

PENGGUNAAN DATA TEC SUAR SATELIT DARI PENGAMATAN GRBR BERBASIS KAMPANYE UNTUK TOMOGRAFI IONOSFER DI ATAS JAWA BARAT INDONESIA

(THE USE OF SATELLITE BEACON TEC DATA FROM GRBR CAMPAIGN-BASED OBSERVATIONS FOR IONOSPHERIC TOMOGRAPHY OVER WEST JAVA INDONESIA)

Timbul Manik^{1*}, Mario Batubara¹, Musthofa Lathif¹, Peberlin Sitompul¹, Yana Robiana¹, Mamoru Yamamoto²

¹Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Japan

*e-mail: timbul.manik@lapan.go.id

Diterima 30 Januari 2018; Direvisi 23 Mei 2018; Disetujui 6 Juni 2018

ABSTRACT

The experiment of ionospheric tomographic reconstruction using satellite beacon TEC data from three adjacent GnU–Radio Beacon Receiver (GRBR) observation stations have been conducted by using data from campaign-based observation in Sumedang, Pameungpeuk and Indramayu, West Java, in 2016 and 2017. The reconstruction technique utilized is a simple Algebraic Reconstruction Technique (ART). The result obtained is the ionospheric electron density distribution along the longitude of 108 degrees East over the area of West Java and Indonesia. The ionospheric electron density parameters obtained from the IRI-2012 Model were used as the initiation to construct ionospheric tomography. The validation performed by correlating foF2 from the ionospheric tomographic reconstruction with that from ionosonde observation at Sumedang station, one of the GRBR observation sites, shows correlation coefficient of 0.8665 and a frequency bias of 1.6903 MHz, whereas the correlation with the maximum electron density NmF2 gives a correlation coefficient of 0.8529.

Keywords: *GRBR observation, TEC, tomography reconstruction, ART*

ABSTRAK

Percobaan rekonstruksi tomografi ionosfer menggunakan data pengamatan TEC suar satelit dari tiga stasiun pengamatan GnU–Radio Beacon Receiver (GRBR) yang berdekatan telah dilakukan menggunakan data pengamatan berbasis kampanye di Sumedang, Pameungpeuk, dan Indramayu, Jawa Barat, pada tahun 2016 dan 2017. Teknik rekonstruksi yang digunakan adalah teknik rekonstruksi aljabar sederhana, yaitu *Algebraic Reconstruction Technique* (ART). Hasil yang diperoleh adalah distribusi kerapatan elektron ionosfer sepanjang bujur 108 derajat Timur di atas wilayah Jawa Barat dan Indonesia. Parameter kerapatan elektron ionosfer yang diperoleh dari Model IRI-2012 digunakan sebagai inisiasi awal untuk membangun tomografi ionosfer. Validasi yang dilakukan dengan mengkorelasikan foF2 hasil rekonstruksi tomografi ionosfer dengan foF2 hasil pengamatan ionosonda di stasiun Sumedang, salah satu lokasi pengamatan GRBR, menunjukkan koefisien korelasi 0,8665, dan bias frekuensi 1,6903 MHz, sedangkan korelasi dengan kerapatan elektron maksimum NmF2 memberikan koefisien korelasi 0,8529.

Kata kunci: *Pengamatan GRBR, TEC, rekonstruksi tomografi, ART*

1 PENDAHULUAN

Salah satu pengamatan ionosfer yang berkembang saat ini adalah penerima GPS yang mengorbit pada ketinggian ~20.200 km, namun hasil pengukuran ionosfer dengan penerima GPS masih sangat dipengaruhi oleh lapisan plasmasfer (Jin dan Park, 2007). Sementara itu, penerima radio suar (*beacon*) satelit dari satelit orbit rendah (LEO) pada ketinggian 750-1100 km dapat memberikan hasil pengukuran ionosfer yang hanya sedikit dipengaruhi oleh lapisan plasmasfer (Thampi dan Yamamoto, 2010). Sistem penerima radio suar satelit pada dasarnya mengukur perbedaan fase antara sinyal frekuensi 150 dan 400 MHz dari satelit-satelit orbit rendah untuk memperoleh kerapatan elektron ionosfer. Teknik pengamatan yang sebelumnya merupakan penerima analog kemudian dikembangkan menjadi penerima digital berbasis perangkat yang *open source*, dinamai *GnU-Radio Beacon Receiver* (GRBR) (Yamamoto, 2008).

Di Indonesia, penerima radio suar satelit mulai dikembangkan sejak tahun 2010 dan telah dilakukan pengembangan secara mandiri. GRBR dioperasikan di beberapa lokasi dalam suatu jaringan pengamatan *real-time*, disebut jaringan pengamatan *beacon* TEC ekuator Indonesia. Pembangunan jaringan pengamatan *beacon* TEC ekuator ini berawal dari keinginan untuk memperluas cakupan pengamatan ionosfer di wilayah Indonesia. Beberapa ionosonda untuk pengamatan ionosfer konvensional dan penerima GPS untuk pengamatan ionosfer telah dioperasikan di Indonesia sejak lama, dan keberadaan jaringan pengamatan *beacon* TEC ini diharapkan dapat mencakup seluruh wilayah Indonesia. Lokasi pengamatan GRBR saat ini terdapat di Kototabang, Sumatera Barat (0,2° LS, 100,32° BT), Pontianak, Kalimantan Barat (0,05° LS, 109,25° BT), Tomohon, Sulawesi Utara (1,21° LU, 124,49° BT), dan Biak, Papua (1,08° LS, 136,05° BT). Setiap penerima

mampu menerima sinyal radio suar satelit frekuensi 150 dan 400 MHz selama 10-15 menit yang dipancarkan dari setiap satelit LEO yang melintas di atas wilayah Indonesia. (Manik dan Lathif, 2011).

Jaringan ini sangat unik karena merupakan jaringan pengamatan TEC ionosfer pertama berbasis penerima digital radio suar satelit di Indonesia yang tepat berada di ekuator, mencakup pengamatan TEC ionosfer dari ujung Barat hingga ujung Timur Indonesia. Beberapa pengamatan jangka pendek juga dilakukan di beberapa tempat di pulau Jawa sebagai tambahan terhadap jaringan ini, yaitu di Sumedang, Jawa Barat (6,91° LS, 107,83° BT), Yogyakarta (7,68° LS, 110,26° BT), dan Pasuruan, Jawa Timur (7,34° LS, 112,65° BT). Seluruh hasil pengukuran dapat diperoleh di pusat data di Bandung secara *real-time/near-real-time*.

Karakteristik ionosfer dalam bentuk informasi *Total Electron Content* (TEC) ionosfer sangat berguna untuk telekomunikasi, penentuan posisi berbasis satelit, maupun prakiraan cuaca antariksa. Upaya karakterisasi dan parameterisasi ionosfer untuk wilayah ekuator dan lintang rendah memerlukan banyak instrumen pengamatan yang tentu saja berbiaya tinggi. Sebuah konsep yang dikenal dengan tomografi ionosfer telah diusulkan untuk dapat memecahkan masalah ini. Pemetaan distribusi kerapatan elektron di lapisan ionosfer dapat dilakukan dengan menggunakan teknik tomografi yang memiliki keunggulan, yaitu dapat mencakup wilayah-wilayah terpencil yang tidak dapat dijangkau oleh instrumen pengamatan (Manik dan Lathief, 2011; Batubara *et al.*, 2016).

Austen (1988) menunjukkan bahwa beberapa perangkat penerima yang bekerja simultan dalam suatu rangkaian yang mengikuti lintang geografis akan dapat memperoleh data TEC yang dapat digunakan untuk pencitraan tomografi, yaitu distribusi

kerapatan elektron ionosfer mengikuti garis lintang (latitudinal) sebagai fungsi dari ketinggian. Beberapa percobaan tomografi lainnya yang dilakukan di lintang menengah dan tinggi juga telah berhasil mendapatkan informasi struktur ionosfer skala luas, seperti palung ionosfer, *travelling ionospheric disturbances* (TIDs), serta struktur *quasi-wave* yang sering terlihat pada perturbasi ionosfer (Raymund et al., 1994, Thampi et al., 2007). Tomografi juga telah dilakukan di lintang rendah untuk mengamati struktur ionosfer dan gangguan ionosfer di lintang rendah.

Percobaan tomografi dengan rangkaian penerima suar satelit dalam suatu jaringan pengamatan untuk mengamati struktur ionosfer dan gangguan ionosfer di lintang rendah telah pernah dilakukan oleh Tsai et al. (2002) di Taiwan, tim *Coherent radio experiment* (CRABEX) di India (Thampi et al., 2007), dan Thampi dan Yamamoto (2010) di Jepang.

Usaha-usaha untuk melakukan percobaan rekonstruksi ionosfer di Indonesia sebelumnya juga telah pernah dilakukan, namun hasilnya masih memerlukan penyempurnaan dan pengujian untuk memastikan kebenaran hasil rekonstruksi. (Manik dan Sitompul, 2012; Sitompul, et al., 2015; Batubara et al., 2016; Manik et al., 2016; Manik et al., 2017).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendiskusikan hasil rekonstruksi tomografi kerapatan elektron ionosfer dari pengamatan GRBR berbasis kampanye tahun 2016 dan 2017 di sepanjang bujur 108 derajat Timur Indonesia dan validasinya.

2 DATA DAN METODOLOGI

2.1 Lokasi dan Data

Pengamatan ionosfer dengan GRBR berbasis kampanye telah dilakukan dua kali. Kampanye yang pertama dilakukan pada 8-10 November 2016 dan yang kedua pada 25-29 September 2017 di wilayah Jawa Barat

seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Lokasi pengamatan berbasis kampanye di pulau Jawa, dari Selatan ke Utara berturut-turut adalah Pameungpeuk, Tanjungsari, dan Indramayu.

Tiga set perangkat sistem penerima GRBR ditempatkan di tiga lokasi, yaitu Anjatan, Indramayu (INDR: 6,35° LS, 108,33° BT), Tanjungsari, Sumedang (TJS: 6,91° LS, 107,83° BT), dan Pameungpeuk (PMPK: 7,63° LS, 107,69° BT). Jarak antara INDR-TJS diperkirakan sekitar 62 km dan TJS-PMPK sekitar 80 km. Waktu pengamatan di tiga lokasi disesuaikan sedemikian rupa mengikuti waktu pada jaringan internet global, sehingga tidak ada perbedaan waktu saat satelit melintas. Jadwal perlintasan satelit dibuat berdasarkan data *Two-Line Elements* (TLE) yang mengacu pada lintasan masing-masing satelit. TLE diperoleh saat pengamatan dari situs <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/digital beacon/sub2.html>.

Selama pengamatan, GRBR yang dioperasikan bersamaan di tiga lokasi tersebut menerima sinyal dual frekuensi 150 dan 400 MHz dari beberapa satelit orbit rendah (LEO) yang melintas di atas Indonesia, antara lain Cosmos 2407, Cosmos 2463, dan DMSP F15. Ketinggian satelit COSMOS berkisar antara 1000-1100 km, sedangkan satelit DMSP F15 sekitar 850 km.

2.2 Standardisasi Data

Data TEC relatif (S-TEC) dan lintasan satelit diperoleh dari akuisisi data GRBR. Pada Gambar 2-2 diperlihatkan lintasan satelit Cosmos 2407, yang dipantau dari Anjatan, Indramayu pada 27 September 2017. Satelit melintas dari Selatan ke Utara dan diterima pada pukul 10.30.12-10.47.54 UT. Satelit melintas dalam radius lebih dari 60° dari lokasi pengamatan.

Data pengamatan yang diperoleh di tiga lokasi kemudian dikumpulkan, kemudian dilakukan akuisisi data TEC dan lintasan satelit. Tabel 2-1 menunjukkan waktu perlintasan satelit yang diterima di Anjatan, Indramayu pada periode kampanye 2016 dan 2017, terdiri dari 6 set data pada periode 2016 dan 24 set data pada tahun 2017 (Manik *et al.*, 2017).

Pemrosesan data pengamatan untuk rekonstruksi tomografi dilakukan setelah kampanye, yaitu setelah data dari ketiga stasiun dikumpulkan. Alur

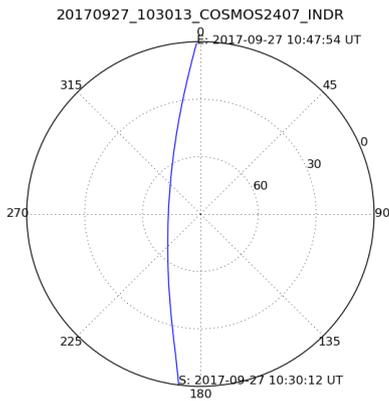
pemrosesan data diperlihatkan pada Gambar 2-3. Pada rekonstruksi tomografi ini, model global IRI ionosfer (IRI-2012) ini, model global IRI ionosfer (IRI-2012) digunakan sebagai inisiasi awal TEC ionosfer.

Slant TEC (S-TEC) dari pengamatan GRBR dikoreksi dengan teknik koreksi dua stasiun dari Leiting *et al.* (1975). Data lintasan satelit dan koreksi S-TEC digunakan untuk perhitungan nilai absolut TEC (V-TEC) dan geometri tomografi.

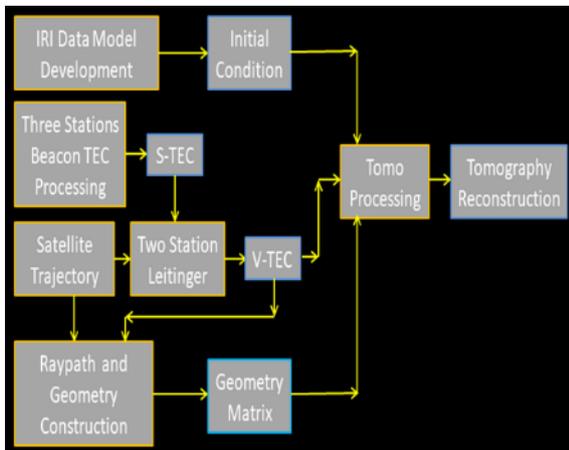
Selanjutnya matriks geometri tomografi dihasilkan dengan membangun jalur pancar satelit yang diperoleh dari perhitungan spasial trigonometri dalam dua dimensi berdasarkan data lintasan satelit. Akhirnya, data inisiasi TEC latar belakang dari IRI-2012, data TEC absolut dari pengamatan, dan matriks geometri dari lintasan satelit digunakan dalam proses tomografi untuk mendapatkan matriks tomografi sebagai hasil rekonstruksi tomografi ionosfer.

Tabel 2-1: DAFTAR PENGAMATAN BERBASIS KAMPANYE (DITERIMA DI ANJATAN, INDRAMAYU)

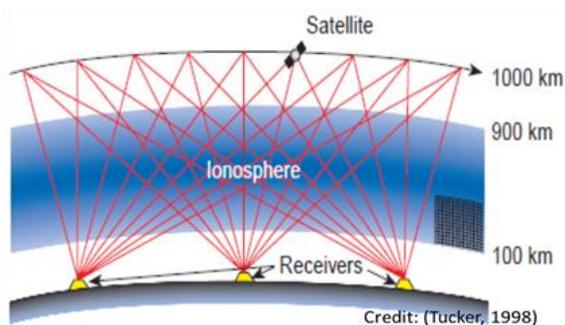
No	Tanggal	Waktu (UT)	Nama Satelit	Keterangan (arah)
1	08-11-2016	22.53.30	Cosmos 2407	S-U*
2	09-11-2016	12.02.39	Cosmos 2407	U-S
3		23.19.05	Cosmos 2407	S-U
4	10-11-2016	07.11.27	DMSP F15	S-U
5		10.12.31	Cosmos 2463	S-U
6		23.45.50	Cosmos 2407	S-U
7	25-09-2017	19.16.18	DMSP F15	U-S
8		22.47.41	Cosmos 2407	U-S
9	26-09-2017	07.55.14	DMSP F15	S-U*
10		09.17.58	Cosmos 2463	U-S
11		10.04.20	Cosmos 2407	S-U
12		19.00.29	DMSP F15	U-S
13		20.37.16	Cosmos 2463	S-U
14		23.14.08	Cosmos 2407	U-S
15	27-09-2017	07.39.25	DMSP F15	S-U
16		10.30.13	Cosmos 2407	S-U
17		18.44.58	DMSP F15	U-S*
18		21.08.11	Cosmos 2463	S-U*
19		22.54.47	Cosmos 2407	U-S
20	28-09-2017	07.23.19	DMSP F15	S-U
21		08.34.30	Cosmos 2463	U-S
22		10.56.40	Cosmos 2407	S-U
23		19.54.06	Cosmos 2463	S-U*
24		22.20.39	Cosmos 2407	U-S
25	29-09-2017	07.07.47	DMSP F15	S-U
26		09.05.43	Cosmos 2463	U-S
27		09.37.18	Cosmos 2407	S-U
28		19.53.34	DMSP F15	U-S*
29		20.04.43	Cosmos 2463	S-U
30		22.47.06	Cosmos 2407	U-S



Gambar 2-2: Lintasan satelit Cosmos 2407 dari Selatan ke Utara, dipantau dari Anjatan, Indramayu pada 27 September 2017, mulai pukul 10.30.12 UT dan berakhir pukul 10.47.54 UT.



Gambar 2-3: Diagram alur pemrosesan data



Gambar 2-4: Metode pengukuran TEC dengan penerima radio suar satelit (GRBR).

Dalam pemrosesan data ini, bidang kerja yang akan direkonstruksi dibagi dalam kisi-kisi dengan resolusi vertikal 50 km dan horizontal (lintang/bujur) 0,5°, sehingga diperoleh

gambaran dengan cakupan vertikal 100-1000 km, dan cakupan horizontal setiap 0,5° dari 9° LS hingga 8,5° LU, sehingga diperoleh matriks dengan cakupan spasial 19 × 36 untuk bidang yang akan direkonstruksi.

2.3 Metode Penelitian

Ilustrasi grafis sederhana teknik tomografi ionosfer diperlihatkan pada Gambar 2-4 (Tucker, 1998). Tiga perangkat sistem penerima yang bekerja simultan dan menerima sinyal radio suar satelit yang berbeda (150 dan 400 MHz) dari satelit LEO yang melintas memungkinkan perolehan data TEC dengan cakupan spasial yang lebih luas. Hal ini dapat digambarkan oleh jalur pancar (*ray path*) antara satelit dengan ketiga sistem penerima tersebut. Dengan demikian, area di ionosfer tersebut dapat memberikan banyak informasi TEC pada arah yang berbeda.

Pengukuran TEC dengan GRBR menerapkan perbedaan frekuensi Doppler di antara dua frekuensi yang dipancarkan satelit dan diterima GRBR di bumi. Perbedaan frekuensi Doppler ini berkorelasi dengan TEC sepanjang jalur pancar sinyal satelit. Nilai absolut TEC adalah data dasar untuk inversi tomografi yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai persamaan linier berikut:

$$Y = Ax + E \tag{2-1}$$

dengan Y adalah data pengamatan TEC, x adalah parameter kerapatan elektron yang tidak diketahui, A adalah matriks geometri, dan E adalah kesalahan pengukuran dan diskretisasi (Thampi et al., 2007, Manik et al., 2017). Dengan adanya data TEC ini, rekonstruksi distribusi kerapatan elektron ionosfer akan dapat dilakukan (Leitinger et al., 1975; Austen et al., 1986; Austen et al., 1988; Thampi et al., 2007; Thampi dan Yamamoto, 2010; Vierinen et al., 2014).

Konfigurasi sistem penerima ditempatkan sepanjang garis bujur

untuk satelit LEO yang bergerak pada orbit polar. Sementara itu, untuk satelit yang bergerak dengan orbit ekuatorial, konfigurasi sistem penerima ditempatkan sepanjang garis lintang. Satelit akan melintas selama sekitar 10-15 menit, dan setiap penerima suar satelit akan mendapatkan/mengukur nilai TEC relatif untuk setiap posisi satelit yang bergerak di atas lokasi penerima. Sinyal satelit diterima oleh GRBR setiap kali satelit melintas. Sinyal satelit menembus ionosfer dengan ketebalan tertentu. Selanjutnya, posisi satelit dan data parameter sinyal satelit yang tersimpan di pusat data dapat dihitung untuk merekonstruksi area cakupan sinyal satelit.

Metode *Algebraic Reconstruction Technique* (ART) adalah suatu metode rekonstruksi dengan menggunakan proses perhitungan berulang-ulang (iterasi) untuk menyelesaikan masalah pada persamaan multilinier. ART difokuskan untuk merekonstruksi isi setiap elemen matriks ($m \times n$) yang mencerminkan nilai fungsi kerapatan elektron pada dua dimensi. Langkah pengolahan ART adalah pembentukan matriks inialisasi, perhitungan faktor koreksi, proses rekonstruksi, kemudian pengujian konvergensi hasil perhitungan. Di akhir proses, keluaran dari teknik ini adalah pendekatan numerik yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f_j^{k+1} = f_j^k + \alpha \frac{p_i - \sum_{n=1}^N A_{in} f_n^k}{\sum_{n=1}^N A_{in}^2} A_{ij} \quad (2-2)$$

dengan α adalah parameter relaksasi, p_i adalah data yang diamati, A adalah matriks geometri, dan f adalah nilai kerapatan elektron (Ne).

Nilai TEC yang diperoleh dari tomografi dapat dikorelasikan dengan nilai frekuensi kritis lapisan F/F2 ($foF2$), dengan menganggap bahwa ionosfer memiliki kerapatan yang homogen secara vertikal, dan kerapatan elektron (Ne) sama dengan kerapatan elektron maksimum lapisan F2 ionosfer ($NmF2$).

Hubungan antara kerapatan elektron maksimum lapisan F2 ionosfer ($NmF2$) dengan frekuensi kritis lapisan F2 adalah berikut:

$$NmF2 = 1.24 \times 10^{-6} (foF2)^2 \quad (2-3)$$

Dari persamaan ini, diperoleh frekuensi kritis lapisan F2 sebagai berikut:

$$foF2 = \sqrt{\frac{NmF2}{1.24 \times 10^{-6}}} \quad (2-4)$$

dengan $foF2$ dalam MHz dan nilai $NmF2$ dalam elektron/ m^3 .

Dalam pemrosesan data rekonstruksi tomografi ini, bidang kerja yang akan direkonstruksi dibagi dalam kisi-kisi dengan resolusi vertikal 50 km dan horizontal (lintang/bujur) $0,5^\circ$. Dengan demikian, dapat diperoleh gambaran dengan cakupan vertikal 100-1000 km, dan horizontal setiap $0,5^\circ$ dari 9° LS hingga $8,5^\circ$ LU sehingga diperoleh matriks dengan cakupan spasial 19×36 untuk bidang yang akan direkonstruksi. Sebagai perbandingan, rekonstruksi tomografi dengan resolusi 50 km (vertikal) \times 100 km (horizontal) dilakukan sebelumnya pada percobaan CRABEX di India (Thampi *et al.*, 2007). Gambaran rekonstruksi tomografi dengan resolusi yang lebih baik, sebagai contoh resolusi 25 km (vertikal) \times 50 km (horizontal), atau 25 km (vertikal) \times 25 km (horizontal), akan dihasilkan kemudian untuk penelitian yang lebih terperinci (Thampi dan Yamamoto, 2010; Vierinen *et al.*, 2014).

Keluaran yang diharapkan adalah gambaran distribusi kerapatan elektron sepanjang lokasi geografis tertentu di atas wilayah Jawa Barat, Indonesia. Pengujian hasil rekonstruksi tomografi ionosfer dapat dilakukan dengan membandingkan parameter frekuensi kritis ($foF2$) dan nilai kerapatan elektron maksimum ($NmF2$) terhadap hasil pengamatan ionosonda dari stasiun yang terdekat.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

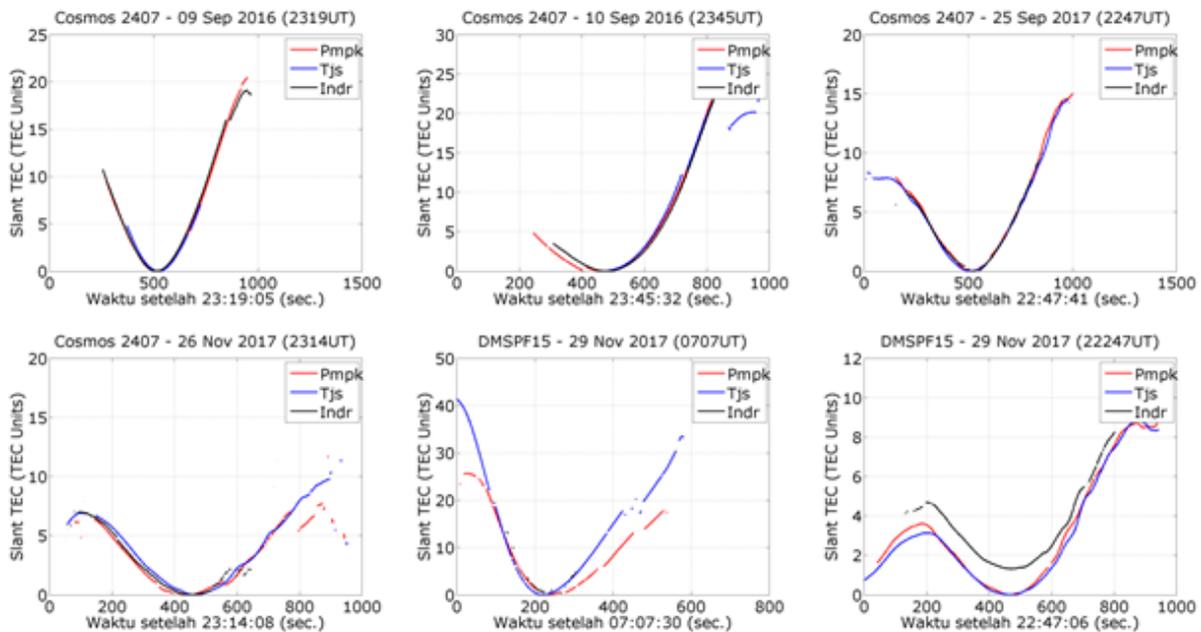
Dari analisis perbedaan fase antara dua sinyal (150 dan 400 MHz) yang diterima GRBR pada setiap lokasi, diperoleh nilai TEC relatif atau S-TEC antara satelit dengan penerima. Nilai TEC relatif terendah diasumsikan bernilai nol adalah nilai TEC pada jarak terdekat antara satelit dengan penerima pada masing-masing lokasi. Gambar 3-1 menunjukkan profil dari sebagian nilai TEC relatif untuk masing-masing lokasi pengamatan pada tahun 2016 dan 2017.

Nilai S-TEC kemudian dikonversi ke nilai V-TEC dengan menggunakan metode dua stasiun yang dikembangkan oleh Leitinger *et al.* (1975) dan digunakan untuk rekonstruksi tomografi ionosfer. Gambar 3-2 menunjukkan sebagian hasil konversi TEC relatif ke nilai absolut yang diperoleh di setiap lokasi pengamatan pada tahun 2016 dan 2017.

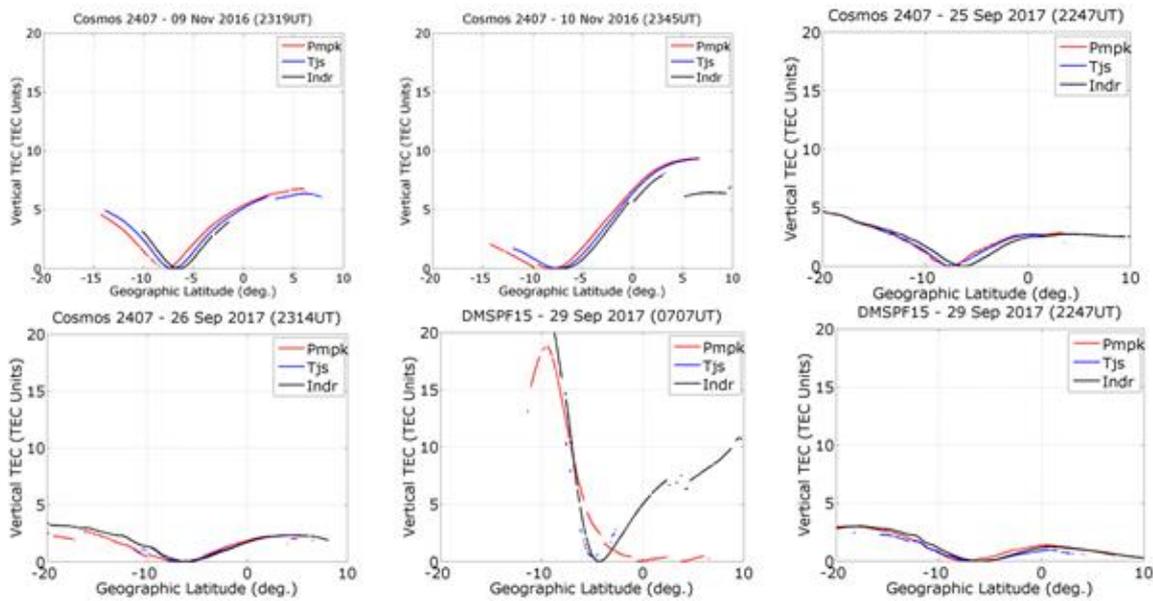
Informasi awal yang diperoleh dari pengamatan adalah koordinat lintasan satelit yang melintas dalam bentuk

koordinat azimut dan elevasi yang dikonversikan menjadi koordinat lintang dan bujur geografis. Data lintasan satelit hasil pengamatan digunakan untuk mendapatkan jalur pancar (*ray path*) satelit seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3-3. Dari gambaran ini terbentuk perpotongan lintasan sinyal satelit dalam cakupan koordinat 106°-108° BT yang diterima di tiga stasiun penerima. Dari jalur pancar satelit ini diperoleh area tomografi dalam dua dimensi, menampilkan profil cakupan di ionosfer hingga ketinggian perlintasan satelit dengan penambahan radius Bumi yang diasumsikan sekitar 6400 km.

Model *International Reference Ionosphere* (IRI) yang diperoleh tahun 2016 dari situs http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html digunakan untuk data inisiasi awal ionosfer. Pada penelitian ini dipilih keluaran model IRI-2012. Gambar 3-4 menampilkan sebagian dari 30 set keluaran model IRI-2012.



Gambar 3-1: Nilai TEC relatif (*Slant-TEC*) untuk masing-masing lokasi pengamatan pada tahun 2016 dan tahun 2017.



Gambar 3-2: Hasil konversi TEC relatif menjadi nilai TEC absolut untuk masing-masing lokasi pengamatan pada tahun 2016 dan 2017.

Langkah selanjutnya adalah proses rekonstruksi tomografi ionosfer dengan menerapkan persamaan (2-2) dengan masukan koordinat data jalur pancar sinyal satelit, data TEC vertikal (V-TEC), dan data inisiasi awal sebagai latar belakang TEC ionosfer yang sudah dilakukan sebelumnya

Dari 30 set data yang diperoleh dalam dua periode kampanye (tahun 2016 dan 2017), sebagian data kurang memadai untuk dilanjutkan pemrosesannya karena kualitas data yang kurang baik. Dari data-data yang baik diperoleh tomogram hasil rekonstruksi tomografi kerapatan elektron yang sebagian hasilnya ditampilkan pada Gambar 3-5. Sumbu tegak menyatakan ketinggian ionosfer dalam kilometer (km), dan sumbu mendatar adalah posisi lintang geografis dalam derajat.

Hasil rekonstruksi tomografi ionosfer dari dua periode pengamatan ionosfer dengan GRBR berbasis kampanye di Jawa Barat tahun 2016 dan 2017 memberikan gambaran distribusi vertikal ionosfer di atas Jawa Barat sepanjang bujur 108° Timur. Secara umum dapat dilihat rentang nilai kerapatan elektron pada saat malam hari

antara $0,5-2 \times 10^{11}$ elektron/ m^3 , saat menjelang siang hari pada rentang $2-4 \times 10^{11}$ elektron/ m^3 , dan pada rentang $2,5-5,5 \times 10^{11}$ elektron/ m^3 dan lebih pada saat siang hari.

Untuk menguji hasil rekonstruksi tomografi ionosfer, dilakukan perbandingan hasil rekonstruksi tomografi dengan hasil pengamatan ionosonda dari stasiun terdekat, yaitu stasiun LAPAN Sumedang yang merupakan salah satu lokasi stasiun pengamatan GRBR. Sejak awal proses rekonstruksi tomografi ini, data pengamatan ionosonda tidak digunakan sama sekali untuk inisiasi awal ionosfer. Sebagai gantinya, data model global ionosfer IRI-2012 digunakan untuk inisiasi awal sehingga rekonstruksi tomografi yang dilakukan menggunakan data TEC suar satelit ini terbebas dari data ionosonda.

Dengan menggunakan persamaan (2-4) di atas dilakukan perhitungan frekuensi kritis foF2 dan nilai maksimum kerapatan elektron NmF2 yang diperoleh dari pengamatan ionosonda. Dari keluaran model IRI-2016 diperoleh nilai elektron maksimum, disusun dalam Tabel 3-1. Persamaan regresi dan nilai koefisien korelasi diperoleh untuk

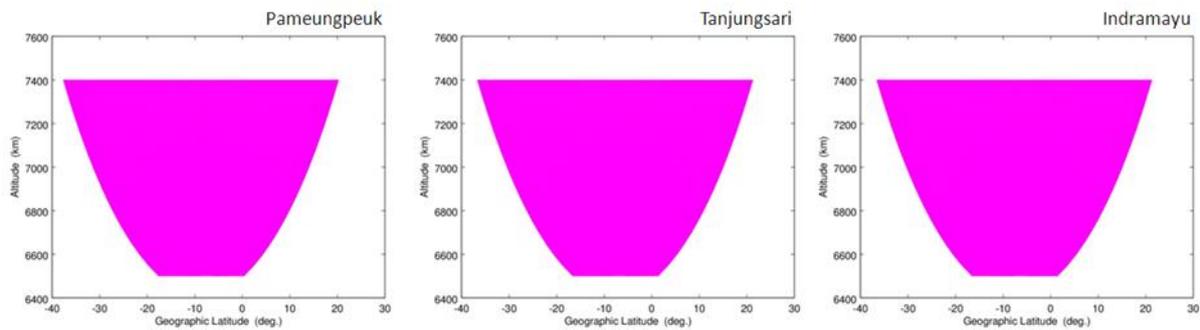
melihat kesesuaian antara parameter yang dibandingkan.

Dari data pengamatan kampanye tahun 2016, nilai foF2 dari hasil rekonstruksi tomografi dikorelasikan dengan foF2 dari data ionosonda. Gambar 3-6 (kiri) menunjukkan korelasi yang tinggi dengan koefisien determinasi 0,9403 dan bias frekuensi kurang dari 3 MHz. Selanjutnya dilakukan perbandingan antara nilai maksimum kerapatan elektron NmF2 tomografi dengan NmF2 pengamatan ionosonda. Gambar 3-6 (kanan) juga menunjukkan korelasi yang tinggi dengan koefisien determinasi 0,9767 (Manik et al., 2017).

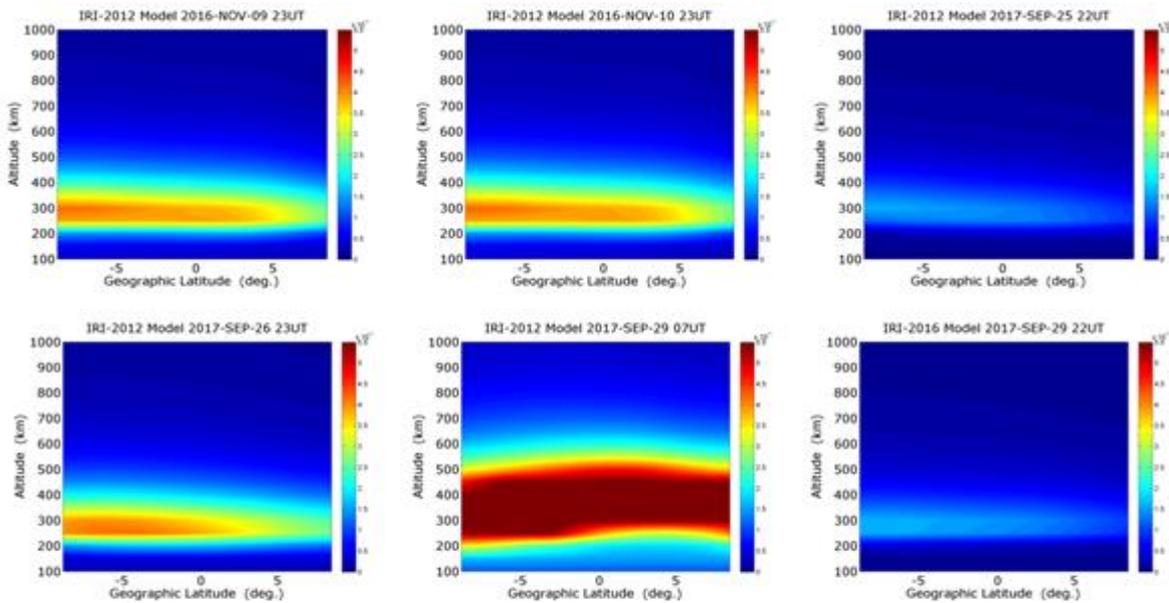
Dari hasil di atas, walaupun di-

peroleh nilai korelasi yang tinggi dari perbandingan yang telah dilakukan, keterbatasan data pengamatan tahun 2016 yang digunakan sebagai masukan rekonstruksi tomografi (sebanyak 5 pasang data) belum memadai untuk mengambil kesimpulan. Oleh karena itu, pengujian ini masih memerlukan data pengamatan yang lebih banyak.

Selanjutnya, pengujian hasil dilakukan dengan menggabungkan titik-titik koordinat yang diperoleh dari pengamatan tahun 2016 dan 2017 sehingga berjumlah 25 titik koordinat dan diperoleh persamaan regresi $y = 0,4682x + 1,6903$.



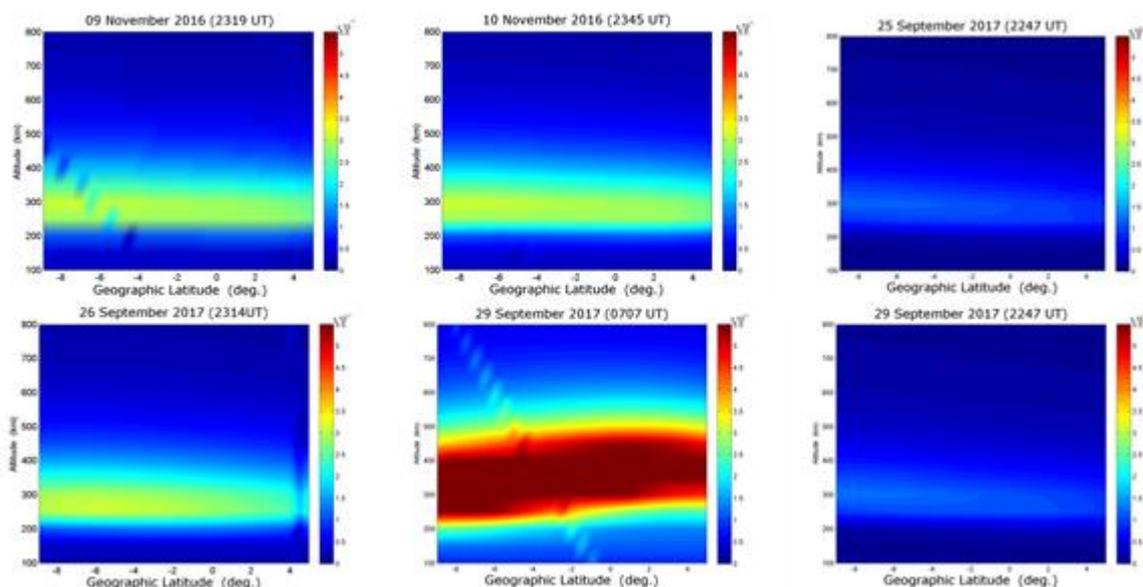
Gambar 3-3: Pembentukan jalur pancar (*ray path*) sinyal satelit Cosmos 2407 untuk masing-masing lokasi (Pameungpeuk, Sumedang, dan Indramayu) pada 09 November 2016, pukul 23 UT.



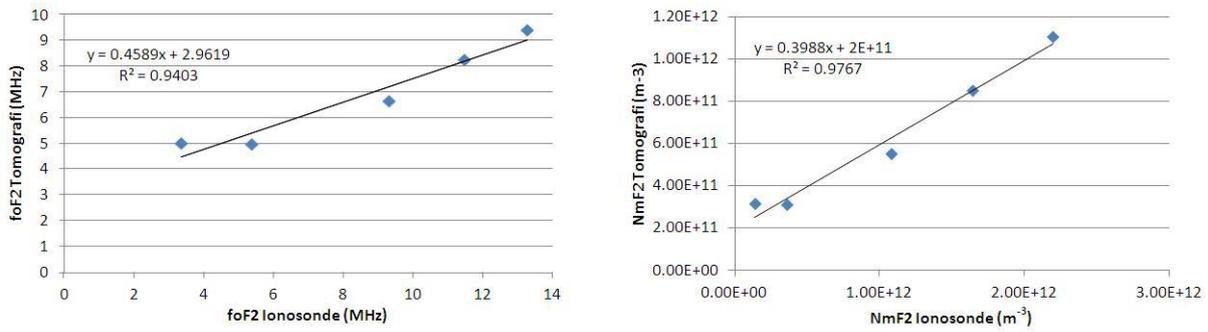
Gambar 3-4: Keluaran model IRI-2012 sebagai inisiasi awal rekonstruksi tomografi ionosfer.

Tabel 3-1: PERBANDINGAN HASIL REKONSTRUKSI TOMOGRAFI DENGAN PENGAMATAN IONOSONDA DAN KELUARAN MODEL IRI-2016.

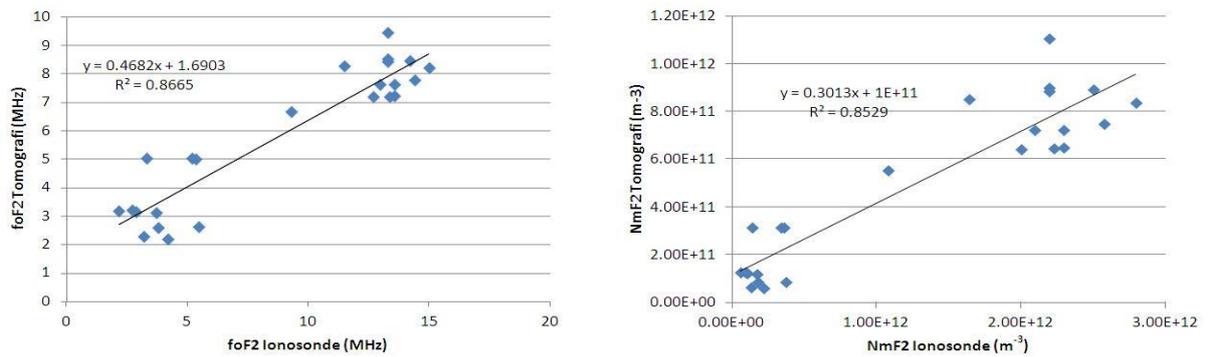
No.	Tanggal	Waktu	Tomografi		Ionosonda		IRI-2016
			foF2	NmF2	foF2	NmF2	NeMax
1	9-11-2016	12 UT	6,68	5,54E+11	9,33	1,08E+12	1,44E+12
2		23 UT	5,02	3,12E+11	5,38	3,59E+11	4,35E+11
3	10-11-2016	07 UT	9,44	1,11E+12	13,3	2,19E+12	1,43E+12
4		10 UT	8,29	8,53E+11	11,5	1,64E+12	1,47E+12
5		23 UT	5,04	3,14E+11	3,34	1,38E+11	4,48E+11
6	25-09-2017	19 UT	2,60	8,38E+10	3,81	1,80E+11	1,12E+11
7		22 UT	3,11	1,20E+11	3,71	1,71E+11	1,54E+11
8	26-09-2017	09 UT	7,64	7,24E+11	13,6	2,29E+12	9,69E+11
9		10 UT	7,64	7,24E+11	13	2,10E+12	8,47E+11
11		19 UT	2,63	8,59E+10	5,5	3,75E+11	1,14E+11
12		20 UT	2,20	6,02E+10	4,22	2,21E+11	7,94E+10
13		23 UT	5,02	3,13E+11	5,2	3,35E+11	4,32E+11
14	27-09-2017	07 UT	8,44	8,83E+11	13,3	2,19E+12	1,16E+12
15		10 UT	7,18	6,40E+11	12,7	2,00E+12	8,55E+11
16		22 UT	3,15	1,23E+11	2,88	1,03E+11	1,58E+11
17	28-09-2017	07 UT	8,48	8,92E+11	14,2	2,50E+12	1,18E+12
18		08 UT	8,21	8,35E+11	15	2,79E+12	1,10E+12
19		10 UT	7,21	6,45E+11	13,4	2,23E+12	8,62E+11
20		22 UT	3,17	1,25E+11	2,17	5,84E+10	1,60E+11
21	29-09-2017	07 UT	8,52	9,01E+11	13,3	2,19E+12	1,19E+12
22		09 UT	7,77	7,49E+11	14,4	2,57E+12	9,89E+11
23		10 UT	7,24	6,50E+11	13,6	2,29E+12	8,70E+11
24		20 UT	2,28	6,46E+10	3,22	1,29E+11	8,56E+10
25		22 UT	3,19	1,27E+11	2,71	9,11E+10	1,62E+11



Gambar 3-5: Sebagian hasil rekonstruksi tomografi dari pengamatan tahun 2016 dan 2017.



Gambar 3-6: Perbandingan nilai elektron maksimum hasil tomografi tahun 2016 dengan pengamatan ionosonde stasiun terdekat, foF2 tomografi dengan pengamatan (kiri), dan NmF2 tomografi dengan pengamatan (kanan).



Gambar 3-7: Perbandingan nilai elektron maksimum hasil tomografi tahun 2016 dan 2017 dengan pengamatan ionosonde stasiun terdekat, foF2 tomografi dengan pengamatan (kiri), dan NmF2 tomografi dengan pengamatan (kanan).

Hasil yang diperoleh dari perbandingan antara Nilai foF2 dari tomografi dengan foF2 dari data ionosonda menunjukkan koefisien determinasi 0,8665 dengan bias frekuensi 1,6903 MHz seperti pada Gambar 3-7 (kiri).

Dari perbandingan antara nilai maksimum kerapatan elektron (NmF2) tomografi dengan NmF2 pengamatan ionosonda, diperoleh persamaan regresi $y = 0,3013x + 1 \times 10^{11}$ dengan koefisien determinasi 0,8529 seperti pada Gambar 3-7 (kanan).

Dibandingkan dengan hasil pengujian dari pengamatan tahun 2016, nilai koefisien determinasi yang diperoleh dari gabungan data ini masih lebih rendah. Meskipun demikian, hasil dari penggabungan data masih lebih meyakinkan karena diperoleh dari pengujian menggunakan data yang relatif lebih banyak. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa frekuensi kritis (foF2) dan nilai kerapatan elektron

maksimum (NmF2) dari hasil rekonstruksi tomografi menggunakan data pengamatan tahun 2016 dan 2017 masih kurang sesuai dengan pengamatan ionosonda Sumedang pada posisi 6,91° LS karena bias frekuensi yang masih lebih besar dari 1 MHz walaupun telah diperoleh koefisien korelasi yang cukup tinggi antara parameter yang dibandingkan.

Adanya perbedaan antara hasil rekonstruksi tomografi dengan pengamatan ionosonda dapat disebabkan karena rekonstruksi tomografi memperoleh nilai kerapatan elektron yang dikonversi ke nilai frekuensi kritis foF2 dengan resolusi ketinggian 50 km sedangkan pengamatan ionosonde memberikan nilai dari titik pengukuran langsung. Perbandingan dengan pengukuran ionosonde ini memang memiliki keterbatasan sehingga masih perlu diperbaiki pada penelitian selanjutnya, namun hal ini dilakukan untuk

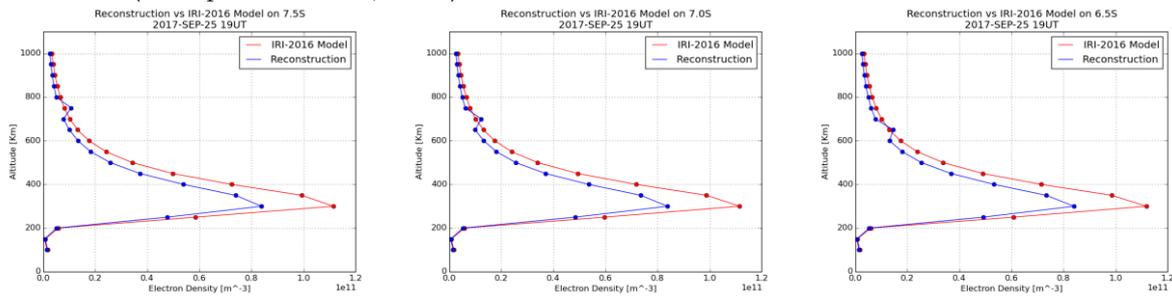
memudahkan pengujian hasil rekonstruksi tomografi. Terlepas dari perbedaan tersebut, dari rekonstruksi tomografi ini dapat dihasilkan nilai NmF2 maupun foF2 dengan koefisien korelasi yang cukup tinggi dengan pengukuran ionosonde.

Berikutnya dilakukan perbandingan kerapatan elektron NmF2 hasil rekonstruksi tomografi dengan keluaran model IRI-2016 pada waktu dan posisi lintang yang berbeda, yaitu dengan membandingkan nilai kerapatan elektron saat malam, menjelang siang dan siang hari untuk tiga posisi lintang yang berbeda yaitu pada posisi 7,5° LS, 7,0° LS dan 6,0° LS. Hasil rekonstruksi yang dibandingkan adalah dari pengamatan

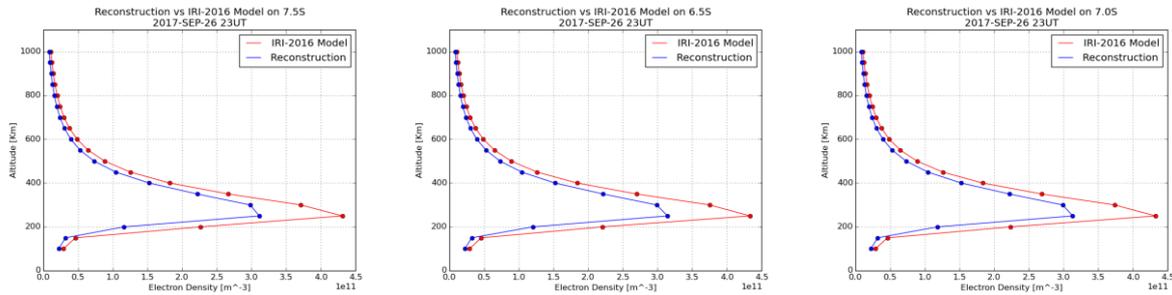
25 September 2017, 26 September 2017, dan 27 September 2017 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3-8.

Diperoleh bahwa nilai kerapatan elektron yang lemah di malam hari, meningkat menjelang siang dan mencapai maksimum pada saat siang hari, dengan nilai kerapatan elektron maksimum NmF2 masing-masing adalah $8,38 \times 10^{11}$ elektron/m³, $3,13 \times 10^{11}$ elektron/m³, dan $8,83 \times 10^{11}$ elektron/m³ pada saat malam, menjelang siang dan siang hari. Nilai ini masih lebih rendah dari luaran model IRI2016. Perubahan nilai kerapatan elektron untuk ketiga posisi lintang yang berbeda terlihat tidak signifikan karena perbedaan lintang hanya 0,5°.

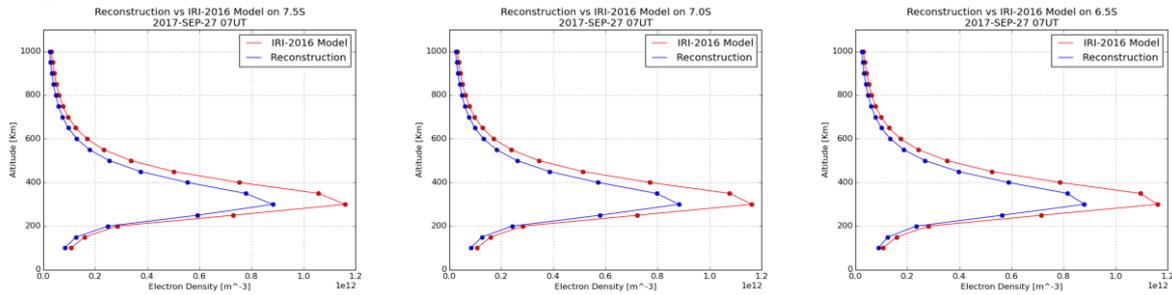
Malam hari (25 September 2017, 19UT)



Menjelang siang (26 September 2017, 23UT)



Siang hari (27 September 2017, 07UT)



Gambar 3-8: Perbandingan hasil rekonstruksi tomografi dengan keluaran model IRI-2016 pada posisi lintang 7,5° LS, 7,0° LS, dan 6,0° LS saat malam hari (25 September 2017), menjelang siang (26 September 2017), dan siang hari (27 September 2017).

4 KESIMPULAN

Rekonstruksi tomografi ionosfer menggunakan Teknik Rekonstruksi Aljabar (*Algebraic Reconstruction Technique/ART*) dengan data dari pengamatan GRBR berbasis kampanye telah dilakukan pada posisi geografis sepanjang 108 bujur Timur di Pulau Jawa Indonesia, dan hasil rekonstruksi tomografi ionosfer telah disampaikan. Metoda yang digunakan dapat diandalkan untuk memonitor ionosfer namun resolusi ketinggian 50 km yang digunakan masih perlu ditingkatkan dalam penelitian selanjutnya untuk mendapatkan tomografi yang lebih baik.

Perbandingan nilai foF2 antara tomografi dengan pengamatan ionosonda menunjukkan korelasi yang cukup baik dengan koefisien korelasi 0,8665 dengan bias frekuensi 1,6903 MHz, sedangkan nilai kerapatan elektron maksimum NmF2 tomografi juga menunjukkan korelasi yang cukup baik dengan pengamatan ionosonda dengan koefisien korelasi 0,8529. Namun demikian, hasil rekonstruksi tomografi ini masih kurang sesuai dengan pengamatan ionosonda stasiun terdekat karena bias frekuensi yang diperoleh masih lebih besar dari 1 MHz.

Nilai kerapatan elektron hasil rekonstruksi tomografi dengan nilai $8,38 \times 10^{10}$ elektron/m³ pada malam hari, $3,13 \times 10^{11}$ elektron/m³ menjelang siang hari, dan $8,83 \times 10^{11}$ elektron/m³ pada siang hari menunjukkan peningkatan dari malam, menjelang siang hingga ke siang hari, namun hasil rekonstruksi tomografi ini masih lebih rendah dari luaran model IRI-2016.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di Stasiun-stasiun Pengamat GRBR di Kototabang, Pontianak, Tomohon, Biak, Sumedang, Yogyakarta dan Watukosek atas bantuan dan dukungan dalam pengoperasian GRBR. Terima kasih juga disampaikan kepada SMK I Anjatan Indramayu dan

Stasiun Pameungpeuk Garut yang telah mengizinkan kami mengoperasikan peralatan GRBR dalam rangka kampanye pengamatan GRBR tahun 2016 dan 2017. Terima kasih juga disampaikan kepada Dr. Smitha V. Thampi, Physical Research Laboratory, India atas dukungan yang diberikan. Kegiatan ini merupakan bagian dari program penelitian Pusat Sains Antariksa dan dibiayai oleh DIPA Pusat Sains Antariksa LAPAN.

DAFTAR RUJUKAN

- Austen, J. R., S. J. Franke, C. H. Liu dan K. C. Yeh, 1986. *Application of Computerized Tomography Techniques to Ionospheric Research*, in Tauriannen A., (Editor), *Proceeding of URSI and COSPAR Int. Beacon Satellite Symposium, Part. 1*, University of Oufu, Finlandia, pp. 23-35.
- Austen, J. R., S. J. Franke, C. H. Liu, dan K. C. Yeh, 1988. *Ionospheric Imaging using Computerized Tomography*, *Radio Science* 23, pp. 299-307.
- Batubara, M., T. Manik, M. Lathif, dan P. Sitompul, 2016. *Iterative Algorithm for Construction of Electron Density Mapping based on Beacon Satellite Observation Data*, *Proceedings of ISAST IV*, 2016, Lombok, September, 20-22, 2016.
- Jin, S. G. dan J. U. Park, 2007. *GPS Ionospheric Tomography: A Comparison With the IRI-2001 Model over South Korea Shuanggen*, *Earth Planets Space*, 59, 287-292.
- Leitinger, R., G. Schmidt, dan A. Tauriainen, 1975. *An Evaluation Method Combining the Differential Doppler Measurement from Two Stations that Enables the Calculation of Electron Content of the Ionosphere*, *J. Geophys.*, 40, 201-213.
- Manik, T., dan M. Lathif, 2011. *Jaringan GRBR Indonesia*, *Proc. SNSAA 2011*, Serpong, 22-23 November 2011.
- Manik, T. dan P. Sitompul, 2012. *Hasil Awal TEC Ionosfer Indonesia berbasis Penerima Radio Beacon*, *Prosiding*

- Siptekgan XVI-2012, 03-22, Serpong, 4 Juli 2012, pp. 662-667.
- Manik, T., M. Lathif, P. Sitompul, M. Batubara, R. Suryana, S. Anggarani, dan A. Z. Utama, 2016. *Rekonstruksi Tomografi Ionosfer berbasis TEC-beacon dari Jaringan GRBR Indonesia*, Laporan Akhir Program Penelitian Pusat Sains Antariksa LAPAN 2016, Bandung.
- Manik, T., M. Batubara, M. Lathif, dan M. Yamamoto, 2017. *Rekonstruksi Tomografi Kerapatan Ionosfer Berbasis Pengamatan GRBR di Indonesia*, Seminar Nasional Sains Antariksa (SNSA) 2017, Disubmit ke Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa 2017, 22 November 2017.
- Raymund, T. D., S. J. Franke, dan K. C. Yeh, 1994. *Ionospheric Tomography: Its Limitation and Reconstruction Methods*, J. Atm. and Terr. Phys. 56, pp. 637-657.
- Sitompul, P., T. Manik, dan M. Batubara, 2015. *Determination of TEC above Yogyakarta and Watukosek using Beacon Receiver*, Proc. of ISSH LIPI 2015, Jakarta, 29-30 September 2015, pp. 67-76.
- Thampi, S. V., S. Ravindran, C. V. Devasia, P. Sreelatha, T. K. Pant, R. Sridharan, V. Ratnam, A. D. Sharma, C. R. Reddi, J. Jose, dan J. H. Sastry, 2007. *Coherent Radio Experiment (CRABEX) for Tomographic Imaging of the Equatorial Ionosphere in the Indian Longitudes: Preliminary Results*, Adv. Space Res., 40, 436-441.
- Thampi, S. V. dan M. Yamamoto, 2010. *First Result from the Ionospheric Tomography Experiment using Beacon TEC Data Obtained by Means of a Network along a Longitude of 136°E over JAPAN*, Earth Planets Space, Vol. 62 (No. 3), pp. 359-364.
- Tsai, L. C, C. H. Liu, W. H. Tsai, dan C. T. Liu, 2002. *Tomographic Imaging of the Ionosphere using the GPS/MET and NNSS Data*, J. AST Phys. 64, pp. 2003-20011.
- Tucker, A. J., 1998. *Computerized Ionospheric Tomography*, John Hopkins Apl. Technical Digest, Vol. 19, Number 1, pp. 66-71.
- Vierinen, J., J. Norberg, M. S. Lehtinen, O. Amm, L. Roininen, A. Vaananen, P. J. Erickson, dan D. McKay-Bukowski, 2014. *Beacon Satellite Receiver for Ionospheric Tomography*, Radio Science doi. 10.1002/2014RS005434.
- Yamamoto, M., 2008. *Digital Beacon Receiver for Ionospheric TEC Measurement*, Earth Planets Space, 60 e21-e24.