

## Struktur 3D dari Gangguan Ionosfer saat Gempa (CID) Magnitudo 9.0 di Tohoku-Oki Jepang Tahun 2011 Menggunakan Data GPS-TEC

*3D Structure of Coseismic Ionospheric Disturbance due to 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake revealed by GPS-TEC Technique*

Ihsan Naufal Muafiry<sup>1\*</sup>, Rahma Fitriani<sup>1</sup>, Ilham Wahyudi<sup>1</sup>, Iqbal Nursyaifullah<sup>1</sup>, Kosuke Heki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politeknik Sinar Mas Berau Coal, Tanjung Redeb, 77315, Berau, Kalimantan Timur, Indonesia

<sup>2</sup> Department of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University, Sapporo, Japan

\*Korespondensi penulis: ihsan@polteksimasberau.ac.id

Diterima: 10062022; Diperbaiki: 23082022; Disetujui: 01092022; Dipublikasi: 01102022

**Abstrak:** Gempa dengan kekuatan magnitudo 9.0 di Tohoku-Oki, Jepang pada tanggal 11 Maret, 2011 memicu gelombang akustik yang menjalar ke atas hingga ke lapisan ionosfer bumi sekitar 8 menit setelah gempa utama dan menyebabkan perubahan densitas elektron di lapisan ionosfer. Perubahan nilai elektron tersebut diberi nama sebagai Coseismic Ionospheric Disturbance (CID). Total kandungan electron (TEC) di ionosfer yang diukur oleh Global Positioning System (GPS) dapat digunakan sebagai data input untuk teknik pemodelan ionosfer dengan metode 3D tomografi. Pemodelan 3D tersebut dapat digunakan untuk mempelajari struktur 3D dari CID. Dengan menggunakan jalur propagasi sinyal GPS (LoS) yang melintasi voxel buatan di lapisan ionosfer, kemudian dengan menggunakan beberapa konstrain pada program, pada akhirnya CID dapat direkonstruksi sebagai densitas anomali elektron secara 3D. Uji akurasi dilakukan untuk memastikan keakuratan metode 3D tomografi dengan melakukan uji resolusi citra tomogram dari model papan catur. Karakteristik CID yang ditemukan dalam penelitian ini konsisten dengan hasil dari laporan-laporan CID sebelumnya. Hasil tomografi menunjukkan terdapat CID dengan anomali bernilai positif dan negative, dan CID muncul pertama kali di ketinggian 200 km, lalu terus bergerak ke atas secara vertical dan ke arah selatan secara horizontal.

*Copyright © 2022 Geoid. All rights reserved.*

**Abstract:** The Tohoku-oki, March 11th, 2011, earthquake (Mw 9.0) triggered acoustic wave propagating upward reaching the earth's ionosphere layer about 8 minutes after the main-shock and generated electron density changes. Such electron change is well-known as co-seismic ionospheric disturbance (CID). Ionospheric total electron content (TEC) from Global Positioning System (GPS) can be used as an input for 3D (three-dimensional) tomography technique to study the 3D structure of CID. By using GPS line-of-sight penetrated to constructed voxels covering studied regions horizontally and vertically, together with applied constraints to the solution, CID was reconstructed as electron density anomaly in 3D. Accuracy tests of the tomography results were performed such as classical checkerboard to prove the stability of the result. The CID feature found here is consistent with earlier studies and the tomography results show positive and negative anomalies of the CID appear around 200 km altitude and propagate upward vertically and southwestward horizontally.

Kata kunci: Gempa, CID, GPS-TEC Tomografi, Struktur 3D

---

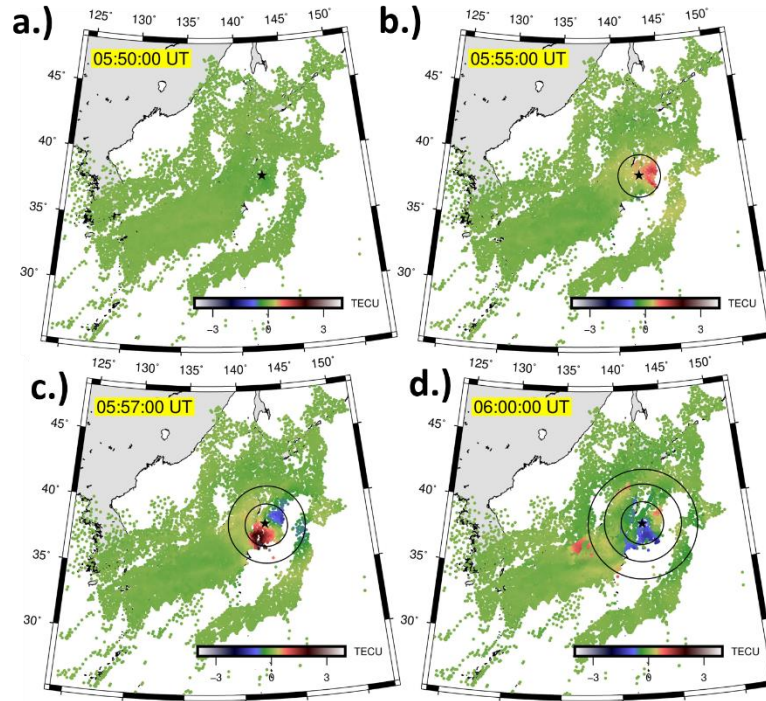
Cara untuk sitasi: Muafiry, N.I., Fitriani, R., Wahyudi, I., Nursyaifullah, N., Heki, K. (2022). Struktur 3D dari Gangguan Ionosfer saat Gempa (CID) Magnitudo 9.0 di Tohoku-Oki Jepang Tahun 2011 Menggunakan Data GPS-TEC. *Geoid*, 18(1), 1-8.

---

### Pendahuluan

Sinyal gelombang mikro dari satelit GPS mengalami penundaan yang disebabkan oleh dua lapisan atmosfer sebelum tiba di *receiver* yang berada di darat. Lapisan pertama adalah ionosfer bumi (atmosfer bagian atas yang mengalami ionisasi) dan yang kedua adalah troposfer (atmosfer bagian bawah, yang banyak mengandung

uap air maupun komponen kering). Penundaan di atmosfer yang terjadi pada gelombang mikro menyebabkan kesalahan penentuan posisi yang serius, dan pengukuran posisi yang akurat oleh GPS perlu mempertimbangkan penundaan sinyal di atmosfer ini saat memproses data GPS (Ramadhan, 2015). Di sisi lain, dengan memiliki penundaan sinyal gelombang mikro memungkinkan kita untuk mempelajari kondisi kedua lapisan ini. Sebagai contoh, Heki pada tahun 2006 menggunakan data GPS-TEC (total electron content)



Gambar 1. Distribusi 2D dari CID (delta-CID) mulai pukul 05:50 UT hingga 06:00 UT (5-15 menit setelah gempa Tohoku-Oki 2011). Bintang hitam dan kumpulan titik-titik yang berwarna menunjukkan posisi episenter dan titik IPP pada ketinggian 300 km. Gambar 1a menunjukkan CID belum tiba di ionosfer dalam warna hijau. Gambar 1b-1d menunjukkan gelombang CID yang bergerak sirkular (diperjelas dengan lingkaran hitam).

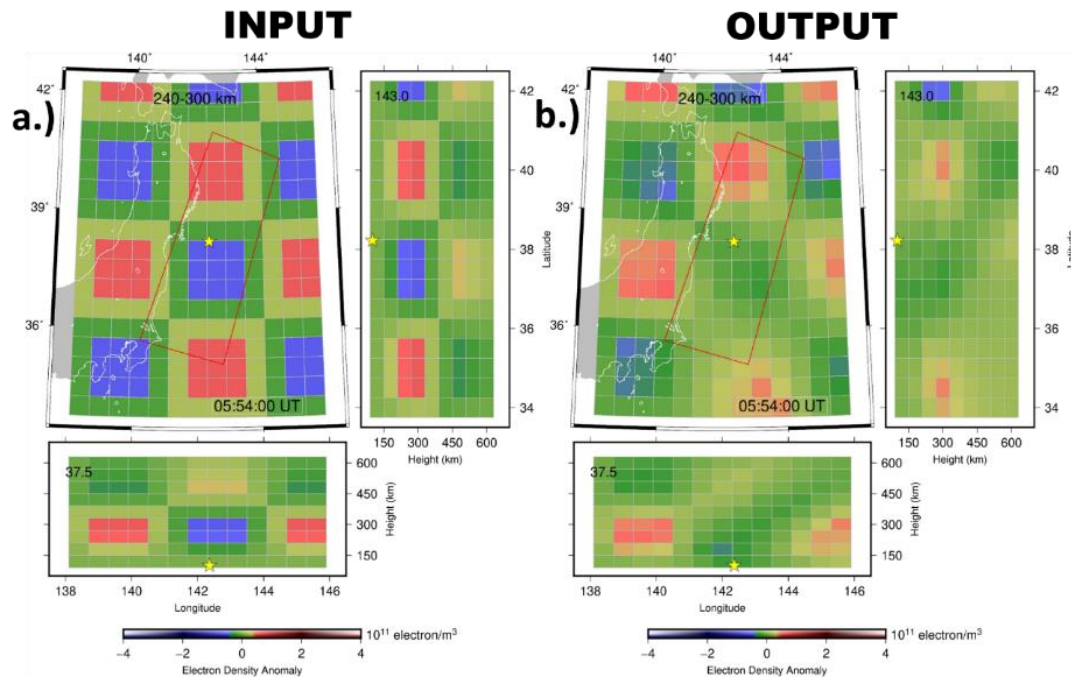
Untuk mengamati perubahan ionosfer akibat letusan gunung berapi, ledakan tambang (Calais et al., 1998), sporadic-E (Muafiry et al., 2018), gerhana matahari (He et al., 2018), tsunami (Cahyadi et al., 2021) atau ledakan bom (Kundu et al., 2021). Sementara dalam paper ini akan memanfaatkan delay sinyal GPS di lapisan atmosfer bagian atas (ionosfer) untuk mengamati dinamika di dalam ionosfer saat pasca-gempa.

*Coseismic Ionospheric Disturbances* (CID) adalah gangguan ionosfer yang disebabkan oleh gelombang akustik dari gerakan sesar naik pada suatu gempa bumi. Biasanya terdeteksi pada data *time-series* GPS-TEC sekitar 10 menit setelah gempa utama (Heki & Ping, 2005; Cahyadi et al., 2022). CID berguna untuk penentuan cepat kekuatan gempa (Cahyadi & Heki, 2015) atau dapat juga digunakan sebagai informasi tambahan pada proses mitigasi bencana akibat gempa lainnya seperti peringatan dini gelombang tsunami di wilayah subduksi karena CID dapat dideteksi lebih cepat daripada kedatangan gelombang tsunami ke daratan.

Terdapat banyak studi yang komprehensif terkait dengan CID dan untuk pertama kalinya CID ditemukan oleh Calais dan Minster (1995) tepat setelah gempa 1994 Mw 6.7 Northridge. Kemudian Heki dan Ping (2005) secara komprehensif mempelajari propagasi CID untuk gempa bumi Tokachi-Oki 2003. Sebagian besar studi CID menggunakan pengamatan GPS-TEC dengan *epoch rate* 30 detik. Menariknya, pengukuran 1Hz dari GPS-TEC memungkinkan untuk menentukan kedatangan pertama CID di ionosfer secara lebih akurat untuk gempa Tohoku-Oki 2011 (Astafyeva et al. 2011). Adapun teknik pengamatan TEC dengan menggunakan GPS akan dijelaskan pada bab berikutnya.

Gempa bumi Tohoku-oki Mw 9.0 2011 di Jepang adalah gempa *Mega-thrust* yang terjadi akibat tumbukan antara lempeng samudra dan benua. Gempa ini telah merobek batas lempeng sekitar 300 km panjangnya dan

lebar 150 km (persegi panjang berwarna merah pada Gambar 2), dengan besar slip sesar mencapai hingga 40 m (Ammon et al., 2011). Gempa ini terjadi pada pukul 14:46 waktu setempat dengan episentrum pada lintang geografis 38.322° utara dan bujur 142.369° timur serta menyebabkan gelombang tsunami yang meluluhlantahkan masyarakat pesisir di timur Jepang.



Gambar 2. Uji resolusi papan catur menggunakan kerapatan anomaly electron. Blok pada gambar 2a adalah pola buatan yang dijadikan input untuk program tomografi 3D. Hasilnya (2b) menunjukkan resolusi yang baik pada beberapa wilayah dan sekitar 2/3 blur pada wilayah *offshore*.

Memang sudah banyak sekali studi terkait CID karena peristiwa gempa tahun 2011 di Jepang ini dan sebagian besar dianalisis dengan metode GPS-TEC (Liu et al., 2011; Astafyeva et al. 2011; Rolland et al., 2011, Tsugawa et al., 2011). Studi terbaru melaporkan bagian awal CID dapat dideteksi pada ketinggian yang lebih rendah menggunakan data GPS-TEC 1Hz (Bagiya et al., 2020; Thomas et al., 2018). Meskipun banyak penelitian yang membahas tentang CID, struktur 3D dari CID masih belum jelas dan belum dideteksi dengan baik. Dalam penelitian ini kami mencoba untuk pertama kalinya mendapatkan struktur 3D dari CID yang dihasilkan oleh gerakan vertikal sesar naik akibat gempa bumi Tohoku-oki bermagnitudo 9.0 di Jepang menggunakan metode tomografi 3D dari data GPS-TEC.

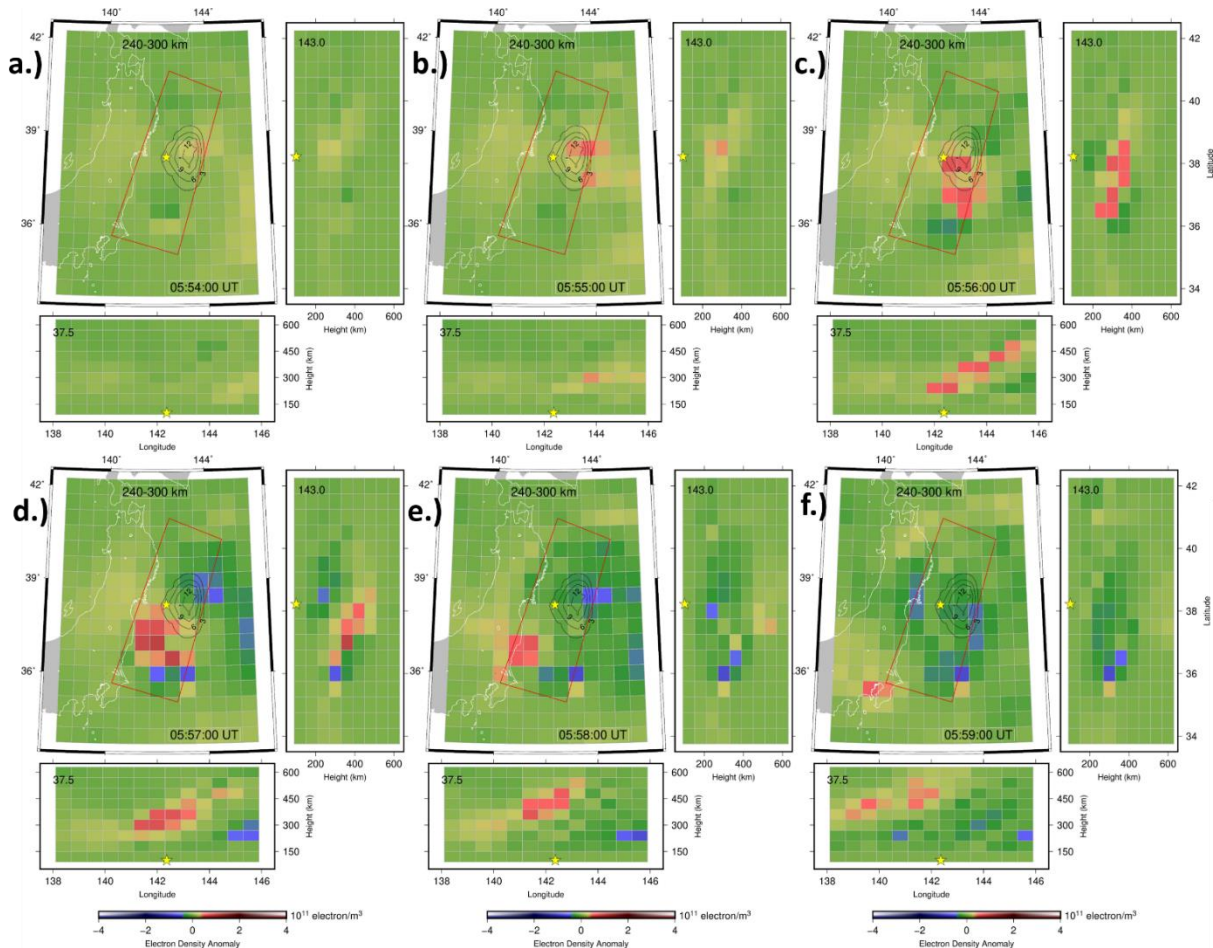
### Data dan Metode

Tim peneliti menggunakan *raw-file* dari Receiver Independent Exchange Format (RINEX) dari ribuan stasiun GPS pada jaringan nasional Jepang yang disebut GEONET (GPS Earth Observation Network) yang disediakan oleh Geospatial Information Authority (dapat diakses melalui [terras.gsi.go.jp](http://terras.gsi.go.jp)). Jaringan receiver GNSS yang ada di darat milik Korea Selatan (53 stasiun) juga digunakan dalam penelitian ini untuk memperkuat resolusi citra hasil tomografi (Choi dan Hong, 2019). Interval pengambilan sampel kedua jaringan GNSS tersebut adalah 30 detik, dan sayangnya hanya satelit GPS yang dapat diterima sinyalnya pada saat gempa Tohoku-oki tahun 2011. Dari 32 satelit GPS, hanya ada 8 satelit GPS yang digunakan dalam penelitian ini (PRN 05, 09, 15, 18, 21, 26, 27, 28) mengingat satelit ini yang tersedia pada saat kedatangan pertama CID di ionosfer (pukul 05:54 UT).

Dengan memanfaatkan perbedaan fase kode dan pengukuran fase pembawa ( $\Delta L4$ ) yang diterima oleh penerima GPS, informasi yang terintegrasi sepanjang jalur propagasi sinyal GPS (LoS) dari ionosfer yang dilewati dapat

diperkirakan dan informasi tersebut sering disebut sebagai Slant Total Electron Content (STEC). Secara matematis,

$$STEC = \left(\frac{1}{40.308}\right) f1^2 f2^2 / (f1^2 - f2^2) \Delta L4 \tag{1}$$



Gambar 3. CID dari awal fase kenampakannya di ionosfer pada ketinggian 200km pukul 05:54 UT (a) secara 3D. Gambar b-f adalah kenampakan CID setiap 1 menit.

Gambar 3 memperlihatkan kontur hitam dan bintang berwarna kuning yang menunjukkan deformasi sesar dengan interval kontur 3-meter dan titik episenter gempa. Persegi panjang berwarna merah adalah perkiraan ukuran sesarnya. Pergerakan sirkular CID terlihat jelas pada hasil tomografi 3D secara horizontal dan vertical. Dimana  $f1$  (1575,42 MHz) dan  $f2$  (1227,6 MHz) adalah frekuensi dari dua gelombang pembawa (L1 dan L2) pada band-L dari sinyal GPS yang ditransmisikan dari satelit. Koefisien 40,308 adalah untuk mengkonversi besaran penundaan sinyal di ionosfer menjadi satuan TEC (1 satuan TEC sama dengan  $10^{16}$  elektron/ $m^2$ ). Bias antar frekuensi dari satelit dan penerima juga telah dihilangkan menggunakan informasi bias yang didapat dari Electric Navigation Research Institute (ENRI) dan Global Ionosphere Maps (GIM) yang diakses dari University of Berne (UiB).

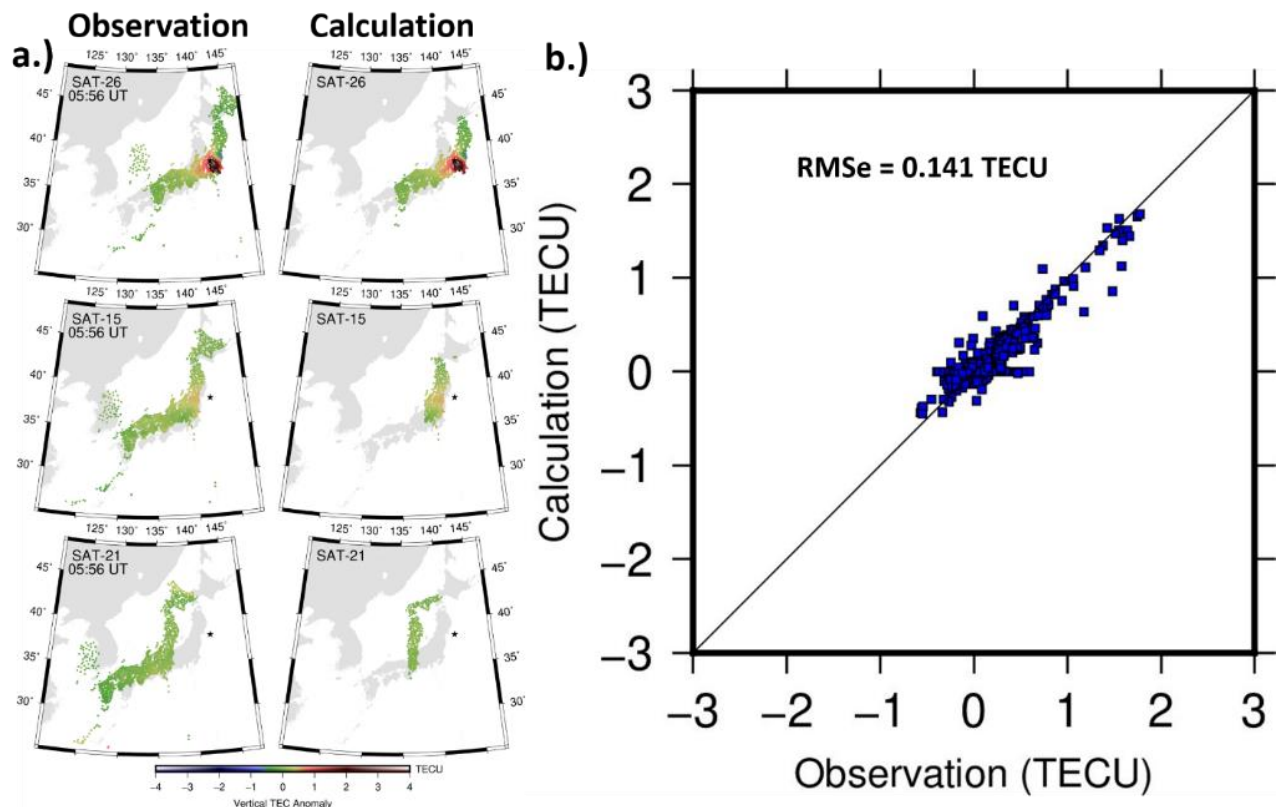
STEC yang telah dibersihkan kemudian akan diubah menjadi absolut vertikal TEC (VTEC) yang merupakan hasil perkalian antara kosinus sudut elevasi GPS dan STEC pada lapisan ionosfer yang tipis di ketinggian 300 km (tempat dimana kerapatan ionisasi maksimum). Langkah selanjutnya adalah proses isolasi CID dari data time-series VTEC. Untuk mengisolasi CID, kurva referensi perlu dibuat sebagai nilai TEC background untuk setiap pasangan stasiun-satelit dengan menggunakan fitting-curve polinomial kubik waktu ke data VTEC.

Teknik lebih detail telah dibahas pada Muafiry et. al., (2018). Hasil pengurangan antara VTEC dan kurva referensi tersebut nantinya adalah CID. Untuk selanjutnya hasil pengurangan tersebut akan disebut sebagai delta-TEC dan akan digunakan sebagai input untuk program tomografi 3D.

Program tomografi 3D yang sudah dikembangkan ini akan membangun blok 3D di atas wilayah yang menjadi *region of interest* dengan dimensi  $0,5^\circ$  (utara-selatan),  $0,6^\circ$  (timur-barat), dan 60 km (arah atas-bawah) mulai dari ketinggian 90 km hingga 640 km (Gambar 2a dan 2b). Setiap blok diasumsikan homogen untuk kerapatan anomali elektron dan program ini telah dirancang untuk melakukan filter LoS yang melewati blok 3D. Panjang LoS dalam setiap blok ( $A_{ij}$ ) akan dihitung dengan menggunakan jari-jari rata-rata bumi (menghilangkan bentuk kegepangan bumi). Panjang penetrasi LoS berperan sebagai bobot untuk memperkirakan kerapatan anomali elektron untuk setiap blok tomografi ( $L_j$ ) dari satu LoS agar terdistribusi secara merata. Secara umum proses penentuan kerapatan anomaly elektron di dalam blok tomografi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$y_i = \sum_j A_{ij} L_j + e_i \quad (2)$$

dimana  $y_i$  adalah delta-TEC untuk LoS yang terintegrasi dari satelit ke receiver dan  $e_i$  adalah kesalahan pengukuran setiap pasangan data delta-TEC satelit-receiver (yang diasumsikan sebesar 0,05 TECU). Karena masih ada blok tomografi yang tidak dilintasi oleh LoS, *continuity constraint* juga diterapkan pada program tomografi 3D ini, yakni dengan mengasumsikan blok yang bersebelahan akan memiliki kerapatan anomali elektron yang sama. Selain itu *altitudinal constraint* juga diterapkan pada program tomografi 3D ini, dengan tujuan untuk mendistribusikan kerapatan elektron secara lebih realistis berdasarkan sebaran ionisasi lapisan ionosfer. Metode tomografi 3D ini telah dibahas dengan detil pada Muafiry dan Heki, 2020.



Gambar 4. Perbandingan antara data observasi (a-panel kiri) dan data kalkulasi (a-panel kanan) delta-TEC dari satelit GPS (26, 15, 21) pada pukul 05:56 UT. Sebaran data kalkulasi delta-TEC menunjukkan konsistensi dengan data observasi delta-TEC. Uji akurasi tomografi 3D lainnya adalah dengan membandingkan 10% data observasi dengan 90% data kalkulasi.

## Hasil dan Pembahasan

Gambar 1 menunjukkan pertumbuhan CID (delta-TEC) di plot secara 2D pada pukul 05:50-06:00 UT (sekitar 5-15 menit setelah gempa Tohoku-oki 2011) yang diamati menggunakan semua satelit GPS yang tersedia. Gambar 1b-1d menunjukkan gelombang CID yang bergerak secara konsentris. Dalam gambar tersebut, setiap titik menunjukkan Ionospheric Piercing Point (IPP) pada ionosfer di ketinggian 300 km. Setiap satelit menghasilkan amplitudo CID yang berbeda yang mencerminkan perbedaan sudut elevasi. Dalam hal ini, analisis struktur 3D CID penting untuk dilakukan dengan tujuan untuk memperkirakan secara akurat spatio-temporal dari CID. Namun, sebelum dilakukan tomografi 3D untuk data observasi, terlebih dahulu dilakukan uji akurasi dari program tomografi 3D di wilayah tersebut dengan menggunakan uji resolusi klasik dengan model *checkerboard*. Kerapatan anomali elektron  $\pm 2,00 \times 10^{11}$  elektron/m<sup>3</sup> didistribusikan ke blok (Gambar 2a, sebagai input) dan digunakan untuk mensintesis data delta-TEC buatan. Gambar 2b (output) menunjukkan distribusi anomali yang didapatkan sangat baik menggunakan data delta-TEC buatan. Meskipun demikian, sekitar 2/3 dari model input mengalami blur. Hasil blur tersebut terjadi karena blok berada di atas laut dan pada lokasi tersebut ketersediaan LoS sangat terbatas.

Gambar 3a-3f menyajikan distribusi 3D CID yang diperoleh dari teknik tomografi setelah gempa Tohoku-oki Mw 9.0 2011 dari berbagai waktu (mulai pukul 05:54 hingga 05:59 UT) secara *plane-view* dan secara *longitudinal-altitudinal view*. Gambar 3a menunjukkan CID mulai muncul pada pukul 05:54 UT tepat di atas lokasi sesar naik terbesar (garis kontur hitam). CID menunjukkan anomali positif dan muncul pertama kalinya di ketinggian 200 km secara lemah di awal kemunculannya dan terus merambat ke atas secara vertikal (Gambar 3b-3f) hingga mencapai lapisan-F ionosfer dengan amplitudo yang lebih kuat dan mulai menghilang pada ketinggian sekitar 600 km. CID terdiri dari anomali positif dan negatif (Heki dan Ping, 2005). Hasil tomografi 3D menampilkan kedua komponen tersebut dimana bagian negatif mengikuti jalur anomali positif setelahnya. Pergerakan horizontal CID untuk peristiwa gempa 2011 ini dapat terdeteksi dalam program tomografi 3D dan menunjukkan hasil yang konsisten dengan penelitian sebelumnya. Seperti misalnya, CID bergerak ke selatan secara sirkular lebih jelas daripada pergerakan CID ke utara karena CID memiliki ketergantungan terhadap medan magnet bumi. Dikarenakan medan geomagnetik di wilayah ini mengarah ke selatan, pergerakan partikel bermuatan pada CID dan medan geomagnetik mungkin secara selektif melemahkan pergerakan CID ke utara (Heki dan Ping, 2005). CID dari hasil tomografi 3D menunjukkan memiliki kecepatan horizontal sebesar 1-3 km/s setara dengan kecepatan merambat gelombang akustik.

Berdasarkan hasil 3D tomografi ini juga dapat disimpulkan kecepatan vertikal CID sama dengan kecepatan horizontalnya. Pada Gambar 3, mulai pukul 05:55 UT positif anomaly berada di posisi 144°BT dan di ketinggian 330 km. Pukul 05:56 UT positif anomaly berada di posisi 143°BT dan di ketinggian 390 km. Pada kedua epok ini positif anomaly bergerak sejauh ~60km ke atas. Dengan kata lain kecepatan vertikal dari CID sebesar ~1km/s. Begitu juga dengan empat epok berikutnya, didapatkan kecepatan vertikal CID sebesar 1km/s, 1.83 km/s, 2km/s dan 1.83 km/s.

Uji validasi akurasi untuk menunjukkan keakuratan hasil tomografi 3D dilakukan dengan membandingkan data delta-TEC pengamatan dan kalkulasi. Data yang dihitung diperoleh dari dua *subset* data pengamatan yang berbeda pada waktu 05:56 UT (yaitu 90% data digunakan untuk tomografi 3D dan sisanya digunakan untuk validasi). 90% data tersebut dijadikan input dari program tomografi 3D dan hasilnya dibandingkan dengan data pengamatan 10% lainnya. Hasil perbandingannya diharapkan saling tumpang tindih. Gambar 4b menunjukkan mereka saling bertampalan dan hanya memiliki kesalahan akar kuadratnya sebesar 0,141 TECU. Gambar 4a adalah proses uji akurasi dengan membandingkan anomali yang diamati (delta-TEC) dan dikalkulasi dari tiga satelit, PRN26, PRN15, dan PRN21 pada saat 11 menit setelah gempa. Anomali yang diamati adalah data delta-TEC yang diplot secara 2D dengan IPP plot yang mirip dengan Gambar 1, sedangkan anomali yang dikalkulasi adalah hasil dari perhitungan ke depan (*forward modelling*) dari persamaan 2. Kedua plot ini diharapkan saling bertampalan agar dapat mencerminkan keberhasilan proses tomografi 3D. Dari Gambar 4a, anomali yang dikalkulasi dapat direproduksi dengan baik, yakni terdapat kesamaan dengan kerapatan anomali elektron observasi. Dengan melakukan dua jenis uji akurasi tersebut dan berhasil, dipastikan performa hasil tomografi 3D penelitian ini baik.

## Kesimpulan

Penelitian ini mempelajari struktur gangguan ionosfer saat gempa atau dikenal sebagai *coseismic ionospheric disturbance* (CID) dengan teknik tomografi 3D menggunakan data delta GPS-TEC dari receiver GEONET Jepang dan Korea Selatan. Keakuratan program tomografi 3D ini telah divalidasi dengan dua jenis validasi dan uji resolusi klasik. Tes akurasi tersebut menunjukkan bahwa kinerja program tomografi 3D untuk kasus ini baik. Dengan melakukan tomografi 3D untuk CID setelah gempa bermagnitudo 9.0 di Tohoku-oki Jepang tahun 2011, dapat dipastikan bahwa CID mulai muncul di ketinggian 200 km secara lemah tetapi terus bergerak ke atas dengan amplitudo yang lebih kuat ketika tiba di lapisan-F ionosfer. Pergerakan CID secara horizontal ke arah selatan dan vertikal ke atas dengan kecepatan sekitar 1-3 km/s. Informasi ini akan sangat bermanfaat kedepannya untuk proses mitigasi bencana gempa dan tsunami melalui lapisan ionosfer dengan sensor geofisika yang sama atau bahkan sensor lainnya sehingga perubahan jumlah elektron di ionosfer pada ketinggian tertentu dapat diamati dengan teliti.

## Ucapan Terimakasih

Kami mengucapkan terimakasih kepada GEONET ([www.terras.gsi.go.jp](http://www.terras.gsi.go.jp)) Jepang untuk data GNSS. Artikel ini terbit melalui pendanaan penelitian internal dari UPPM Politeknik Sinar Mas Berau Coal No. 030/ S-Tug/PSB/PPM-Ka/X/2021.

## Daftar Pustaka

- Ammon C. J., T. Lay, H. Kanamori, M. Cleveland, (2011), A rupture model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 693–696, doi:10.5047/eps.2011.05.015
- Astafyeva, E., P. Lognonné, and L. Rolland (2011), First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L22104. doi:10.1029/2011GL049623
- Bagiya, M.S., Thomas, D., Astafyeva, E. et al. (2020). The Ionospheric view of the 2011 Tohoku-Oki earthquake seismic source: the first 60 seconds of the rupture. *Sci Rep* 10, 5232. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61749-x>.
- Cahyadi, M. N., and K. Heki (2015), Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw dependence of the disturbance amplitudes, *Geophys. J. Int.*, 200(1), 116-129, doi:10.1093/gji/ggu343.
- Cahyadi, M. N., I. M. Anjasmara, I. N. Muafiry, N. Widjajanti, D. Arisa, B. Muslim, M. E. Putra (2021), 3D Tomography of Ionospheric Anomalies after the 2020 Turkey Earthquake and Tsunami using GNSS-TEC, *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 40 Issue 3, p1-12. 12p.
- Cahyadi, M.N.; Muslim, B.; Pratomo, D.G.; Anjasmara, I.M.; Arisa, D.; Rahayu, R.W.; Hariyanto, I.H.; Jin, S.; Muafiry, I.N. (2022). Co-Seismic Ionospheric Disturbances Following the 2016 West Sumatra and 2018 Palu Earthquakes from GPS and GLONASS Measurements. *Remote Sens.* 14, 401. <https://doi.org/10.3390/rs14020401>
- Calais, E., J. B. Minster, M. A. Hofton, M. A. H. Hedlin. (1998), Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. *Geophys. Journal. Int.*, 191-202. doi:10.1046/j.1365-246x.1998.00438.x
- Choi, B.-K., and J. Hong (2019), Observation of the fast-traveling ionospheric disturbances induced by the 2017 North Korean missile, *Adv. Space Res.*, 63, 2598-2608, doi:10.1016/j.asr.2018.12.033
- He, L., and K. Heki (2018), Three-dimensional tomography of ionospheric anomalies immediately before the 2015 Illapel earthquake, Central Chile, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 123, 4015–4025. doi:10.1029/2017JA024871
- Heki, K. and J.-S. Ping (2005), Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 845–855, doi:10.1016/j.epsl.2005.06.010.
- Heki, K. (2006), Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, Central Japan, inferred from ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14303, doi:10.1029/2006GL026249
- Kundu, B., B. Senapati, A. Matsushita, and K. Heki, Atmospheric wave energy of the 2020 August 4 explosion in Beirut, Lebanon, from ionospheric disturbances, *Sci. Rep.*, 11, 2793, 2021.
- Liu, J. Y. (2011) et al. Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake. *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* 116, 1–5
- Muafiry, I. N., K. Heki, and J. Maeda (2018), 3D tomography of midlatitude sporadic-E in Japan from GNSS-TEC data.

Earth, Planets Space,70(1). doi:10.1186/s40623-018-0815-7

- Muafiry, I.N. and K. Heki, 3D tomography of the ionospheric anomalies immediately before and after the 2011 Tohoku-oki (Mw9.0) earthquake, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 125, e2020JA027993, doi:10.1029/2020JA027993, 2020
- Ramadhon, S. (2015). Analisis Pengaruh Total Electron Content (TEC) di Lapisan Ionosfer pada Data Pengamatan GNSS RT-PPP. *Swara Patra*, 05(1). Retrieved from <http://ejurnal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/119>
- Rolland, L. M. et al. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 of the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets Sp.* 63, 853–857 (2011).
- Thomas, D., M. S. Bagiya, P. S. Sunil, L. Rolland, A. S. Sunil, T. D. Mikesell, & S. Nayak (2018), Revelation of early detection of coseismic ionospheric perturbations in GPS-TEC from realistic modelling approach: Case study, *Sci. Rep.*, 8(1), 1–10, doi:10.1038/s41598-018-30476-9.
- Tsugawa, T. et al. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 of the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets Sp.* 63, 875–879 (2011).



This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).