

HISTERESIS IONOSFER SELAMA SIKLUS MATAHARI KE 23 DARI GLOBAL IONOSPHERIC MAP [IONOSPHERIC HYSTERESIS DURING SOLAR CYCLE 23 FROM GLOBAL IONOSPHERIC MAP]

Buldan Muslim
Peneliti Pusat Sains Antariksa, Lapan
e-mail: mbuldan@gmail.com

ABSTRACT

The models used for long-term ionosphere prediction have not considered ionospheric hysteresis. Some researchers have provided contradictory conclusions of the ionospheric hysteresis effect on the ionospheric modeling. Ionospheric total electron content (TEC) data from the global ionosphere maps (GIM) have been used to study the spatial and diurnal variability of the ionospheric hysteresis during solar cycle 23. The magnitude of the ionospheric hysteresis is estimated as the difference between the average TEC during decline and rising phase of the solar cycle. The ionospheric hysteresis has similar spatial variability of ionospheric equatorial ionization anomaly, where the greatest value occurs in the equatorial ionization anomaly crest region, and there are latitudinal and longitudinal asymmetries. The hysteresis of equatorial and low latitude ionosphere have a systematic pattern of events both spatially and temporally making it possible to incorporate the hysteresis effects in the long-term model of the ionosphere. The hysteresis effect in the low latitude ionosphere may cause errors of a linear model of the ionosphere up to 49 %. Therefore, in the low latitude ionosphere modeling, the ionospheric hysteresis should be considered by using different formulations for declining and rising phase of the solar cycle.

Keywords: *Ionosphere, Solar activity, Hysteresis*

ABSTRAK

Model-model yang digunakan untuk prediksi ionosfer jangka panjang belum mempertimbangkan efek histeresis ionosfer. Beberapa hasil penelitian pengaruh histeresis ionosfer pada pemodelan ionosfer jangka panjang memberikan kesimpulan yang kontradiktif. Data *Total Electron Content* (TEC) yang diperoleh dari *Global Ionosphere Maps* (GIM) telah digunakan untuk penelitian variabilitas spasial dan diurnal histeresis ionosfer selama siklus matahari 23. Besar histeresis diestimasi sebagai perbedaan antara rata-rata TEC selama fase turun dengan rata-rata TEC selama fase naik dari siklus matahari. Histeresis ionosfer memiliki variabilitas spasial yang mirip dengan variabilitas anomali ionisasi ionosfer ekuator, dimana nilai terbesarnya terjadi di daerah puncak anomali ionisasi ionosfer ekuator, dan ada ketidaksimetrisan arah lintang dan bujur. Histeresis ionosfer ekuator dan lintang rendah memiliki pola kejadian yang sistematis baik secara spasial maupun temporal sehingga memungkinkan untuk memasukkan efek histeresis dalam model ionosfer jangka panjang. Histeresis ionosfer di daerah lintang rendah bisa menyebabkan kesalahan dari model linier ionosfer sampai 49 %. Oleh karena itu dalam pemodelan ionosfer lintang rendah hendaknya mempertimbangkan efek histeresis dengan menggunakan formulasi yang berbeda untuk fase naik dan fase turun dari siklus matahari.

Kata kunci: *Ionosfer, Aktivitas matahari, Histeresis*

1 PENDAHULUAN

Histeresis di ionosfer pertama kali diungkap oleh Rao dan Rao (1969) yang mendapatkan bahwa pada bilangan *sunspot* yang sama, frekuensi kritis lapisan F2 ionosfer siang hari bisa berbeda nilainya selama fase naik dan turun dalam satu siklus matahari. Tetapi sampai sekarang histeresis ionosfer masih merupakan masalah yang belum terselesaikan (LiBo, 2011).

Masalah histeresis ionosfer yang belum dapat diselesaikan antara lain karena masih ada beberapa hasil penelitian yang kontradiktif terkait dengan pemodelan hubungan ionosfer dengan aktivitas matahari. Kontradiksi hasil penelitian histeresis ionosfer terutama dalam hal variabilitasnya terhadap lintang geomagnet dan dipertimbangkannya atau tidaknya efek histeresis tersebut dalam pemodelan ionosfer.

Berdasarkan data foF2 siang hari, Rao dan Rao (1969) menyatakan bahwa besarnya histeresis ionosfer pada siklus matahari 19 (1954-1964) bervariasi terhadap lintang geomagnetik dengan nilai maksimum di lintang tengah yaitu di sekitar lintang 25° Lintang Magnetik (LM), dan nilai minimumnya terjadi di daerah ekuator dan lintang tinggi. Kane (1992) mendapatkan bahwa histeresis ionosfer adalah kecil di lintang rendah dan lintang tinggi. Menggunakan data yang lebih banyak dan panjang yaitu dari data foF2 hasil pengamatan dari 37 stasiun ionosonde di seluruh dunia pada siklus 20 (1964-1976), 21 (1976-1986) dan 22 (1986-1996) untuk waktu tengah hari (pukul 12:00 LT), Adler dan Elias (2008) mendapatkan hal-hal baru yang belum diungkap sebelumnya oleh Rao dan Rao (1969) dan Kane (1992) yaitu:

- a. Adanya histeresis negatif pada daerah di atas 50° LM. Histeresis bernilai positif antara 45° Lintang Magnetik Selatan (LMS) sampai 45° Lintang Magnetik Utara (LMU),
- b. Besar histeresis sebanding besar atau puncak siklus matahari,
- c. Pada lintang sekitar 25° -30° LMU dan LMS dan di lintang tinggi besar histeresis mencapai 2 MHz untuk siklus matahari dengan tingkat aktivitas yang tinggi, yang signifikan dibandingkan dengan nilai foF2 yaitu sekitar 20% dari foF2.

Tetapi variabilitas lintang dari histeresis ionosfer yang diungkapkan Adler dan Elias (2008) tersebut tidak mewakili variabilitas lintang untuk pagi, malam dan sore hari karena hanya didasarkan pada data foF2 tengah hari atau pukul 12:00 LT.

Kontradiksi hasil penelitian efek histeresis ionosfer pada pemodelan ionosfer juga terungkap dari hasil penelitian Adler dan Elias (2008) yang menyatakan bahwa efek histeresis cukup signifikan pada prediksi foF2 di lintang tengah yaitu sekitar 2 MHz dan hasil Buresova dan Lastovicka (2000) yang menyatakan bahwa efek histeresis tetap dipertanyakan dalam pemodelan ionosfer karena hanya sekitar 0,5 MHz di lintang tengah Eropa yang masuk dalam ketidakpastian pengamatan ionosonde sekitar 0,3 MHz. Triskova dan Chum (1996) belum menemukan cara untuk memasukkan efek histeresis ionosfer dalam model prediksi ionosfer yang sudah ada. Ozguc et al. (2008) menyimpulkan bahwa memasukkan efek histeresis ionosfer pada model ionosfer jangka panjang tidak cocok karena besar histeresis ionosfer tidak sistematis terhadap indeks aktivitas matahari. Kesimpulan Ozguc et al. (2008) ini juga berbeda dengan hasil Alder dan Elias (2008) yang mendapatkan bahwa besar histeresis ionosfer tergantung pada besar siklus matahari.

Dalam kaitannya dengan aktivitas geomagnet, para peneliti sebelumnya menerangkan bahwa adanya variabilitas lintang dan musiman histeresis ionosfer menunjukkan adanya kontrol geomagnet dan pengaruh aktivitas geomagnet (Apostolov dan Alberca, 1995; Mikhailov dan Mikhailov (1995).

Pada makalah ini penulis menjelaskan hasil penelitian yang bertujuan untuk mengklarifikasi kontradiksi hasil-hasil penelitian histeresis ionosfer dalam hal

variabilitasnya terhadap lintang geomagnet. Histeresis ionosfer dipelajari dari data TEC ionosfer di atas permukaan bumi mulai pukul 00:00 sampai 22:00, sehingga dapat menjelaskan lebih lengkap variabilitas histeresis ionosfer yang tidak hanya terbatas pada tengah hari atau pada pukul 12:00 LT, tetapi mencakup seluruh waktu dalam satu hari meliputi malam, pagi, siang, dan sore hari. Dengan demikian akan dapat diketahui di mana dan kapan efek histeresis dapat dipertimbangkan atau tidak dipertimbangkan dalam pemodelan ionosfer. Hasil penelitian ini juga sebagai klarifikasi pengabaian efek histeresis pada pemodelan linier ionosfer sebagai respon terhadap aktivitas matahari yang masih kontradiktif.

2 DATA DAN METODOLOGI

Untuk mendapatkan karakteristik spasial dan temporal histeresis ionosfer diperlukan data ionosfer yang meliputi seluruh permukaan bumi dan seluruh waktu dalam sehari dari malam, pagi, siang dan sore. Data *Total Electron Content* (TEC) yang diturunkan dari data GPS tersedia dalam bentuk model spasial harian yang dikenal dengan *Global Ionosphere Maps* (GIM) yang cocok digunakan untuk keperluan tersebut karena mencakup seluruh daerah ionosfer dari $-87,5^\circ$ sampai $87,5^\circ$ setiap $2,5^\circ$, dan mulai bujur -180° sampai 180° setiap 5° . Data TEC GIM dapat diunduh dari ftp.unibe.ch. TEC GIM yang digunakan adalah data GIM bulan April mengingat TEC ionosfer di lintang tengah mencapai maksimum pada bulan-bulan ekuinoks yaitu Maret-April dan September-Oktober, dan bulan-bulan musim semi yaitu Maret, April, Mei (Buresova dan Lastovicka, 2000). Data GIM bulan April mulai 1998 sampai 2013 ada dua bentuk. Yang pertama dalam bentuk peta numerik TEC dan yang kedua dalam bentuk koefisien model. Pada penelitian ini telah digunakan data TEC dalam bentuk peta numerik.

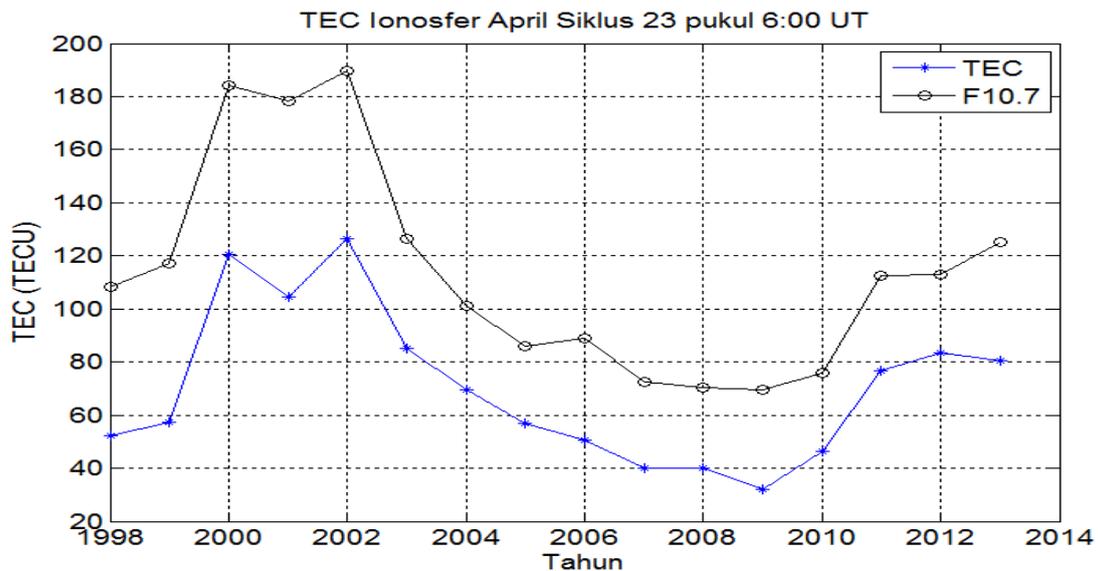
Untuk mengetahui efek histeresis pada model linier ionosfer terhadap aktivitas matahari dan mendapatkan variabilitas lintang dan bujur serta temporal histeresis ionosfer telah digunakan metodologi sebagai berikut:

2.1 Estimasi Efek Histeresis pada Pemodelan Linier antara TEC dan F10.7

Data rata-rata TEC bulanan pada April dari tahun 1998 - 2013 digunakan untuk pemodelan linier hubungan TEC dengan F10.7. Plot data TEC vs F10.7 dilengkapi dengan label tahun pada data TEC akan menunjukkan bentuk histeresis ionosfer dengan jelas. Simpangan model terhadap data pengamatan dalam persen dihitung dari perbedaan model terhadap data dibagi dengan data TEC. Dari besar simpangan model linier akan diketahui sejauh mana efek histeresis pada pemodelan ionosfer tersebut. Nilai simpangan 20 % sudah dianggap signifikan, maka nilai simpangan di atas 20% berarti pengabaian efek histeresis sangat signifikan pada akurasi model ionosfer.

2.2 Pemilihan Waktu dalam Siklus Matahari 23 yang Mempunyai nilai F10.7 Hampir Sama

Pemilihan tahun saat fase naik dan turun dengan nilai F10.7 hampir sama dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut. Data TEC dikumpulkan untuk bulan April dalam bentuk matrik 3 dimensi yaitu bujur, lintang dan tanggal dalam satu bulan. Dengan demikian rata-rata secara mudah dapat diperoleh menggunakan fungsi mean.m dalam matlab. Menggunakan fungsi tersebut rata-rata bulanan TEC pada lintang dan bujur tertentu bulan April dari tahun 1998 sampai 2013 dapat diperoleh. Dengan mengplot rata-rata TEC bulan April dari tahun 1998 sampai 2013 seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1 dapat ditentukan pemilihan tahun-tahun di mana nilai F10.7 saat fase naik hampir sama dengan saat fase turun dari siklus aktivitas matahari.



Gambar 2-1: Rata-rata TEC ionosfer bulan April pukul 06:00 UT di (5° LS, 105° BT) dan rata-rata F10.7 pada bulan yang sama mulai tahun 1998 sampai 2013

Dari Gambar 2-1 diketahui bahwa selama siklus matahari 23 nilai rata-rata TEC bulan April saat fase turun tahun 2003-2004 lebih besar dari nilai rata-rata TEC saat fase naik tahun 1998 dan 1999, padahal nilai F10.7 pada bulan yang sama selama fase turun dan naik dalam siklus matahari tersebut hampir sama nilainya. Berdasarkan hal tersebut besar histeresis ionosfer bulan April selama siklus 23 diestimasi dari perbedaan rata-rata TEC bulan April saat fase siklus matahari turun tahun 2003 dan 2004 dan nilai rata-rata TEC pada tingkat aktivitas yang sama tetapi saat siklus matahari sedang naik yaitu tahun 1998 dan 1999.

2.3 Penentuan Variabilitas Lintang dan Diurnal Histeresis Ionosfer

Besar histeresis ionosfer dihitung dari TEC GIM bulan April untuk semua titik ionosfer dari lintang -85° sampai 85° setiap 5° pada meridian dari -180° sampai 180° setiap 15°, pada pukul 00:00 - 22:00 UT setiap 2 jam. Dari langkah ini dapat ditinjau kontur histeresis ionosfer sebagai fungsi lintang dan waktu dalam sehari pada meridian tertentu sehingga dapat diketahui pola variasi lintang geomagnet dan diurnal histeresis ionosfer, di mana histeresis bernilai positif, negatif, maksimum dan minimum pada waktu tertentu. Dengan membandingkan variasi lintang histeresis ionosfer pada waktu tertentu dengan nilai rata-rata TEC bulan April, perbandingan histeresis ionosfer dengan anomali ionisasi ionosfer ekuator dapat diketahui.

2.4 Variabilitas Longitudinal Histeresis Ionosfer

Untuk mengetahui kontrol geomagnet pada histeresis ionosfer dibuatlah kontur histeresis ionosfer sebagai fungsi lintang geomagnet pada setiap garis meridian dengan selang setiap 15°, sehingga dapat dianalisis bagaimana kontrol geomagnet pada histeresis di beberapa sektor yang berbeda.

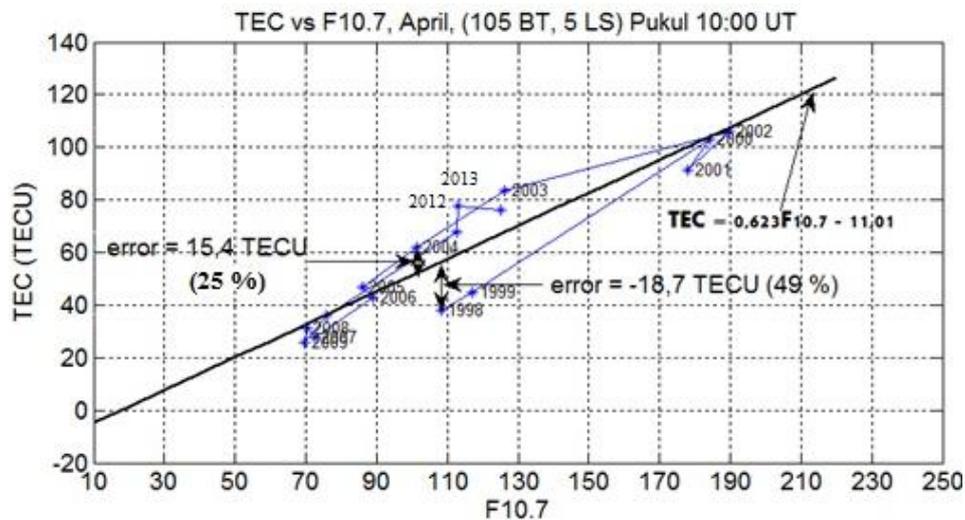
2.5 Perbedaan Histeresis Positif dan Negatif Sebagai Fungsi Lintang, Bujur dan Waktu

Histeresis ionosfer dapat bernilai positif atau negatif. Untuk melihat perbedaan histeresis positif dan negatif pada lokasi dan waktu yang berbeda dibuatlah kontur histeresis positif dan negatif di mana histeresis bernilai kurang dari 0 dikelompokkan dalam histeresis negatif bernilai -1 dan histeresis yang bernilai lebih dari 0 dikelompokkan dalam histeresis positif dengan nilai +1.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Efek Histeresis pada Model Linier Respon Ionosfer Terhadap Aktivitas Matahari

Variasi TEC terhadap F10.7 pada bulan April pukul 10:00 UT sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3-1 menunjukkan dengan jelas perbedaan nilai TEC saat siklus matahari sedang naik selama tahun 1998 - 2001 dengan nilai TEC saat siklus matahari sedang turun selama tahun 2002-2007. Rata-rata TEC bulan April tahun 2003 dan 2004 adalah 72,7 TECU dengan rata-rata F10.7 pada waktu tersebut adalah 113,8. Untuk tahun 1998 dan 1999 rata-rata TEC bulan April sebesar 41,4 TECU dengan nilai rata-rata F10.7 sebesar 112,8. Sesuai dengan definisi besar histeresis pada makalah ini adalah perbedaan nilai rata-rata TEC bulan April saat aktivitas matahari turun tahun 2003 dan 2004 dengan nilai rata-rata TEC bulan April saat aktivitas matahari naik tahun 1998-1999 besarnya adalah $72,7 \text{ TECU} - 41,4 \text{ TECU} = 31,3 \text{ TECU}$.



Gambar 3-1: Histeresis TEC ionosfer bulan April pukul 10:00 UT dari tahun 1998-2007 pada 105° BT dan 5° LS

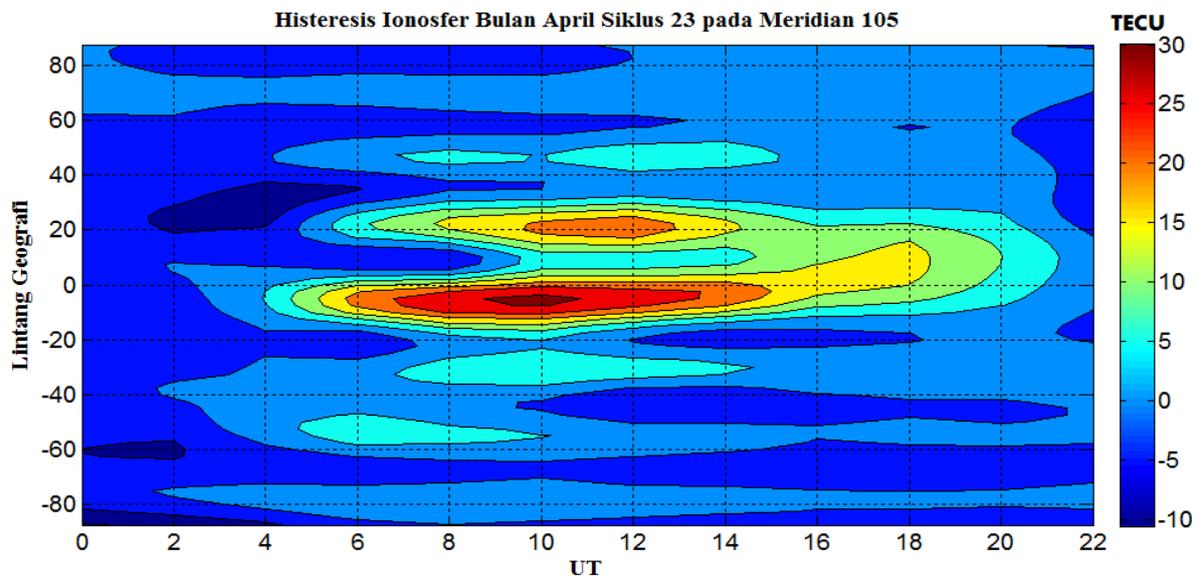
Dari Gambar 3-1 diketahui bahwa histeresis ionosfer memiliki nilai yang berbeda untuk siklus yang berbeda sehingga setelah siklus 23 berakhir di tahun 2009, mulai siklus ke 24 dari tahun 2009 sampai 2013 nilai TEC tidak kembali ke nilai TEC tahun 1998 dan 1999. Padahal nilai rata-rata bulanan F10.7 saat tersebut tidak jauh berbeda dan sama-sama fase naik. Hal ini menunjukkan bahwa histeresis dari siklus 23 dan 24 berbeda nilainya karena perbedaan nilai maksimum dari siklus ke 24 yang lebih rendah dari nilai maksimum siklus matahari ke 23. Berapa besar histeresis siklus ke 24 baru akan dapat diketahui setelah siklus fase turun siklus 24 dicapai yang kemungkinan beberapa tahun ke depan. Tetapi hal yang perlu diperhatikan disini adalah lebih tingginya nilai TEC fase naik siklus 24 dibandingkan dengan nilai TEC saat fase naik siklus 23 dari aktivitas matahari adalah besar siklus matahari 24 yang lebih kecil dibandingkan dengan besar siklus matahari 23. Hasil ini membenarkan hasil penelitian Adler dan Elias (2008) yang mendapatkan bahwa besar histeresis sebanding dengan besar siklus matahari.

Pada Gambar 3-1 juga diperlihatkan plot garis lurus untuk estimasi TEC dari F10.7 bulan April dengan persamaan $TEC = 0,623F10.7 - 11,01$. Dengan persamaan linier tersebut kesalahan model linier pada tahun 1998 adalah -18,7 atau 49% dan kesalahan model linier pada tahun 2004 sebesar 15,4 atau 25%. Dengan demikian asumsi respon linier dan pengabaian histeresis menyebabkan kesalahan model linier TEC versus F10.7 sebesar 49 % saat aktivitas matahari naik pada tahun 1998 dan 25%

saat aktivitas matahari turun pada tahun 2004. Kesalahan model linier sebesar 25% dan 49% tersebut sangat signifikan sehingga dapat dikatakan bahwa histeresis ionosfer tidak dapat diabaikan dalam pemodelan ionosfer lintang rendah, dan asumsi linier dan respon yang sama antara fase naik dan turun dari siklus matahari tidak sesuai dengan kondisi yang sebenarnya yang tidak linier dan respon yang berbeda antara fase naik dan turun dari siklus aktivitas matahari. Persamaan liner TEC dengan F10.7 juga memotong di -11,01 TECU pada $F10,7 = 0$. Ini juga tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya di ionosfer yang tidak pernah terjadi nilai negatif.

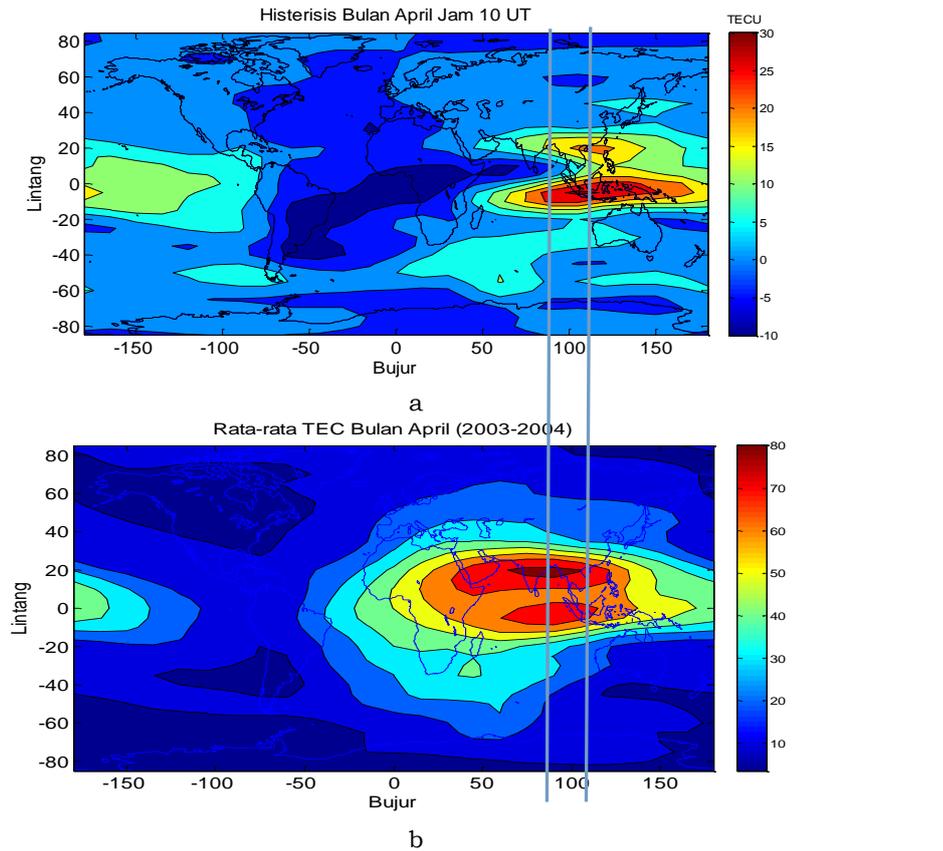
3.2 Variabilitas Lintang dan Diurnal Histeresis Ionosfer

Gambar 3-2 memperlihatkan variabilitas lintang dan diurnal histeresis ionosfer pada meridian 105° BT. Histeresis ionosfer mencapai maksimum di sekitar lintang 5° LS pada pukul 10:00 UT atau pukul 17:00 LT. Tetapi histeresis ionosfer di belahan bumi utara mencapai maksimum di sekitar 20° LU pada pukul 12:00 UT yang ekuivalen dengan pukul 19:00 UT. Perbedaan nilai maksimum yang tidak terjadi pada waktu yang sama antara belahan bumi utara dan selatan tersebut menunjukkan bahwa histeresis ionosfer tidak simetris dalam arah lintang dan tidak terjadi dalam waktu yang sama.



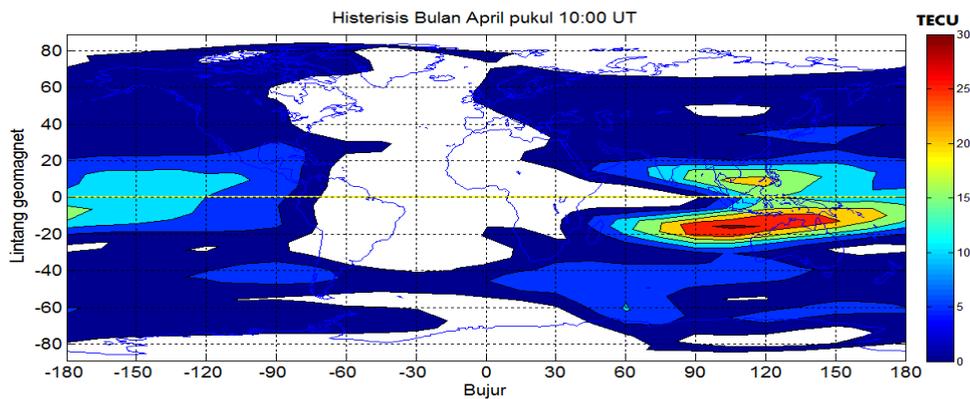
Gambar 3-2: Variasi lintang dan diurnal histeresis dari data TEC bulan April pada meridian 105° BT

Variasi diurnal histeresis ionosfer yang tidak simetris antara belahan utara dan selatan ekuator ini lebih jelas terlihat dengan membuat kontur besar histeresis bulan April pukul 10:00 UT seperti ditunjukkan pada Gambar 3-3a. Adapun variabilitas spasial anomali ionisasi ionosfer di ekuator dan lintang rendah ditunjukkan pada Gambar 3-3b. Dari Gambar 3-3a dan 3-3b dapat diketahui bahwa histeresis ionosfer di daerah lintang rendah memiliki kesamaan dan perbedaan dengan variasi anomali ionisasi ionosfer di daerah ekuator dan lintang rendah. Kesamaan kedua hal tersebut pada variabilitas lintang, dan perbedaannya terjadi pada nilai maksimumnya yang terjadi pada bujur yang berbeda di mana histeresis ionosfer mencapai maksimum tidak tepat terjadi di daerah anomali ionisasi ionosfer tetapi terjadi di sebelah timurnya sekitar 25° arah ke timur atau kejadian histeresis mencapai nilai maksimumnya 1 jam 40 menit lebih cepat dibandingkan dengan puncak anomali ionisasi ionosfer di daerah lintang rendah.



Gambar 3-3: Variabilitas spasial histeresis ionosfer (a) dan anomali ionisasi ionosfer daerah ekuator dan lintang rendah (b)

Untuk dapat dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya yaitu hasil Adler dan Elias (2008), variabilitas lintang geomagnet dari histeresis TEC ionosfer ditunjukkan pada Gambar 3-4. Dari Gambar 3-4 dapat diketahui secara lebih rinci variabilitas lintang geomagnet dari histeresis ionosfer pada pukul 10:00 UT di daerah mana yang mengalami histeresis positif dan negatif, kapan histeresis mencapai maksimum dan minimum.



Gambar 3-4: Variasi lintang geomagnet dari histeresis pada meridian -180 sampai 180 pukul 10:00 UT

Dari Gambar 3-4 tersebut diketahui bahwa variabilitas lintang geomagnet dari histeresis ionosfer pada penelitian ini berbeda dengan hasil Adler dan Elias (2008) yang menyebutkan bahwa histeresis mencapai maksimum di lintang +/- 25° -30° LM dan hasil sebelumnya oleh Rao dan Rao (1969) yang juga menyatakan nilai maksimum histeresis terjadi di lintang tengah dan hasil Kane (1992) yang menyatakan bahwa histeresis ionosfer di lintang rendah adalah kecil. Ternyata histeresis ionosfer mencapai

maksimum di daerah anomali ionisasi ionosfer tepatnya di puncak anomali ionisasi atau *crest region* baik sebelah selatan maupun utara ekuator geomagnet. Di sebelah utara ekuator geomagnet puncak histeresis terjadi pada lintang $+10^\circ$ LM dan di sebelah selatan ekuator geomagnet nilai maksimum histeresis terjadi pada lintang -15° LM. Perbedaan hasil penelitian ini dengan hasil Adler dan Elias (2008) karena perbedaan waktu pengambilan data histeresis di mana mereka menganalisis histeresis pada pukul 12:00 LT. Pada Gambar 3-6 pukul 10:00 UT di meridian 105° maka pada tempat tersebut ekuivalen dengan waktu pukul 17:00 LT. Maka pukul 12:00 LT terjadi pada meridian 30° di mana variabilitas lintang geomagnet dari histeresis mencapai maksimum di lintang tengah sekitar -45° LM.

Dari Gambar 3-4 diketahui juga bahwa nilai negatif histeresis di ekuator geomagnet terjadi di bujur antara -70° sampai $+90^\circ$ atau pukul 5:00 - 16:00 LT, dengan bervariasi terhadap lintang di mana semakin ke arah lintang tinggi daerah histeresis negatif semakin menyempit. Tetapi di atas lintang 70° daerah histeresis negatif semakin meluas. Di daerah lintang tengah umumnya histeresis relatif kecil kurang dari 5 TECU atau mendekati 0 TECU di sebagian besar lintang tengah mulai 20° LM untuk bagian utara ekuator geomagnet dan kurang dari -30° LM untuk sebelah selatan ekuator geomagnet. Untuk daerah lintang rendah bagian selatan diketahui juga dari Gambar 3-6 bahwa histeresis lebih besar dari 15 TECU terjadi dalam daerah yang cukup luas mulai 75° BT sampai 175° BT yang ekuivalen dengan waktu mulai pukul 15:00 sampai 21:00 LT atau waktu dan daerah terjadinya anomali ionisasi.

Hasil analisis variabilitas lintang dan diurnal histeresis ionosfer ini mengoreksi hasil penelitian Adler dan Elias (2008) di mana histeresis positif secara dominan terjadi di lokasi terjadinya anomali ionisasi ionosfer ekuator yaitu di daerah lintang rendah, bukan terjadi di lintang tengah dan mengoreksi hasil Kane (1992) yang menyatakan bahwa histeresis ionosfer di lintang rendah adalah kecil padahal histeresis ionosfer di lintang rendah mencapai maksimum.

3.3 Ketidaksimetrisan Histeresis Ionosfer Arah Lintang Geomagnet dan Bujur Geografi

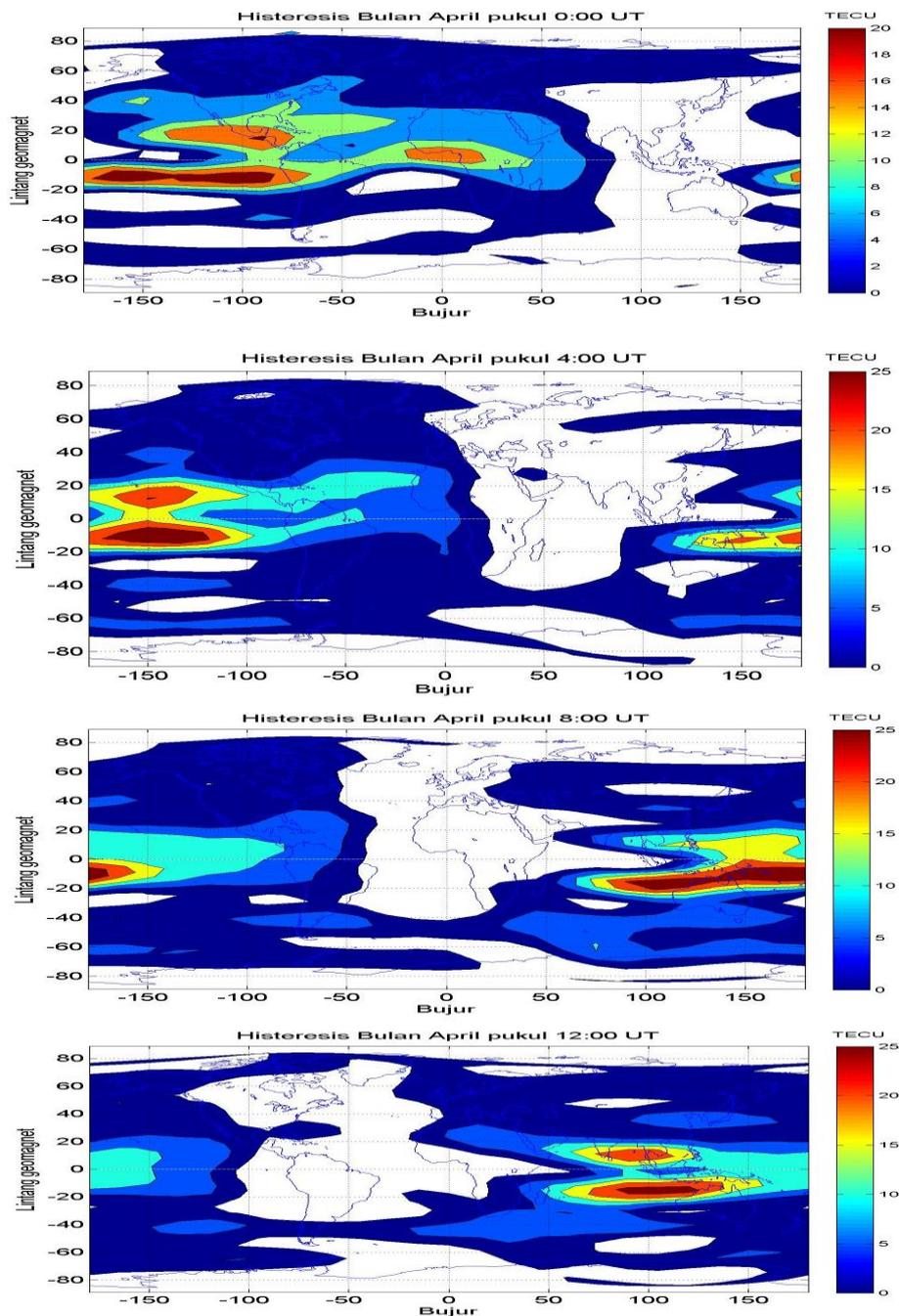
Untuk mengetahui ketidaksimetrisan histeresis ionosfer arah lintang geomagnet dan bujur geografi telah dibuat kontur besar histeresis sebagai fungsi lintang geomagnet dan bujur geografi pada pukul 00:00 sampai 22:00 UT seperti ditunjukkan pada Gambar 3-5 dan 3-6. Dari gambar-gambar tersebut diketahui bahwa histeresis di daerah lintang rendah mencapai nilai terbesar yang tidak simetris, di mana nilai maksimumnya terjadi di daerah puncak anomali ionisasi ionosfer ekuator tetapi tidak sama besarnya dan bervariasi terhadap bujur geografi. Umumnya di sebelah selatan ekuator geomagnet, histeresis ionosfer lebih besar dibandingkan dengan sebelah utara pada pukul 00:00 UT sampai pukul 12:00 UT seperti dilihat pada Gambar 3-5. Tetapi ketidaksimetrisan tersebut berkebalikan pada pukul antara 16:00 UT - 20:00 UT, di mana histeresis ionosfer di selatan ekuator geomagnet lebih kecil dibandingkan dengan sebelah utara sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3-6.

Dari Gambar 3-5 panel paling atas diketahui bahwa pada pukul 00:00 UT histeresis ionosfer mencapai maksimum di sebelah selatan ekuator geomagnet pada bujur sekitar -180° sampai -90° yang ekuivalen dengan pukul 12:00 LT sampai 18:00 LT. Adapun panel paling bawah dari gambar tersebut menunjukkan bahwa pada pukul 12:00 UT histeresis ionosfer terlihat jelas mencapai lebih dari 20 TECU di bujur antara 75° sampai 135° yang ekuivalen dengan pukul sekitar 17:00 LT sampai 21:00 LT.

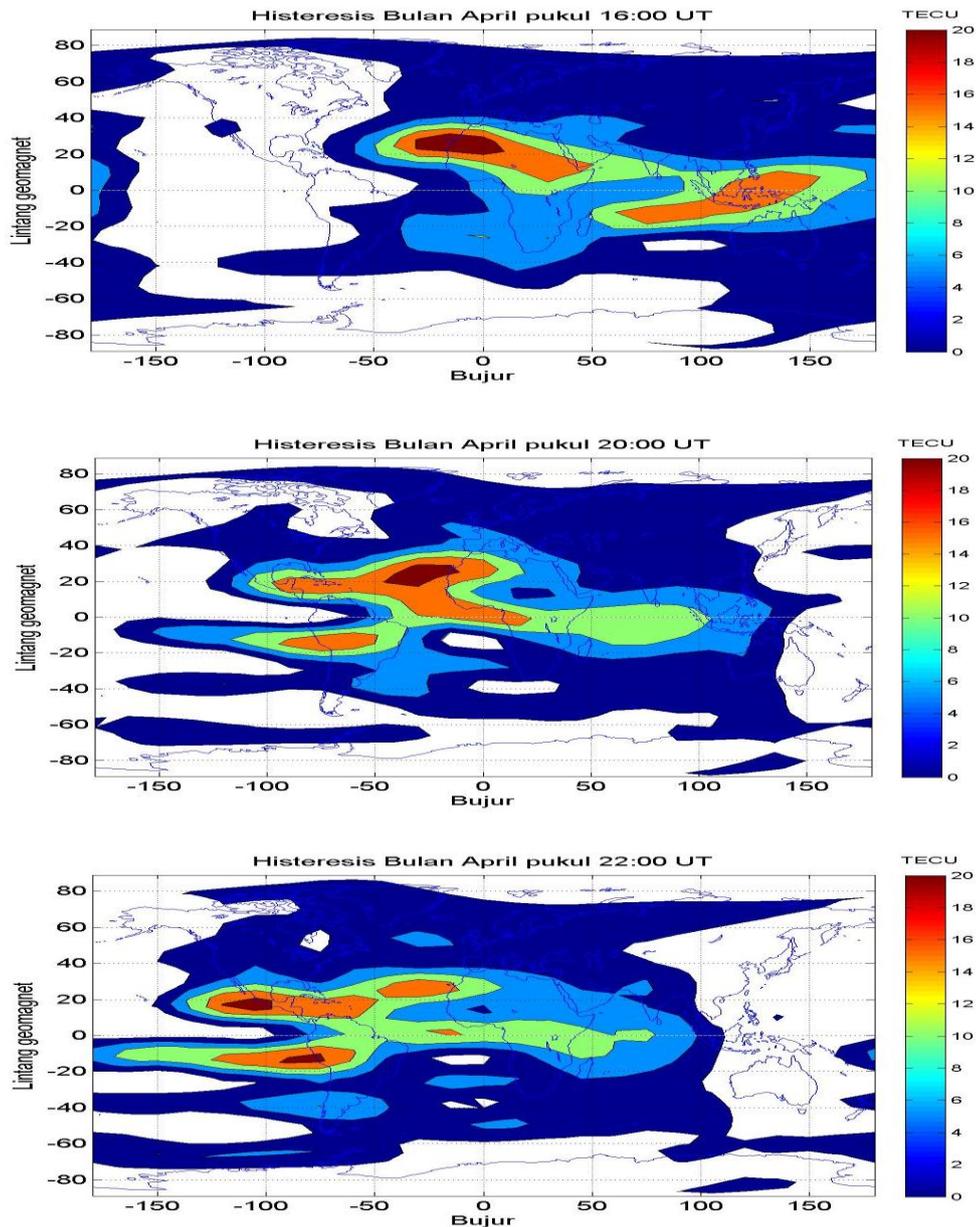
Di samping tidak simetris dalam arah lintang geomagnet, histeresis ionosfer juga tidak simetris dalam arah bujur sebagaimana dapat dilihat dengan jelas dari Gambar 3-6

panel paling atas pada pukul 16:00 UT, di mana nilai maksimum histeresis ionosfer di lintang rendah tidak terjadi pada bujur yang sama tetapi ada pergeseran dalam arah bujur. Di sebelah selatan ekuator geomagnet histeresis ionosfer menonjol di sekitar bujur 60° sampai 150° yang ekuivalen dengan pukul 20:00 LT sampai 02:00 LT. Adapun di sebelah utara geomagnet histeresis ionosfer mencapai nilai sekitar 20 TECU pada bujur -30° sampai bujur 10° , yang ekuivalen dengan pukul sekitar 14:00 LT sampai 17:00 LT.

Dengan demikian dapat diketahui bahwa adanya ketidaksimetrisan histeresis ionosfer dalam arah lintang geomagnet dan bujur geografi pada waktu yang berbeda dalam sehari dapat bersumber dari variasi medan magnet bumi terhadap lintang dan bujur geografi yang mana hal ini mendukung adanya kontrol geomagnet terhadap histeresis ionosfer.



Gambar 3-5: Variabilitas histeresis ionosfer lintang rendah pada bujur yang berbeda mulai pukul 00:00 -12:00 UT



Gambar 3-6: Variabilitas histeresis ionosfer lintang rendah pada bujur yang berbeda mulai pukul 16:00 - 22:00 UT

3.4 Variasi Spasial dan Temporal Histeresis Positif dan Negatif

Untuk mengklarifikasi dan melengkapi hasil Adler dan Elias (2008) yang menyatakan bahwa histeresis ionosfer bernilai negatif di atas $\pm 50^\circ$ LM, telah dilakukan pengelompokan histeresis positif sebesar 1 TECU untuk histeresis yang lebih besar dari 0 TECU dan sebesar - 1 TECU untuk kelompok histeresis yang kurang dari 0 TECU. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan variabilitas spasial dan temporal histeresis positif dan negatif.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3-7 secara umum histeresis ionosfer yang bernilai positif lebih luas daerahnya untuk daerah sebelah utara ekuator geomagnet dibandingkan sebelah selatan ekuator geomagnet. Dari panel paling atas dari gambar tersebut diketahui bahwa histeresis ionosfer positif pada pukul 00:00 UT terjadi di sebelah utara ekuator geomagnet baik di lintang rendah, tengah dan tinggi pada bujur -120° sampai 45° yang ekuivalen dengan pukul 16:00 LT sampai 03:00 LT. Adapun di sebelah selatan ekuator geomagnet histeresis ionosfer negatif lebih luas daerahnya

dibandingkan dengan sebelah utara geomagnet. Daerah yang paling luas histeresis negatifnya terjadi pada bujur antara 75° sampai 150° yang ekuivalen dengan pukul 05:00 LT sampai 10:00 LT.

Jika melihat pada ekuator geomagnet, diketahui bahwa histeresis ionosfer positif dan negatif dapat dikelompokkan pada Tabel 3-1. Pada tabel tersebut diketahui bahwa histeresis positif dan negatif terjadi pada waktu lokal yang hampir sama. Histeresis positif biasanya terjadi pada sore hari (sekitar 16:00 LT - 17:00 LT) sampai pagi hari (sekitar pukul 04:00 LT - 05:00 LT). Sebaliknya histeresis negatif terjadi pada waktu pagi hari sampai sore hari. Jika dilihat waktu siang dan malamnya pada umumnya selama siang hari terjadi histeresis negatif dan sebaliknya pada malam hari umumnya terjadi histeresis positif.

Berbeda dengan histeresis ionosfer ekuator, daerah lintang rendah memiliki perbedaan waktu terjadinya histeresis ionosfer positif dan negatif seperti ditunjukkan pada Tabel 3-2 untuk lintang rendah bagian utara yaitu di sekitar +20° LM. Histeresis ionosfer lintang rendah bagian utara umumnya bernilai positif mulai tengah hari sekitar pukul 12:00 LT sampai malam hingga pagi hari sekitar pukul 04:00 LT - 05:00 LT. Sebaliknya histeresis ionosfer negatif terjadi pada pagi hari sekitar pukul 05:00 LT sampai tengah hari sekitar pukul 12:00 LT kecuali pada pukul 06:00 UT atau di sektor Afrika ketika mengalami waktu pagi hari. Adapun di lintang tengah dan tinggi histeresis ionosfer positif dan negatif tidak terjadi secara konsisten sehingga sulit ditentukan kapan terjadinya histeresis positif dan negatif. Tetapi secara umum di sebelah selatan ekuator geomagnet histeresis negatif terjadi dalam waktu yang lebih lama dibandingkan di daerah utara ekuator geomagnet. Terutama di lintang tinggi bagian selatan, histeresis ionosfer di atas lintang geomagnet -70° LM histeresis ionosfer umumnya bernilai negatif baik siang dan malam hari.

Tabel 3-1: PENGELOMPOKAN HISTERESIS IONOSFER EKUATOR GEOMAGNET BERDASARKAN WAKTU LOKAL

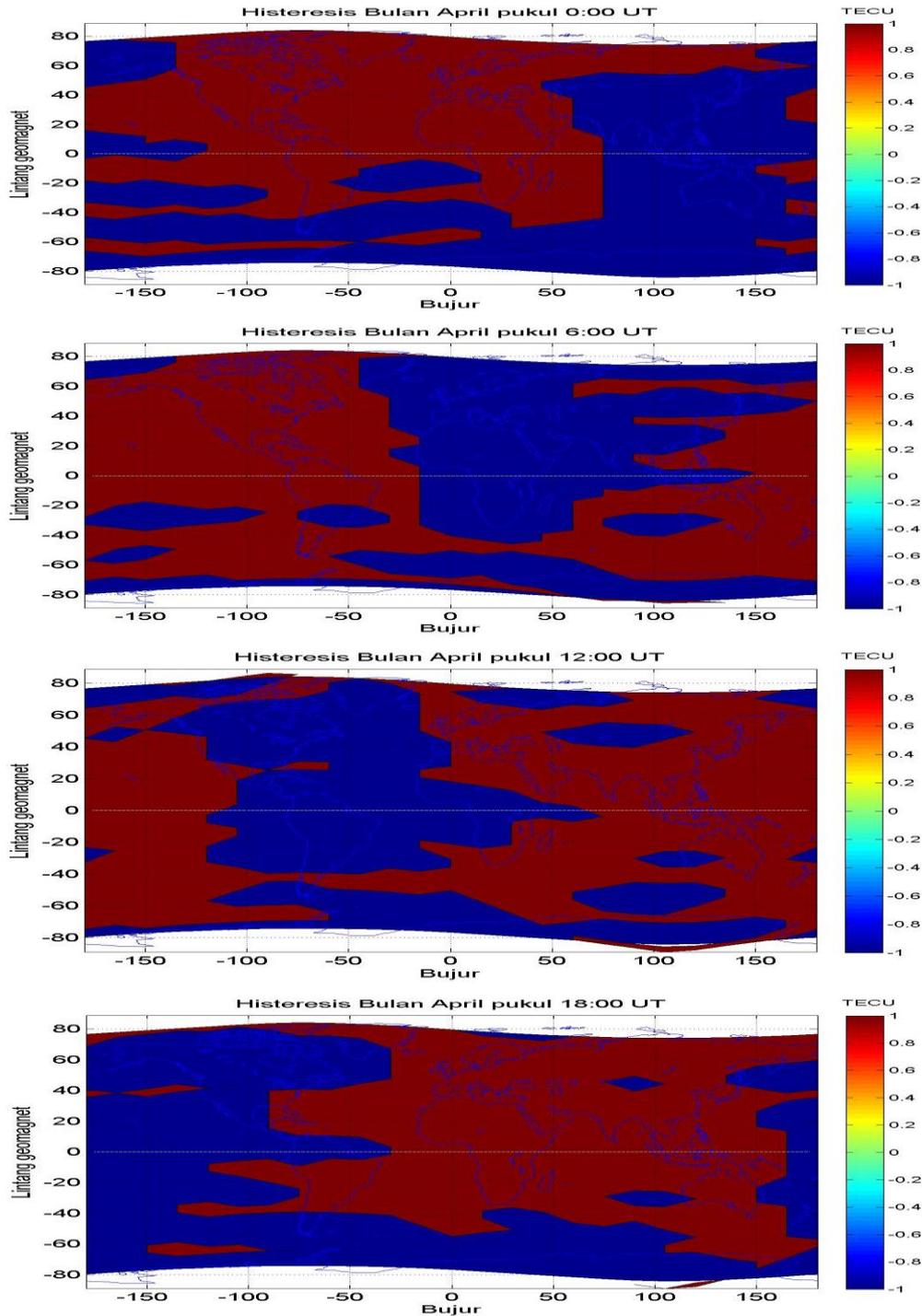
Histeresis	00:00 UT	06:00 UT	12:00 UT	18:00 UT
Daerah Positif	120° BB - 75° BT	150° BT - 15° BB	75° BT - 120° BB	30° BB - 165° BT
Waktu lokal	17:00 - 05:00	16:00 - 05:00	17:00 - 04:00	16:00 - 05:00
Daerah Negatif	75° BT - 120° BB	15° BB - 150° BT	120° BB - 75° BT	165° BT - 30° BB
Waktu lokal	05:00 - 17:00	05:00 - 16:00	04:00 - 17:00	05:00 - 16:00

Tabel 3-2: PENGELOMPOKAN HISTERESIS IONOSFER LINTANG RENDAH (+20° LM) BERDASARKAN WAKTU LOKAL

Histeresis	00:00 UT	06:00 UT	12:00 UT	18:00 UT
Daerah Positif	180° BB - 60° BB	135° BT - 30° BB	0° - 105° BB	90° BB - 150° BT
Waktu lokal	12:00 - 04:00	15:00 - 05:00	12:00 - 05:00	12:00 - 04:00
Daerah Negatif	60° BT - 180° BB	30° BB - 135° BT	105° BB - 0°	150° BT - 90° BB
Waktu lokal	04:00 - 12:00	05:00 - 15:00	05:00 - 12:00	04:00 - 12:00

Dari variasi spasial dan temporal histeresis positif dan negatif sebagaimana dikelompokkan pada Tabel 3-1 dan 3-2 berdasarkan Gambar 3-7 dapat diketahui bahwa histeresis positif dan negatif di daerah ekuator dan lintang rendah memiliki pola waktu yang sistematis sehingga ada kemungkinan memasukkan model histeresis ionosfer dalam prediksi ionosfer jangka panjang untuk daerah tersebut. Hal ini berbeda dengan histeresis ionosfer daerah lintang tengah dan tinggi yang tidak mempunyai pola waktu dan tempat secara sistematis sehingga sulit dimasukkan dalam model ionosfer.

Variabilitas spasial histeresis positif dan negatif di daerah lintang tinggi dari penelitian ini juga memberikan koreksi hasil penelitian Adler dan Elias (2008) yang menyatakan bahwa di lintang di atas 50° LMU dan LMS histeresis ionosfer bernilai negatif. Ternyata hal itu tidak selamanya benar. Pada waktu dan lokasi lainnya terdapat histeresis ionosfer positif di lintang tinggi sampai di atas 50° LMU bahkan sampai lintang 80° LMU.



Gambar 3-7: Variabilitas spasial dan temporal histeresis positif dan negatif

3 KESIMPULAN

Dari data TEC GIM bulan April tahun 1998, 1999, 2003 dan 2004 diketahui bahwa histeresis ionosfer memiliki variasi diurnal di mana nilai maksimumnya terjadi

sekitar puncak anomali ionisasi ionosfer ekuator yaitu di sekitar 10° - 20° LMU dan LMS. Histeresis ionosfer lintang rendah memiliki variabilitas spasial dan diurnal yang mirip dengan variabilitas anomali ionisasi ionosfer daerah lintang rendah tetapi sedikit bergeser ke timur atau terjadi pada waktu yang lebih awal dibandingkan dengan anomali ionisasi ionosfer ekuator. Hasil penelitian ini mengoreksi hasil sebelumnya yang didapatkan oleh Adler dan Elias (2008) dan Rao dan Rao (1969) yang menyatakan bahwa histeresis mencapai maksimum pada lintang tengah $\pm 25^{\circ}$ - 30° LM dan hasil penelitian Kane (1995) yang menyatakan bahwa histeresis ionosfer di lintang rendah adalah kecil.

Berbeda dengan ionosfer lintang tengah dan tinggi, histeresis ionosfer lintang rendah terjadi secara sistematis baik secara spasial maupun temporal. Oleh karena itu efek histeresis ionosfer dapat dimasukkan dalam pemodelan ionosfer lintang rendah dalam upaya peningkatan akurasi model ionosfer jangka panjang. Temuan ini dapat menjelaskan kontradiksi kesimpulan sebelumnya tentang efektifitas dimasukkannya histeresis ionosfer dalam model ionosfer. Oleh karena itu penulis merekomendasikan bahwa beberapa model ionosfer lintang rendah yang mengabaikan efek histeresis hendaknya dimodifikasi dengan mempertimbangkan formulasi yang berbeda untuk ketergantungan ionosfer terhadap aktivitas matahari pada saat fase naik dan turun.

DAFTAR RUJUKAN

- Adler, N.O., dan Elias, A.G., 2008. *Latitudinal Variation of foF2 Hysteresis of Solar Cycles 20, 21 and 22 and its Application to the Analysis of Long-Term Trends*, Ann. Geophys., 26, 1269–1273.
- Apostolov, E. M. and Alberca, L. F., 1995. *foF2 Hysteresis Variations and the Semi-Annual Geomagnetic Wave*, J. Atmos. Terr. Phys., 57, 755–757.
- Buresova, D. and J. Lastovicka, J., 2000. *Hysteresis of foF2 at European Middle Latitudes*, EGS-Springer-Verlag 2000, Annales Geophysicae 18. 987-991.
- Kane, R. P., 1992. *Sunspots, Solar Radio Noise, Solar EUV and Ionospheric foF2*, J. Atmos. Terr. Phys., 54, 463-463.
- LiBo, L., WeiXing, W., YiDing, C., HuiJun, L., 2011. *Solar Activity Effects of the Ionosphere: A Brief Review*, Chinese Science Bulletin, SPECIAL TOPIC: Space Physics and Space Weather Geophysics, Vol.56 No.12: 1202–1211.
- Mikhailov, A. V. and Mikhailov, V. V., 1995. *Solar Cycle Variations of Annual Mean Noon foF2*, Adv. Space Res., 15, 79–82.
- Rao, M. S. V. G. and Rao, R. S., 1969. *The Hysteresis Variation in F2-Layer Parameters*, J. Atmos. Terr. Phys., 31, 1119–1125.
- Triskova, L., dan Chum, J., 1996. *Hysteresis in Dependence of foF2 on Solar Indices*, Adv. Space Res, Vol. 18, No. 6, PP. (6), 145-(6)148.
- Ozguç et al., 2008. *Examination of the Solar Cycle Variation of foF2 for Cycles 22 and 23*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 70, 268–276.

