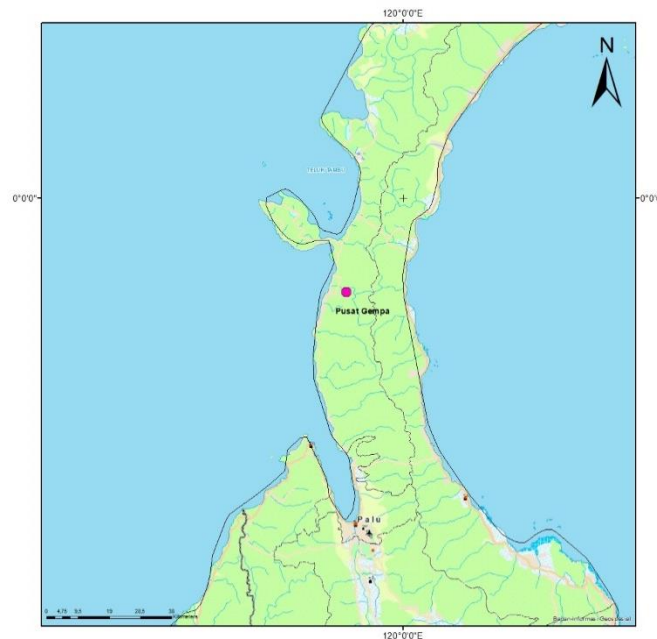
sebagai EWS sebelum tsunami datang. Pergerakan dari gelombang tsunami ini cukup lambat sekitar 600-700 km/jam (Cahyadi & Heki, 2015). Penelitian sebelumnya pernah dilakukan mengenai analisis perubahan ionosfer akibat gempa bumi di Sumatra Barat, pada penelitian tersebut menggunakan GPS untuk analisis perubahan TEC (Saputra, 2017).

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari satelit FORMOSAT-3/COSMIC yang merupakan satelit LEO yang mengorbit setiap hari dan mengalami okultasi sehingga data yang digunakan dapat dimanfaatkan untuk pengamatan fluktuasi TEC. Data netCDF yang dapat diunduh secara gratis dari web TACC ini akan diolah dan ditampilkan dalam *software* Matlab, data yang ditampilkan sudah difilter menurut posisi okultasi pada radius  $\pm 6000$  km dari *episenter*. Lalu dilakukan analisis waktu terjadinya gempa dan adanya fluktuasi elektron sesuai dengan kecepatan rambat gelombang sesuai dengan penelitian Cahyadi & Saputra, (2017) dan jarak terjadinya fluktuasi TEC dan dibandingkan dengan KP indeks untuk mengetahui aktivitas geomagnet pada waktu itu, karena KP index yang tinggi mempengaruhi pergerakan ion bebas di ionosfer. Penggunaan FORMOSAT-3/COSMIC ini dapat bermanfaat apabila data okultasi yang dihasilkan lebih banyak dan rapat, hal ini akan mengisi kekosongan data pada pengukuran GPS *Continuously Operating Reference Station* (CORS). Tujuan penelitian ini untuk mengetahui adanya pengaruh fluktuasi elektron akibat adanya gempa dengan menggunakan FORMOSAT-3/COSMIC yang merupakan satelit LEO dan menggunakan metode RO, yang selanjutnya bisa digunakan untuk metode alternatif EWS selain menggunakan GNSS dan pada satelit ini juga tidak perlu menggunakan pengukuran langsung di lapangan hanya melalui okultasi satelit LEO. Pengamatan menggunakan data ini sebaiknya dilakukan dengan data yang lebih banyak dan secara berkelanjutan agar mengetahui adanya fluktuasi dan sebagai salah satu langkah EWS. Pada penelitian ini hanya berfokus pada gempa palu tanggal 28 september 2018 pukul 10:02:45 UT dengan menggunakan data dari FORMOSAT-3/COSMIC untuk mengetahui adanya fluktuasi TEC pada lapisan ionosfer.

Sulawesi tersusun oleh tatanan tektonik yang masih aktif bergerak dan sering menghasilkan gempa, patahan dan sesar membentang dari Palu sampai dengan sisi timur Sulawesi yang berbatasan dengan Laut Banda (Pusat studi Gempa Nasional, 2017). Gempa Donggala, Sulawesi Tengah menurut BMKG bersumber dari sesar Palu Koro di sekitar selat Makasar. Sesar ini membentang dari Sulawesi tengah sampai selat Karimata. Sesar Palu Koro secara geomorfologi merupakan sesar mendatar (*strike-slip*). Sesar Palu Koro sendiri sudah empat kali gempa yang menimbulkan tsunami yaitu pada tahun 1927 dengan magnitudo 6.3 SR, tahun 1968 dengan magnitudo 7.4 SR, tahun 1996 dengan magnitudo 7.7 SR dan tahun 2018 dengan magnitudo 7.5 SR, dan merupakan sesar dengan pergeseran yang tinggi (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Gempa bumi utama di tahun 2018 terjadi pada pukul 10.02 UT, hingga pukul 13.00 UT 22 gempa susulan yang tercatat. Mencegah adanya banyak korban akibat adanya gempa dan tsunami di daerah Palu ini dapat dilakukan pemantauan berkala salah satunya menggunakan GNSS, untuk mengetahui pergerakan sesar. Apabila pengamatan dilakukan secara terus menerus dan kontinu diharapkan dapat mengetahui pola pergerakan untuk mencegah banyaknya korban akibat adanya gempa.

## 2. Metode

Secara umum penelitian ini tergolong pada jenis penelitian deskriptif kuantitatif dengan melakukan analisis dari satu jenis obyek yaitu pada gempa Palu 28 September 2018 dan menggunakan data dari hasil satelit FORMOSAT-3/COSMIC untuk mengetahui adanya fluktuasi yang terjadi pada lapisan ionosfer. Lokasi penelitian ini adalah di Palu dengan koordinat  $0^{\circ} 15' 21.24''$  LS  $119^{\circ} 50' 45.6''$  BT pada 28 September 2018 dengan waktu 10:02:45 UTC pada *magnitudo* 7.5 SR dan kedalaman 20 Km, dengan status gempa bumi dan tsunami zona subduksi (USGS, 2018). Pada penelitian ini dilakukan dengan 3 tahapan yaitu tahap pertama persiapan, tahap kedua pengolahan data dan tahap terakhir yaitu tahap analisis data.

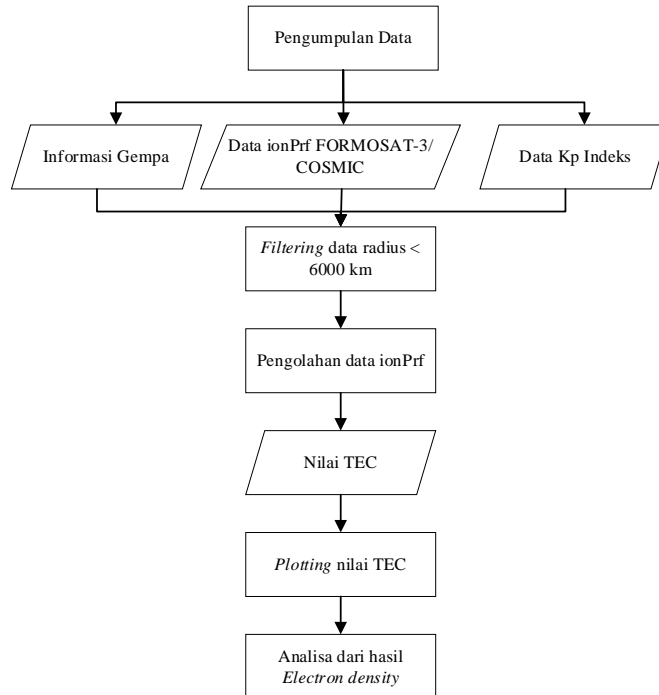


Gambar 1. Inset Peta.

Tahap pertama pada penelitian ini yaitu persiapan yang dilakukan dengan mengumpulkan studi literatur serta mempelajari berbagai hal berkaitan dengan penelitian. Langkah selanjutnya adalah menentukan objek penelitian, yang dimana objek penelitian ini adalah gempa Palu, 28 september 2018 data yang diperlukan adalah informasi mengenai gempa seperti magnitude gempa, kedalaman, koordinat pasti, jenis gempa dan lainnya bisa didapatkan di web USGS. Untuk data FORMOSAT-3/COSMIC sendiri dapat diunduh pada web <https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/tar/rest.html>.

Tahap kedua adalah pengolahan data. Data penelitian yang diperoleh selanjutnya dilakukan pengolahan untuk mengetahui adanya fluktuasi elektron di ionosfer setelah terjadinya gempa bumi. Elektron sendiri merupakan partikel yang bergerak bebas di ionosfer, sehingga apabila adanya gangguan seperti gelombang akan menyebabkan elektron saling bergerak bebas dan mempengaruhi jalannya sinyal satelit yang melewati, pada pengukuran GNSS efek ionosfer sendiri sering dihilangkan karena dapat mempengaruhi ketelitian data (Cahyadi, 2014). Pada penelitian ini akan difokuskan pada fluktuasi sinyal dari satelit LEO yaitu FORMOSAT-3/COSMIC akibat gempa Palu. FORMOSAT-3/COSMIC menghasilkan data ionPrf yang tersedia dalam format netCDF. Dari data ionPrf yang berisi densitas elektron, *longitude*, *latitude*, serta besarnya sudut lintasan satelit (Schreiner, 2014). Dalam data FORMOSAT-3/COSMIC sendiri banyaknya data tiap hari berbeda tergantung dari banyaknya okultasi yang terjadi, dan waktu terjadinya okultasi juga tidak selalu sama (Fong, 2008). Okultasi sendiri merupakan titik pertemuan antara sinyal GPS dengan Formosat-3/ COSMIC yang berorbit LEO yang dibelokkan di area atmosfer yang bisa menghasilkan profil di atmosfer (Matyjasiak, 2016). Untuk data Formosat-3/COSMIC sendiri dapat diunduh secara gratis di web CDAAC dalam pembacaan file dan pengeplotan digunakan Matlab. Data yang telah di dapatkan akan dilakukan *filtering* data dengan data okultasi yang berada pada radius  $\pm 6000$  km dari pusat gempa hal ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab (Liu et al, 2019). Penyaringan data dilakukan sebelum dilakukannya *plotting* dengan menggunakan Matlab untuk mengetahui adanya fluktuasi, data ditampilkan berurut dari waktu terjadinya gempa untuk menganalisis terjadinya fluktuasi yang ditimbulkan oleh gempa. Apabila sudah terlihat adanya fluktuasi, hal itu perlu dilakukan pengecekan apakah ada peningkatan aktivitas geomagnet yang ditandai dengan KP index, apabila pada waktu itu tidak terjadi peningkatan aktivitas geomagnet atau badai lemah dengan rentang nilai Kp index  $-30nT$  sampai  $-50nT$  maka bisa dimungkinkan untuk fluktuasi itu disebabkan oleh pengaruh dari gelombang akustik yang ditimbulkan dari gempa.

Gambar 2 dijelaskan mengenai proses pengolahan analisis fluktuasi TEC, dimulai dari tahap persiapan yang terdiri dari studi literatur serta pengumpulan data yang terdiri data-data informasi gempa seperti lokasi pusat gempa, waktu terjadinya gempa serta *magnitude* gempa yang didapatkan dari *website* USGS. Pada tahap pengolahan dimulai dengan *filtering* data dengan radius  $\leq 6000$  km dari pusat gempa, lalu dilakukan pengolahan data ionprf yang selanjutnya menghasilkan nilai TEC yang dilakukan *plotting* dan analisis. Pada tahap akhir dilakukan kesimpulan dan penulisan hasil.

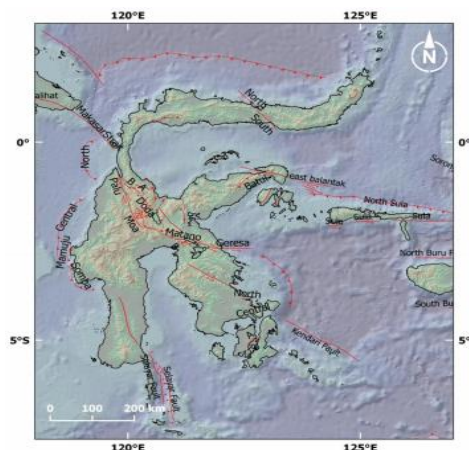


Gambar 2. Diagram Alir Pengolahan Data.

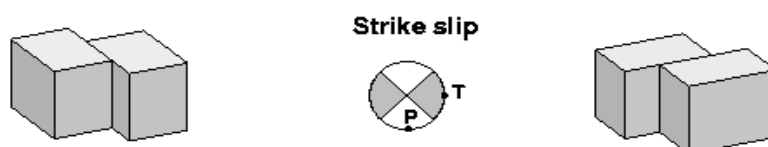
Pengolahan data netCDF dari formosat dapat menggunakan program matlab untuk mendapat nilai *electron density*. Data pada netCDF dapat dilakukan *plotting* nilai *electron density* nya dengan menggunakan Matlab untuk memperoleh profil vertikal TEC. Setelah dilakukan *plotting* anomali maka dilakukan analisis *electron density*nya, Penelitian ini dapat digunakan untuk memastikan adanya pengaruh gelombang akustik dari gempa bumi didasarkan pada KP indeks dan juga kecepatan, serta waktu terjadinya fluktuasi. Validasi hasil penelitian didasarkan pada kecepatan gelombang dan apakah ada pengaruh dari aktivitas matahari yang mempengaruhi pergerakan elektron bebas di ionosfer.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Gempa yang terjadi di sekitar episenter rata-rata kedalamannya adalah  $\leq 30$  km. Lokasi sesar yang aktif melewati area gempa dapat dijadikan informasi tambahan dalam melakukan analisis mengenai gempa yang terjadi di Palu, serta hal ini bisa dijadikan tambahan informasi apabila akan adanya penelitian lanjutan di sekitar Palu.

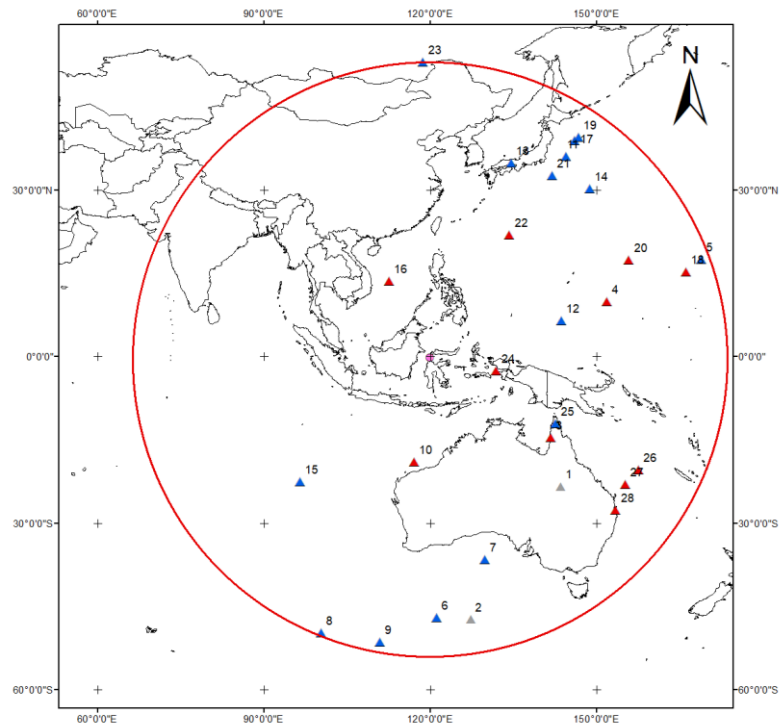


Gambar 3. Peta Sesar Aktif di Pulau Sulawesi. (Pusat studi Gempa Nasional, 2017)



Gambar 4. Mekanisme Gempa *Strike Slip* pada Gempa Palu 28 September 2018. (USGS, 2014)

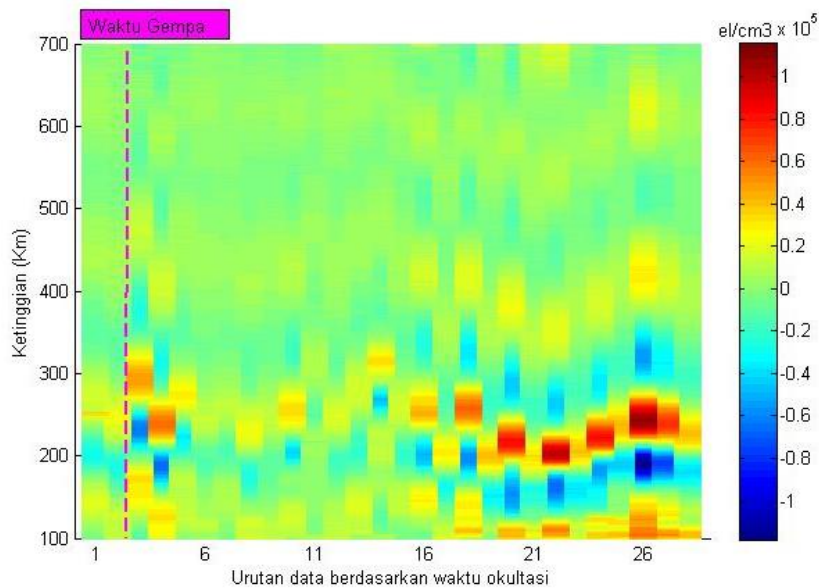
Gambar 4 menunjukkan mekanisme gempa di Palu yaitu *strike slip* yang ditunjukkan pada *beachball focal mechanism*, pada gambar tersebut terlihat bahwa pergerakan gempa adalah mendatar atau bergerak secara horizontal berlawanan arah, pergerakan ini disebabkan oleh adanya patahan di sekitar pusat gempa (USGS, 2023). Gempa 28 September 2018 dengan menggunakan data ionPrf dan dilakukan *plotting* area okultasi maka dengan menggunakan radius  $\pm 6000$  km dari pusat gempa didapatkan okultasi pada saat gempa yang ditunjukkan pada gambar 5 dan penomorannya didasarkan pada urutan waktu okultasi pertama sampai terakhir pada area tersebut.



Gambar 5. Posisi Okultasi Formosat-3/COSMIC pada Gempa 28 September 2018 dengan Radius  $\pm 6000$  km dari Pusat Gempa.

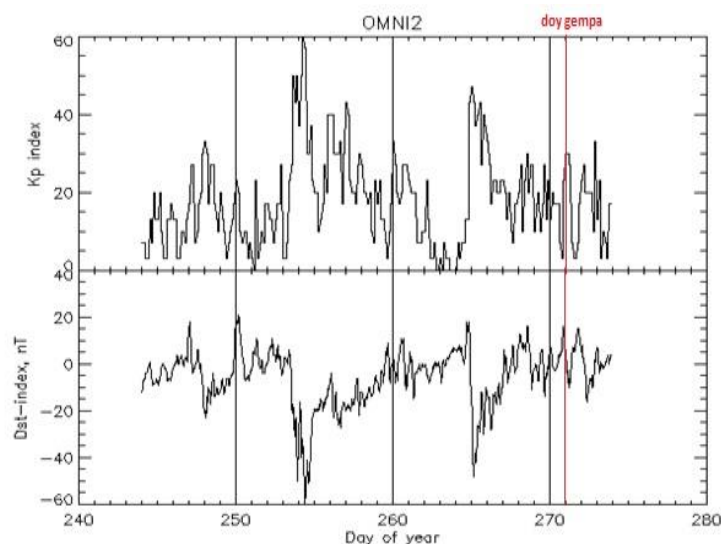
Hasil dari penyaringan data FORMOSAT-3/COSMIC didapatkan 28 titik okultasi terjadi pada radius  $\pm 6000$  km dari pusat gempa. Pada titik okultasi tersebut akan diurutkan sesuai dengan waktu terjadinya okultasi yang ditandai dengan nomor seperti pada gambar 5. Fluktuasi yang didapatkan pada 11 titik okultasi yang berwarna merah, 2 titik okultasi terjadi sebelum gempa dengan warna abu-abu dan 15 titik berwarna biru yang tidak terjadi fluktuasi. Gelombang yang dihasilkan akibat gempa diasumsikan bergerak menyebar secara vertikal mendekati ionosfer mencapai profil. Jika kecepatan gelombang secara horizontal lebih besar dari gelombang Rayleigh dan tsunami berarti waktu tempuh pendek profil tidak akan mengalami fluktuasi. Jika kecepatan gelombang horizontal lebih cepat dari gelombang tsunami namun lebih lambat daripada gelombang Rayleigh maka profil akan mengalami fluktuasi. Ketika kecepatan gelombang horizontal hampir sama dengan kecepatan gelombang Rayleigh atau gelombang tsunami maka fluktuasi dari profil disebabkan oleh gelombang Rayleigh atau tsunami. Jika kecepatan gelombang horizontal lebih lambat dari gelombang tsunami artinya gelombang tsunami sudah melalui lokasi profil. Permukaan laut yang terus – menerus terganggu selama lebih dari 10 jam setelah kejadian tsunami memungkinkan adanya fluktuasi pada profil sebagai tanda gelombang pasca tsunami. Lokasi okultasi yang mengalami fluktuasi pada gambar 5 terlihat bahwa posisi profil berada di laut. Gelombang seismic menyebabkan fluktuasi GPS TEC sekitar  $836 \pm 256$  s pada gempa Tohoku (Liu et al, 2016). Mengacu pada penelitian Liu et al.(2019) waktu tempuh horizontal diperkirakan pada 540 – 840 s yang merupakan selisih antara waktu terjadinya gempa sampai adanya fluktuasi di profil ionosfer. Kecepatan dari fluktuasi akan dihitung dari jarak horizontal profil ke pusat gempa dan dibagi dengan waktu tempuhnya. Pada titik okultasi ke-4 didapatkan waktu tempuh yaitu 10 menit (600 s) sehingga hal ini termasuk dari perkiraan waktu tempuh gelombang dan jarak 3700 km dari pusat sehingga kecepatan berkisar 6 km/s.





Gambar 6. Ilustrasi Terjadinya Fluktuasi pada Profil Vertikal *Electron Density* pada Gempa 28 September 2018 Radius  $\pm 6000$  km dari Pusat Gempa.

Gambar 6. didapatkan profil vertikal *electron density* dari 09:48 sampai 22:54 UT sebanyak 28 data okultasi dengan radius  $\pm 6000$  km dari episenter pada gempa 28 September 2018 pukul 10:02:45 UT. Dari data okultasi tersebut didapat yang mengalami fluktuasi adalah data nomor 4 dengan waktu okultasi 10:12 UT yaitu selisih 10 menit setelah terjadinya gempa dengan jarak  $\pm 3700$  km dari episenter, dari gambar 6 didapatkan banyak terjadinya fluktuasi dikarenakan pada gempa palu terdapat banyak gempa susulan yang terjadi dimulai dari gempa pertama pada 07:00 UT. Gambar 6. dalam diperhatikan pada perbedaan warna pada hasil *plotting* sebelum terjadinya gempa, rentang nilai *electron density* adalah pada  $-0,4$  sampai  $-0,3$   $\text{el}/\text{cm}^3$  sedangkan setelah terjadinya gempa, rentang *electron density*nya meningkat menjadi  $-1$  sampai dengan  $1$   $\text{el}/\text{cm}^3$ . Kecepatan gelombang yang diperoleh berkisar  $6$   $\text{km}/\text{s}$  Dari hasil penelitian pada gempa Tohoku oleh Liu et al.(2019) diperoleh kecepatan berkisar  $2-3.6$   $\text{km}/\text{s}$ . hal tersebut dapat dikarenakan okultasi yang terjadi di lintang rendah atau mendekati ekuator lebih sedikit dibandingkan dengan pada lintang tinggi.



Gambar 7. Kp Indeks dan Dst Indeks pada Tanggal 1 September 2018 Hingga 30 September 2018

Kp indeks ini berhubungan dengan aktivitas geomagnetik, yang dapat mempengaruhi pergerakan elektron bebas di ionosfer apabila terjadi badai tinggi. Sehingga untuk memastikan pada waktu terjadinya gempa fluktuasi yang dihasilkan apakah benar akibat dari gelombang yang ditimbulkan oleh gempa atau ada pengaruh dari gelombang lain salah satunya adalah Kp indeks. Kp indeks untuk mengetahui adanya aktivitas geomagnetik pada doy 271 kp indeks pada gambar 7 merupakan nilai  $\text{kp indeks} * 10$  yang pada gambar dijelaskan bernilai 25 dikatakan badai lemah. Dan

untuk Dst indeks didapatkan nilainya yaitu 10 nT. Pada gambar 7. dapat dilihat bahwa pada gempa 28 September 2018 dengan doy 271 tidak terjadi gangguan yang mengakibatkan gangguan pada atmosfer.

### Kesimpulan

Hasil penggunaan FORMOSAT-3/COSMIC untuk mengetahui adanya fluktuasi pada gempa Palu 28 September 2018 didapatkan adanya 28 titik okultasi dengan area  $\pm 6000$  km dari pusat gempa, dengan rincian 2 titik okultasi sebelum terjadinya gempa, 11 titik okultasi setelah terjadinya gempa yang mengalami fluktuasi dan 15 titik okultasi yang nilai fluktuasinya tidak signifikan. Hasil yang didapatkan dari 11 titik okultasi yang mengalami fluktuasi pada titik ke 4 didapatkan fluktuasi 10 menit setelah gempa dan posisi okultasinya 3700 km dari lokasi episenter, maka kecepatan gelombang yang didapat adalah 6 km/s, untuk hasil tersebut setelah divalidasi aktivitas geomagnetik apakah ada indikasi badai namun dari hasil Kp indeks menunjukkan badai lemah, jadi dimungkinkan adanya fluktuasi didasarkan pada pengaruh gelombang seismik. Penelitian selanjutnya diharapkan adanya penelitian efek gelombang sebelum dan sesudah terjadinya gempa serta menggunakan FORMOSAT-7/COSMIC-2 yang sudah beroperasi dikarenakan okultasi yang terjadi semakin banyak dan rapat.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas TACC atas dukungan datanya pada penelitian ini dan Penulis juga berterima kasih kepada Prof. Dr. Buldan Muslim M.Si atas diskusinya yang bermanfaat.

### Daftar Pustaka

- Andreas H., dkk.. (2006). Implikasi Co-Seismic dan Post-seismic Horizontal Displacement Gempa Aceh 2004 terhadap status Geometrik Data Spasial wilayah Aceh dan Sekitarnya, Bandung : Departemen Teknik Geodesi ITB.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2013). Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(4), 1777–1787. <https://doi.org/10.1002/jgra.50208>.
- Cahyadi, M. N. (2014). Near-Field Coseismic Ionospheric Disturbances of Earthquakes In and Around Indonesia. Sapporo : Hokkaido University.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2015). Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw dependence of the disturbance amplitudes. *Geophysical Journal International*, 200(1), 116–129. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu343>.
- Cahyadi, M. N., & Adi Saputra, F. (2017). Perbandingan Perubahan Total Electron Content (Tec) Ionosfer Akibat Gempa Bumi Dan Letusan Gunung Api (Studi Kasus : Gempa Bumi 2 Maret 2016 dan Gunung Merapi 2010). *Jurnal Geoid*, Vol 12: 195-201.
- Fong, C. J., Yang, S. K., Chu, N. H., Huang, C. Y., Yeh, J. J., Lin, C. T., Kuo, T. C., Liu, T. Y., Yen, N. L., Chen, S. S., Kuo, Y. H., Liou, Y. A., & Chi, S. (2008). FORMOSAT-3/COSMIC constellation spacecraft system performance: After one year in orbit. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11), 3380–3394. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2005203>.
- Liu JY et al. (2016). The vertical propagation of disturbances triggered by seismic waves of the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake over Taiwan. *Geophys Res Lett* 43:1759–1765. <https://doi.org/10.1002/2015gl067487>.
- Liu, J. Y., Chen, C. Y., Sun, Y. Y., Lee, I. te, & Chum, J. (2019). Fluctuations on vertical profiles of the ionospheric electron density perturbed by the March 11, 2011 M9.0 Tohoku earthquake and tsunami. *GPS Solutions*, 23(3). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0866-7>.
- Matyjasiak, B. (2016). Radio occultation diagnostics and ionosphere behaviour. [https://www.astron.nl/lofarwiki/lib/exe/fetch.php?media=public:meetings:radio\\_occultatio\\_b.matyjasiak.pdf](https://www.astron.nl/lofarwiki/lib/exe/fetch.php?media=public:meetings:radio_occultatio_b.matyjasiak.pdf). Diakses pada 30 November 2022.
- Muslim, Buldan. (2015). Pengujian Teknik Korelasi Untuk Deteksi Pengaruh Aktivitas Gempa Bumi Besar Pada Ionosfer. *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol 12 : 87-102.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Kementerian PUPR.
- Saputra, Febrian Adi. (2017). Analisis Perubahan Ionosfer Akibat Gempa Bumi Sumatra Barat Tanggal 2 Maret 2016. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Geomatika- Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Schreiner, Bill, Sergey Sokolovsky, Xinan Yue, Janet, Zeng. (2014). Radio Occultation Retrieval Processing for Ionospheric Scientists. IROWG Ionosphere-Atmosphere Coordination Workshop.
- Subakti, Hendri. (2008). Analisis Variasi GPS-TEC yang Berhubungan dengan Gempabumi Besar di Sumatra. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- USGS. (2014). <http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/becchball.php>, diakses 20 Mei 2022.

USGS.(2023).<https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/focal-mechanisms-or-beachballs#:~:text=A%20focal%20mechanism%2C%20or%20%22beachball,of%20the%20fault%20that%20slipped>. Diakses pada 16 September 2023.

USGS. (2018).<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/dyfi/intensity>. Diakses pada Mei 2022

Wu, Bor-Han dkk..(2005). FORMOSAT-3/COSMIC Science Mission Update. GPS Solut 9: 111-121.