

SELEKSI PARAMETER MASUKAN MODEL TEC IONOSFER DI DAERAH LINTANG RENDAH [INPUT PARAMETERS SELECTION OF IONOSPHERIC TEC MODEL AT LOW LATITUDE REGION]

Buldan Muslim

Peneliti Pusat Sains Antariksa, Lapan

e-mail: mbuldan@gmail.com

Diterima 10 April 2013; Disetujui 14 Juni 2013

ABSTRACT

In ionospheric total electron content (TEC) modeling, selection of input parameters can increase the effectiveness of its application for the ionospheric prediction. Several input parameters for the ionospheric model are solar radio flux at 10.7 cm ($F_{10.7}$), geomagnetic activity index from midlatitude geomagnetic stations, the Ap index, and geomagnetic index from equatorial geomagnetic stations, the Dst index. TEC data from global ionospheric map (GIM) in January, from 1999 - 2010 have been used for learning and testing of general regression neural network (GRNN) of TEC at low latitude region. The selection of input parameters for the GRNN TEC model is done by optimizing the configuration of inputs that produce a smallest error. The GRNN TEC models have been examined with four input configurations: 1. $F_{10.7}$, and universal time (UT), 2. $F_{10.7}$, Ap, and UT, 3. $F_{10.7}$, Dst, and UT, 4. $F_{10.7}$, Ap, Dst, and UT. The results showed the accuracy of the TEC models at the 105 °E meridian with input parameters such as $F_{10.7}$, geomagnetic index (Dst or Ap), and UT vary with geomagnetic latitude. The configuration of input parameters that yield the most accurate model of monthly TEC is the third configuration that use the Dst index.

Keywords: *TEC, Model, Input parameters, Selection, Artificial neural networks, General regression, Correlation*

ABSTRAK

Dalam pemodelan *Total Electron Content* (TEC) ionosfer, pemilihan parameter masukan dapat meningkatkan efektivitas penerapannya pada prediksi ionosfer. Beberapa parameter masukan untuk model ionosfer antara lain adalah fluks radio matahari pada gelombang 10,7 cm ($F_{10.7}$) indeks aktivitas geomagnetik dari pengamatan di daerah lintang tengah yaitu indeks Ap dan indeks aktivitas geomagnet dari pengamatan di daerah ekuator yaitu indeks Dst. Data TEC dari *Global Ionospheric Map* (GIM) pada bulan Januari, mulai 1999 sampai 2010 telah digunakan untuk pembelajaran dan pengujian model Jaringan Syaraf Tiruan Regresi Umum (JSTRU) di daerah lintang rendah. Pemilihan parameter masukan untuk model TEC dilakukan dengan cara mengoptimasi konfigurasi masukan yang dapat menghasilkan model dengan kesalahan terkecil. Model TEC JSTRU dibuat dengan empat konfigurasi masukan: 1. $F_{10.7}$, dan *Universal Time* (UT), 2. $F_{10.7}$, Ap, dan UT, 3. $F_{10.7}$, Dst, dan UT, 4. $F_{10.7}$, Ap, Dst, dan UT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akurasi model TEC pada meridian 105 °BT dengan parameter-parameter masukan yaitu $F_{10.7}$, indeks geomagnet (Dst atau Ap), dan UT bervariasi terhadap lintang geomagnet. Konfigurasi parameter masukan yang menghasilkan model TEC bulanan paling akurat adalah konfigurasi ketiga yang menggunakan indeks Dst.

Kata kunci: *TEC, Model, Parameter masukan, Pemilihan, Jaringan syaraf tiruan, Regresi umum, Korelasi*

1 PENDAHULUAN

Beberapa model TEC ionosfer dari data TEC berbasis *Global Positioning System* (GPS) telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Scharroo dan Smith (2010) telah menggunakan indeks aktivitas matahari yang diturunkan dari TEC yang dinamai dengan *Global Total Electron Content* (GTEC), untuk pemodelan TEC global. Bergeot et al. (2013) menggunakan indeks aktivitas matahari yang baru, disingkat dengan $F_{10.7P}$ yang diturunkan dari indeks $F_{10.7}$ dan rata-rata $F_{10.7}$ selama 81 hari sebelumnya, untuk pembuatan model klimatologi TEC ionosfer sebagai fungsi lintang.

Kedua model tersebut adalah model klimatologi TEC ionosfer yang berlaku untuk nilai rata-rata TEC harian global sebagai fungsi indeks aktivitas matahari $F_{10.7P}$ dan lintang geomagnet (Bergeot et al., 2013) dan model GTEC sebagai fungsi $F_{10.7}$ dan pengembangannya model TEC lokal sebagai fungsi GTEC, lintang, bujur dan waktu universal (Scharroo dan Smith, 2010).

Kedua model global TEC tersebut hanya menggunakan indeks aktivitas matahari dan belum menggunakan indeks aktivitas geomagnet. Walaupun penggunaan indeks GTEC dapat mengurangi kesalahan model karena perbedaan respon ionosfer saat fase naik dan fase turunnya siklus aktivitas matahari tetapi dengan indeks GTEC yang merupakan rata-rata TEC global, model TEC dengan *input* GTEC tanpa menggunakan indeks geomagnet berpotensi mempunyai simpangan yang besar saat terjadi badai geomagnet. Model-model tersebut dikembangkan dari data *Global Ionospheric Map* (GIM).

Untuk model klimatologi TEC lintang rendah yang tidak hanya dapat merepresentasikan variasi jangka panjang yaitu variasi harian, musiman dan tahunan yang dipengaruhi oleh aktivitas matahari tetapi juga dapat merepresentasikan variasi diurnal TEC dan pengaruh aktivitas geomagnet, model TEC lintang rendah perlu dikembangkan dalam era informasi sekarang ini model TEC yang dapat digunakan untuk prediksi ionosfer memerlukan parameter masukan yang tersedia secara *online*. Dengan parameter masukan yang murni diturunkan dari data aktivitas matahari dan geomagnet maka model TEC yang dikembangkan berpotensi dapat diterapkan untuk prediksi TEC secara *online* dan dapat dijalankan secara otomatis.

Makalah ini membahas pemilihan parameter masukan yang optimum untuk model TEC ionosfer lintang rendah menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan Regresi Umum (JSTRU) dengan konfigurasi masukan yang berbeda-beda. Pada bab 2 dijelaskan parameter cuaca antariksa yang mempengaruhi TEC ionosfer, bab 3 menjelaskan JSTRU yang digunakan untuk pemilihan parameter masukan model TEC, bab 4 menjelaskan data dan metodologi, bab 5 berisi hasil dan pembahasan pemodelan TEC dan diakhiri dengan kesimpulan pada bab 6.

2 INDEKS AKTIVITAS MATAHARI DAN GEOMAGNET

2.1 Indeks Aktivitas Matahari

Indeks aktivitas matahari paling tua adalah bilangan *sunspot* (R) yang telah memberikan catatan terpanjang aktivitas matahari yang telah diamati secara rutin di Observatorium Zurich sejak 1814. Dari pengamatan rutin tersebut dapat diestimasi bilangan *sunspot* ke belakang sampai tahun 1961 (Hathaway, 2013). Indeks ini merupakan referensi utama aktivitas matahari mewakili terulangnya intensitas *loop* magnetik yang terlihat di permukaan Matahari. Saat ini, R internasional didistribusikan oleh *Solar Influences Data Analysis Center* (SIDC). Indeks ini didasarkan

pada proses statistik dari jaringan pengamatan bilangan *sunspot* sebanyak 86 stasiun pengamatan matahari yang tersebar dalam 29 negara (Clette et al. 2007).

Selain R, indeks aktivitas matahari yang lebih merepresentasikan radiasi EUV yang merupakan sumber utama ionisasi di atmosfer atas adalah $F_{10.7}$ yang direkam secara rutin sejak 1947 (Covington, 1969). Indeks $F_{10.7}$ dinyatakan dalam *Solar Flux Unit* ($1 \text{ SFU} = 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). Jika sumber ionisasi atmosfer atas meningkat maka TEC juga akan meningkat.

Dari penelitian sebelumnya diperoleh bahwa indeks $F_{10.7}$ lebih tinggi korelasinya dengan TEC (bernilai lebih dari 0,9) dari pada bilangan *sunspot* R yang kurang dari 0,9 (Bergeot et al., 2013). Sehingga dalam penelitian ini digunakan indeks $F_{10.7}$ sebagai input model.

2.2 Indeks Aktivitas Geomagnet

Ilmuwan geomagnet telah mengembangkan beberapa indeks geomagnet yang dirancang sebagai ukuran semikuantitatif aktivitas magnetosfer. Ada beberapa indeks geomagnet tetapi ada 4 indeks yang paling umum digunakan yaitu Dst, Kp, Ap, dan AE. Mengingat kajian ini untuk seleksi parameter masukan untuk model TEC lintang rendah maka indeks yang dibahas hanya yang terkait dengan pengamatan di daerah lintang rendah dan lintang tengah yaitu 3 indeks pertama, sedangkan indeks AE tidak dibahas dalam sub bab ini.

2.2.1 Indeks Kp

Indeks Kp diturunkan dari sekitar 24 stasiun geomagnet yang berada di daerah sub aurora. Stasiun geomagnet yang digunakan terletak pada lintang geomagnet antara +/- 45,0° sampai +/- 62,5°. Dari dua puluh empat stasiun geomagnet hanya dua stasiun yang terletak di belahan bumi selatan (Rostoker, 1972). indeks Kp ini tersedia setiap interval 3 jam dalam satu hari. indeks ini mempunyai skala logaritmik. Kondisi geomagnet tenang memiliki indeks 0 dan kondisi geomagnet paling terganggu diberi indeks 9.

2.2.2 Indeks ap dan Ap

Indeks ap adalah versi linier dari indeks Kp. Sedangkan indeks Ap adalah rata-rata indeks ap dalam sehari. Dalam skala linier indeks Kp 9 setara dengan indeks ap 400.

2.2.4 Indeks Dst

Indeks Dst dikembangkan sebagai indikator aktivitas arus cincin. Stasiun pengamatan geomagnet yang digunakan dipilih yang jauh dari pengaruh aurora dan elektrojet aurora. Awalnya diturunkan dari 8 stasiun pengamatan yang terletak antara 9° - 33° lintang utara dan selatan.

Mengingat model TEC ionosfer yang ditinjau adalah untuk daerah lintang rendah maka dipilihlah dua indeks yang dikaji yaitu indeks Ap dan Dst. Pemilihan dua indeks yang dikaji tersebut untuk pemodelan TEC ionosfer karena kedua indeks tersebut mempengaruhi variabilitas ionosfer lintang rendah melalui proses transport plasma yang disebabkan oleh aktivitas arus cincin dan dipengaruhi juga oleh aktivitas aurora. Pada saat terjadi gangguan geomagnet yang sangat besar maka dapat terjadi transfer energi dari daerah aurora ke arah lintang rendah bahkan sampai ekuator. Oleh karena itu walaupun TEC yang dikaji adalah untuk daerah lintang rendah, indeks Ap juga dikaji sebagai parameter masukan model TEC.

3 JARINGAN SYARAF TIRUAN REGRESI UMUM

Jaringan Syaraf Tiruan Regersi Umum (JSTRU) atau *General Regression Neural Network* (GRNN) adalah salah satu dari algoritma pembelajaran probabilistik sebagai alternatif dari algoritma propagasi balik. Algoritma ini dapat digunakan untuk pemodelan suatu sistem atau kontrol proses. Berbeda dengan pemodelan parametrik yang menghubungkan variabel bebas dengan tak bebas dengan sejumlah parameter dengan pembatasan asumsi tertentu, JSTRU termasuk dalam model non parametrik di mana jumlah parameter model tidak dapat ditentukan dalam jumlah tertentu.

Dengan asumsi bahwa $f(x,y)$ merepresentasikan pasangan fungsi kerapatan probabilitas konitnyu dari variabel acak vektor x dan satu variabel acak skalar y . Misalkan X adalah nilai terukur tertentu dari sejumlah nilai acak x , kondisi rata-rata y untuk X (disebut juga regresi y pada x) diberikan oleh (Specht, 1991).

$$E[y|X] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y f(X,y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f(X,y) dy} \quad (3-1)$$

Keterangan:

- y = keluaran dari estimator
 X = vektor masukan estimator
 $E[y|X]$ = nilai harapan keluaran untuk vektor masukan X .

Nilai fungsi secara optimal diestimasi sebagai (Disorntetiwat dan Dagli, 2000)

$$y_i = \frac{\sum_{i=1}^n h_i w_{ij}}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (3-2)$$

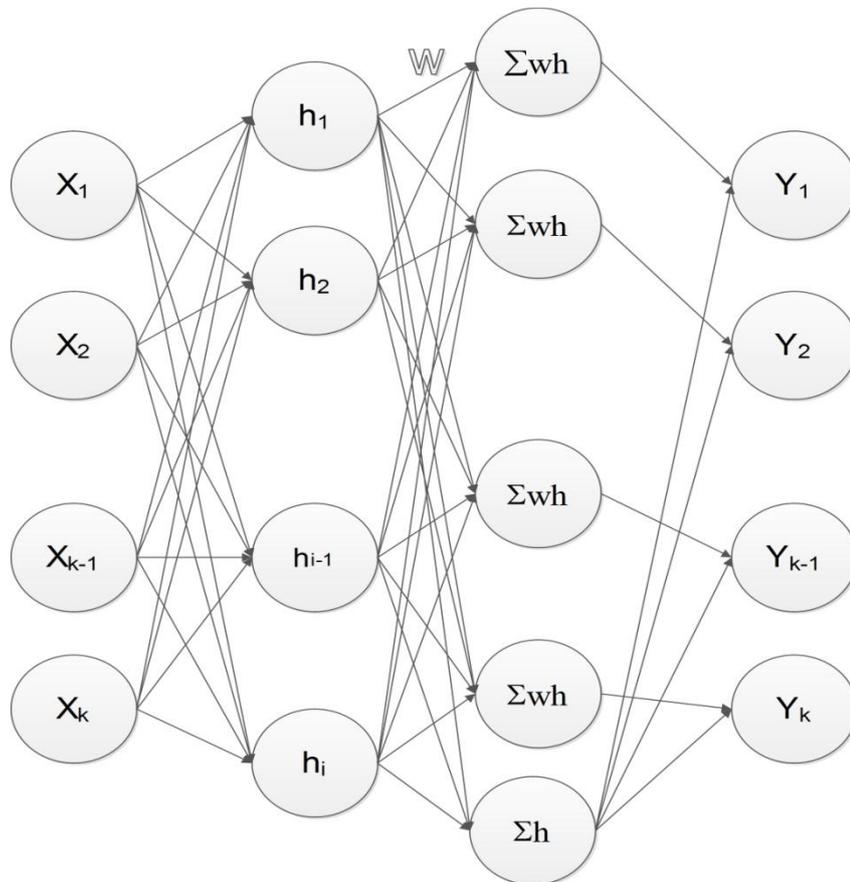
Dimana w_{ij} adalah keluaran target terkait dengan vektor pembelajaran X_i dan keluaran j .

$$h_i = e^{\left[\frac{-D_i^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (3-3)$$

keluaran neuron lapisan tersembunyi setelah melalui fungsi transfer berbentuk eksponensial yang lebarnya tergantung pada lebar fungsi transfer (σ), dan D adalah jarak kuadrat antara vektor masukan X dan vektor pembelajaran U_i yang merupakan pusat i yang dapat ditulis sebagai,

$$D_i^2 = (X - U_i)^T (X - U_i) \quad (3-4)$$

JSTRU terdiri dari empat lapisan. Lapisan pertama berisi neuron-neuron masukan, lapisan kedua berisi neuron-neuron tersembunyi dan lapisan ketiga adalah lapisan penjumlahan dan lapisan keempat adalah lapisan keluaran. Sebagaimana dijelaskan pada Gambar 3-1, pada lapisan pertama vektor *input* disebar dalam neuron *input* di mana setiap *input* X_i menempati satu neuron ke i . Pada lapisan kedua terdiri dari fungsi transfer di mana setiap neuron berisi satu fungsi transfer h_i . Pada lapisan penjumlahan sekelompok neuron merupakan penjumlahan hasil perkalian bobot w_{ij} dengan fungsi transfer h_i . Dan satu neuron berfungsi sebagai penjumlahan *output* fungsi transfer tanpa bobot h_i . Pada lapisan keluaran berisi neuron-neuron yang merupakan fungsi estimasi atau nilai harap Y_i .



Gambar 3-1: Arsitektur JSTRU

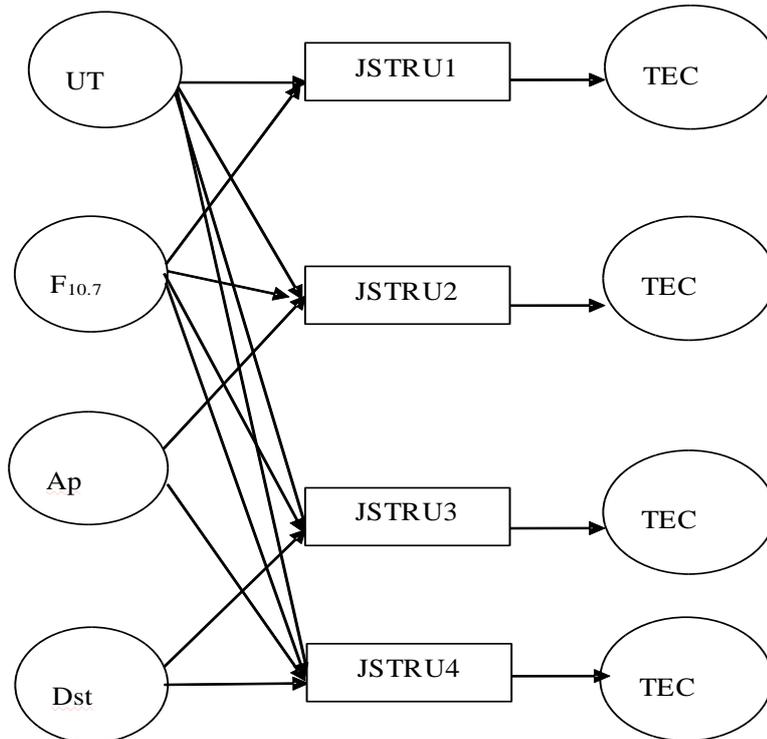
4 DATA DAN METODOLOGI

Data TEC yang digunakan dalam seleksi parameter masukan model diperoleh dari peta GIM pada bulan Januari mulai tahun 1999 sampai dengan 2010. Peta GIM dalam bentuk numerik dapat diperoleh dari <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/>. Pemilihan data hanya pada bulan Januari dengan asumsi bahwa pengaruh aktivitas geomagnet dan matahari tidak dipengaruhi secara signifikan oleh variasi posisi garis edar matahari sehingga parameter masukan yang terpilih pada bulan Januari akan berlaku juga untuk masukan model TEC pada bulan lainnya dengan sekumpulan data TEC dan parameter masukan pada bulan yang sesuai. Data untuk parameter masukan adalah indeks $F_{10.7}$, Ap dan Dst pada bulan Januari pada tahun yang sama dengan data TEC. Data TEC, $F_{10.7}$, Ap dan Dst dihitung rata-rata bulanannya sebelum digunakan untuk pemodelan.

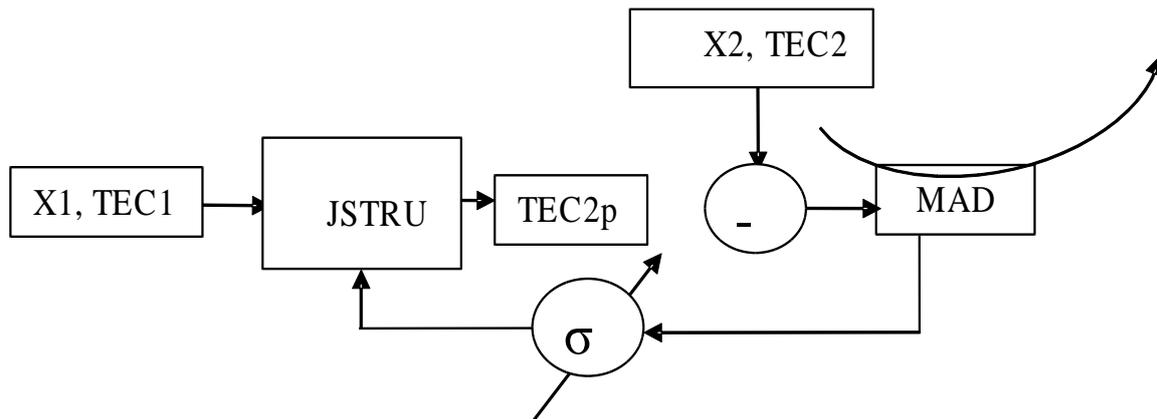
Menggunakan empat konfigurasi masukan yang berbeda dilakukan pemodelan TEC ionosfer menggunakan JSTRU sebagaimana dijelaskan dengan Gambar 4-1. Model JSTRU1 menggunakan masukan hanya indeks aktivitas matahari $F_{10.7}$ dan *Universal Time* (UT), konfigurasi masukan kedua melibatkan indeks $F_{10.7}$, Ap, dan UT digunakan untuk model JSTRU2, konfigurasi ketiga untuk model JSTRU3 dengan masukan $F_{10.7}$, Dst, dan UT, kemudian konfigurasi masukan ke empat adalah $F_{10.7}$, Ap, Dst, dan UT untuk model JSTRU4.

Gambar 4-2 menjelaskan algoritma pembelajaran model JSTRU. Dengan pasangan vektor *input* X_1 (bersisi parameter masukan UT, $F_{10.7}$, Ap dan Dst sesuai konfigurasinya) dan *output* TEC1 yang sesuai dengan waktu UT dan bersamaan waktunya dengan vektor *input* X_1 , dilakukan pembelajaran satu jalan dengan lebar fungsi transfer tertentu, σ , untuk mendapatkan model TEC JSTRU. Model TEC tersebut digunakan untuk prediksi TEC2 dengan *input* X_2 . Prediksi TEC2 dari model JSTRU, TEC2p dibandingkan dengan data uji TEC2 untuk mendapatkan nilai rata-rata

simpangan mutlak atau *Mean Absolut Deviation* (MAD). Dengan mengubah-ubah lebar fungsi tranfser σ akan diperoleh beberapa model JSTRU dengan MAD yang berbeda beda. Kemudian dicarilah dari sekumpulan data MAD suatu lebar σ dengan MAD yang terkecil. Kemudian dengan σ yang terkecil itulah model JSTRU yang terpilih untuk konfigurasi *input* X tertentu. X berisi satu atau lebih parameter masukan $F_{10.7}$, Ap, Dst, dan UT. Untuk satu pasangan *input-output* X dan TEC dipilih 90 % untuk X1 dan TEC1 dan 10 % digunakan sebagai X2 dan TEC2 yang dalam pemilihan parameter *input* sebagai data uji.



Gambar 4-1: Kombinasi *input* model JSTRU. Konfigurasi input JSTRU1 adalah $F_{10.7}$, dan UT, *input* JSTRU2 adalah $F_{10.7}$, Ap, dan UT, JSTRU3 menggunakan *input* $F_{10.7}$, Dst, dan UT, dan JSTRU4 dengan *input* yaitu $F_{10.7}$, Ap, Dst, dan UT



Gambar 4-2: Algoritma pemodelan TEC dengan JSTRU

5 HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil

Gambar 5-1 menunjukkan pembelajaran JSTRU untuk beberapa konfigurasi *input* dengan mengubah lebar fungsi transfer σ . Diperoleh model JSTRU dengan nilai σ sebesar 1,5 untuk konfigurasi *input* pertama (tidak melibatkan indeks Ap) dan konfigurasi *input* kedua (yang melibatkan indeks Ap). Untuk konfigurasi *input* ketiga

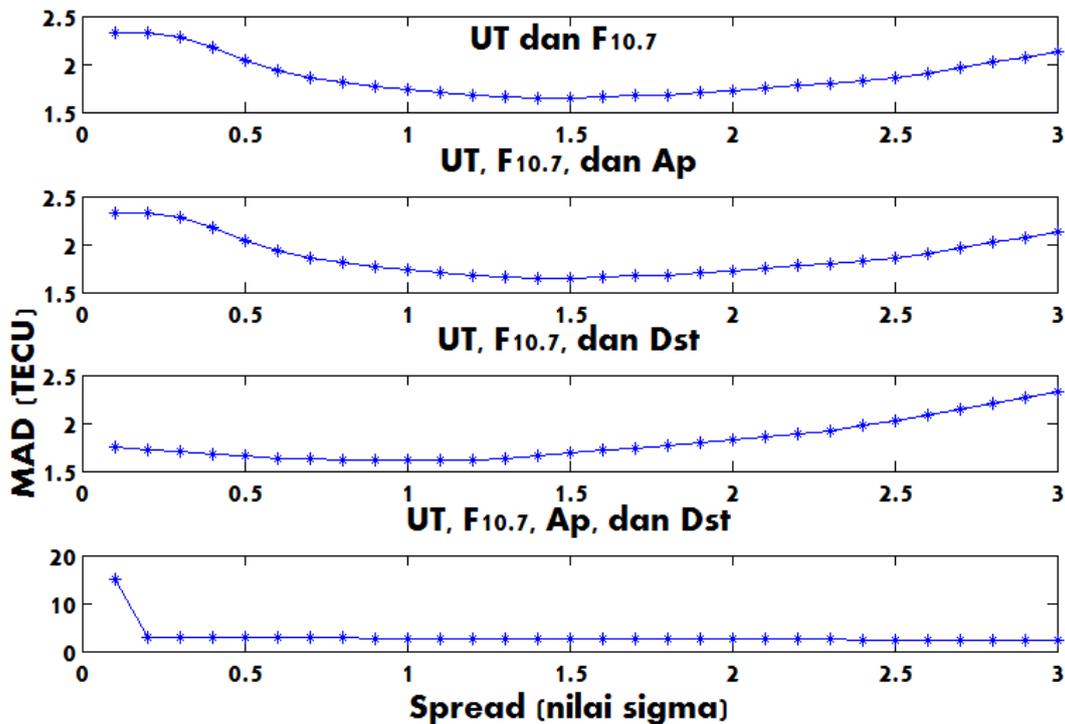
yang melibatkan indeks Dst diperoleh model TEC dengan kesalahan terkecil pada lebar fungsi transfer bernilai 1. Untuk konfigurasi *input* keempat yang melibatkan dua indeks geomagnet, Ap dan Dst, model TEC dengan kesalahan terkecil terjadi pada *spread* 2,58.

Gambar 5-2 menunjukkan bahwa konfigurasi ketiga yang melibatkan indeks geomagnet Dst, menghasilkan model TEC JSTRU memiliki kesalahan terkecil. Konfigurasi parameter *input* model yang melibatkan dua indeks geomagnet yaitu Ap dan Dst tidak meningkatkan kinerja JSTRU tetapi sebaliknya membuat JSTRU memiliki akurasi yang lebih rendah dibanding hanya melibatkan satu indeks geomagnet Ap atau Dst bahkan konfigurasi tersebut menghasilkan model TEC JSTRU dengan kesalahan yang lebih besar dari pada kesalahan model TEC yang tidak menggunakan indeks geomagnet (yaitu pada konfigurasi pertama).

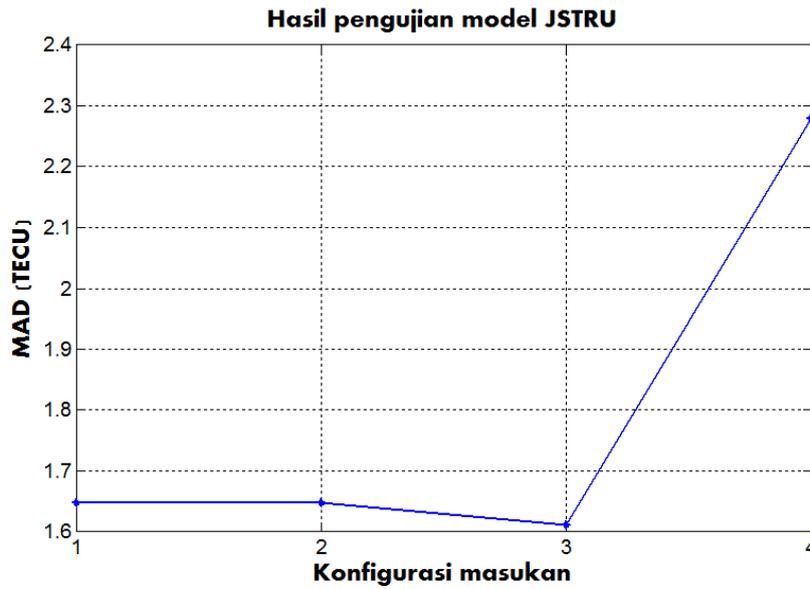
Hubungan nilai σ dan akurasi model ditunjukkan pada Gambar 5-3. Model TEC JSTRU memiliki kesalahan terbesar dengan nilai σ terbesar. Kesalahan terkecil diperoleh dengan σ terkecil untuk konfigurasi masukan ketiga yang melibatkan indeks geomagnet Dst.

Sementara Gambar 5-4 menunjukkan perbandingan antara model dengan konfigurasi masukan kedua dan ketiga. Di atas 60° lintang selatan geomagnet, tepatnya di 70° lintang selatan geomagnet, indeks Ap lebih baik sebagai masukan model TEC dibandingkan dengan indeks Dst. Di atas 70° lintang selatan geomagnet perbedaan penggunaan indeks Ap dan Dst tidak cukup berarti. Untuk belahan bumi utara berdasarkan lintang geomagnet, indeks Dst lebih baik digunakan sebagai *input* model bersama dengan indeks $F_{10.7}$, dan UT. Kesalahan model terbesar terjadi di sekitar 10° lintang geomagnet untuk indeks Ap, dan di daerah ekuator geomagnet untuk indeks Dst.

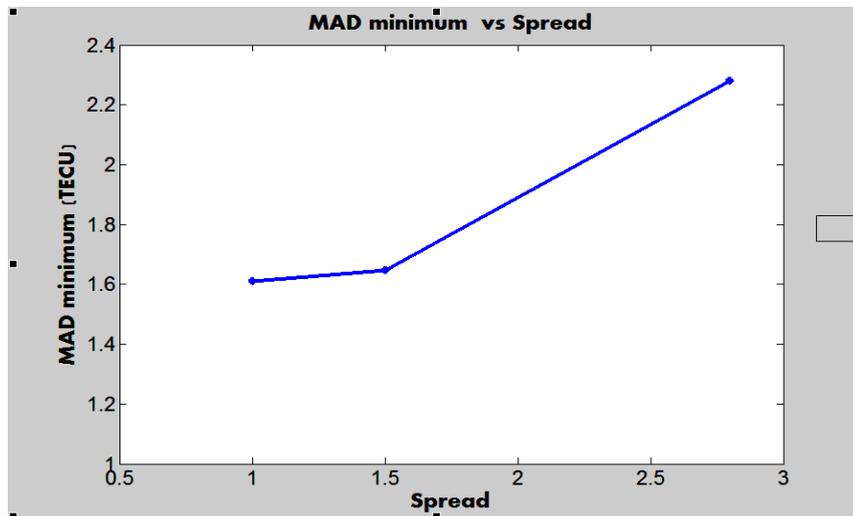
Kesalahan model TEC yang terkecil terjadi pada 39,8° lintang geomagnet selatan dan utara baik untuk *input* Ap dan Dst dengan MAD kurang dari 0,5 TECU.



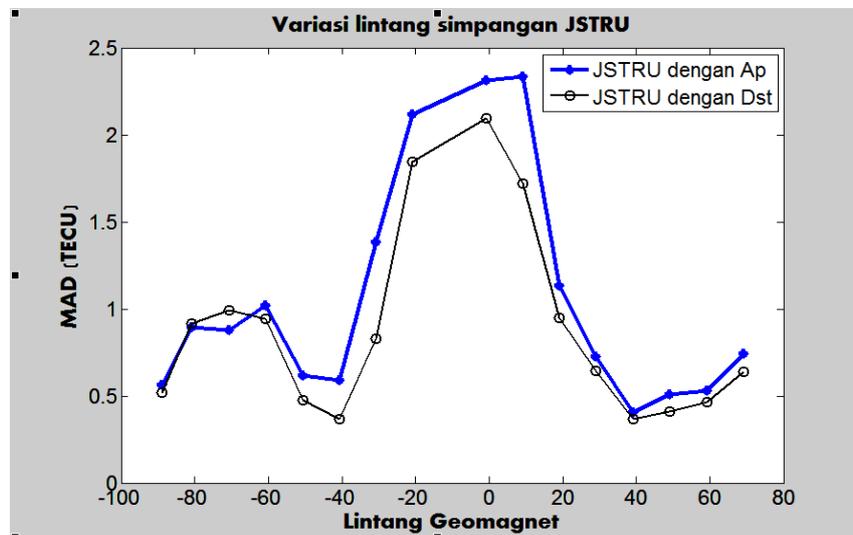
Gambar 5-1: Pengujian parameter masukan untuk model TEC dengan *spread* atau lebar fungsi transfer JSTRU dari 0,1 sampai 3,0. Mulai dari panel paling atas diperlihatkan MAD sebagai fungsi dengan konfigurasi masukan $F_{10.7}$ (paling atas), $F_{10.7}$ dan Ap (panel kedua), $F_{10.7}$ dan Dst (panel ketiga), $F_{10.7}$, Ap dan Dst (panel paling bawah)



Gambar 5-2: Pengujian model TEC GRNN di koordinat 5°LS dan 105°BT dengan 4 konfigurasi yang berbeda menunjukkan konfigurasi ketiga menghasilkan model TEC paling akurat



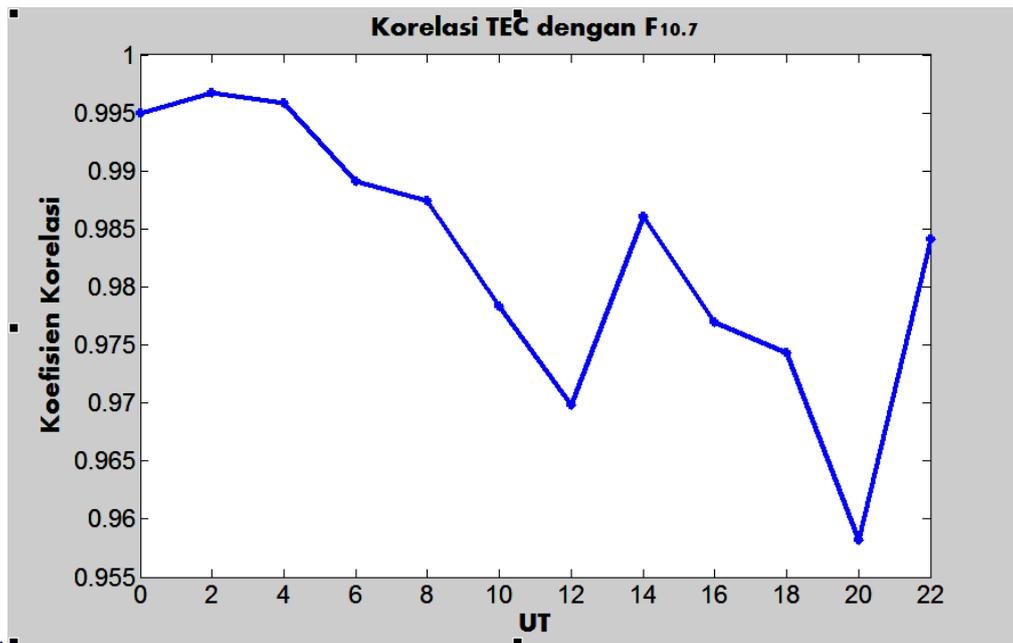
Gambar 5-3: Kesalahan model minimum sebagai fungsi *spread* (σ) atau lebar fungsi transfer. Semakin lebar nilai σ , kesalahan model semakin besar



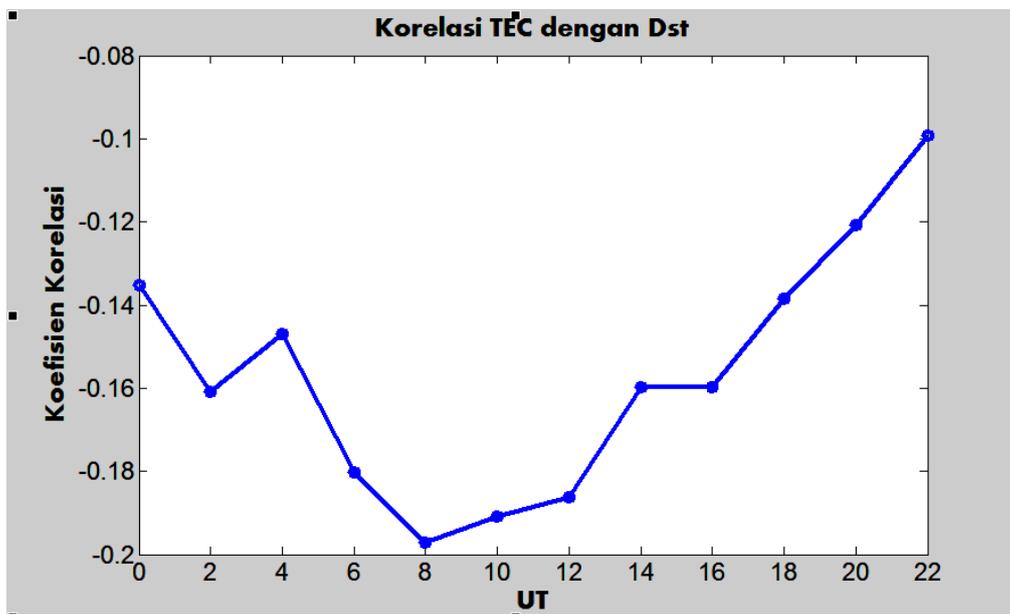
Gambar 5-4: Kesalahan minimum (MAD minimum) sebagai fungsi lintang geomagnet dengan kombinasi masukan $F_{10.7}$ dengan Dst (hitam) dan Ap (biru), menunjukkan bahwa indeks Dst sebagai masukan menghasilkan model TEC JSTRU yang lebih akurat

Gambar 5-5 menunjukkan korelasi antara $F_{10.7}$ dengan TEC untuk pukul 00:00 sampai pukul 22:00 mempunyai koefisien di atas 0,9. Walaupun nilai koefisien korelasi di atas 0,9 tetapi korelasi TEC memiliki variasi waktu diurnal di mana pada pukul 20 UT atau pukul 03:00 LT korelasi TEC dengan $F_{10.7}$ mencapai nilai terendah. Pada pukul 00:00 - 04:00 UT atau pukul 07:00 - 11:00 LT korelasi TEC mendekati satu.

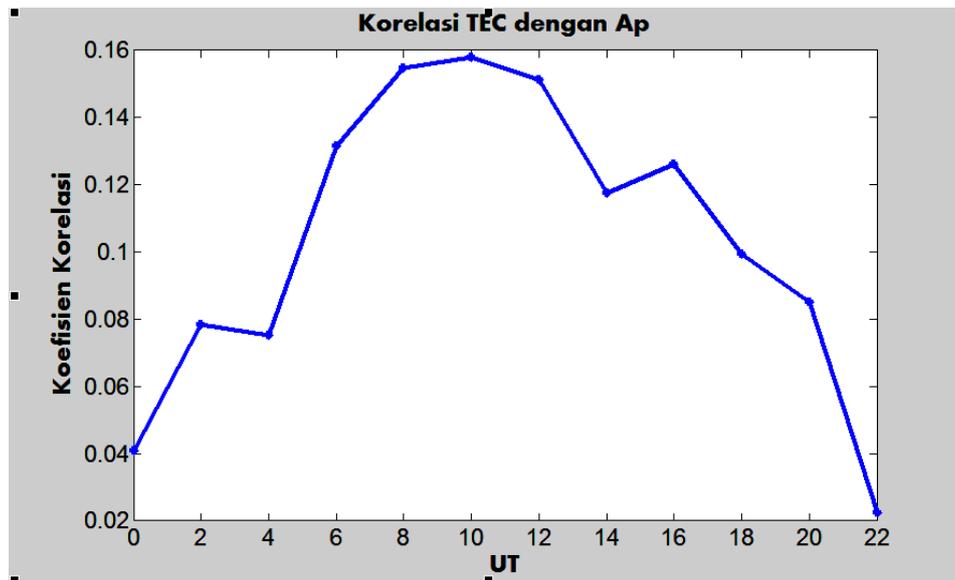
Korelasi antara Dst dengan TEC sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5-6 sangat kecil dengan koefisien korelasi antara -0,1 sampai -0,19. Dan pada Gambar 5-7 dapat diketahui bahwa koefisien korelasi antara Ap dan $F_{10.7}$ nilainya antara 0,02 sampai 0,16. Koefisien korelasi antara indeks geomagnet dengan TEC memiliki variasi diurnal. Untuk Dst dengan TEC korelasi tertinggi pada pukul 08:00 UT sedangkan antara Ap dengan TEC terjadi korelasi tertinggi pada pukul 10:00 UT.



Gambar 5-5: Korelasi antara TEC dengan $F_{10.7}$ mulai jam 0-22 UT di koordinat -5° LS, 105° BT



Gambar 5-6: Gambar 4-5 Korelasi antara Dst dengan TEC mulai jam 0-22 UT di koordinat -5° LS, 105° BT



Gambar 5-7: Korelasi antara Ap dengan TEC mulai jam pukul 0 - 22 UT di koordinat 5 °LS, 105 °BT

5.2 Pembahasan

Gambar 5-1 dan 5-3 menunjukkan bahwa makin rendah σ model JSTRU makin akurat. Nilai σ terkecil adalah konfigurasi masukan yang menggunakan indeks Dst. Hal ini terkait dengan karakteristik lebar fungsi transfer σ di mana semakin kecil σ JSTRU semakin mendekati data pengamatan karena model semakin lokal dan semakin besar σ akurasi model JSTRU semakin rendah akurasinya karena semakin global. Dengan melibatkan indeks geomagnet Dst, model TEC pada 5 °LS dan 105 °BT memiliki kesalahan terkecil. Sebagai perbandingan peningkatan kesalahan model TEC dengan indeks Dst sekitar 0,34 TECU atau sekitar 22 % dibandingkan dengan menggunakan masukan indeks Ap. Ini menunjukkan bahwa indeks Dst lebih berpengaruh terhadap variabilitas bulanan TEC dari pada indeks Ap. Hal ini karena indeks Dst diturunkan dari data geomagnet di lintang rendah dan ekuator, sedangkan indeks Ap diturunkan dari pengamatan geomagnet di lintang tengah. Tetapi lebih akuratnya penggunaan indeks geomagnet Dst dalam konfigurasi parameter masukan untuk TEC dibandingkan dengan penggunaan indeks Ap tidak terbatas berlaku untuk model TEC di daerah lintang rendah saja tetapi juga berlaku untuk daerah lintang tengah sampai 60° lintang selatan geomagnet dan sampai 70° lintang utara geomagnet seperti ditunjukkan pada Gambar 5-4. Hasil ini bisa disebabkan oleh gangguan geomagnet yang bersumber dari magnetosfer yang bersifat global yang menggerakkan variabilitas pada indeks Ap dan Dst. Di samping itu pengaruh gangguan geomagnet terhadap ionosfer juga dipengaruhi oleh medan listrik. Semakin menjauhi ekuator geomagnet, pengaruh kombinasi gangguan geomagnet dan medan listrik semakin kecil.

Penggunaan dua indeks geomagnet dalam konfigurasi masukan di samping indeks $F_{10.7}$ dan UT tidak menjamin bahwa model TEC menjadi lebih akurat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5-2. Dengan melibatkan dua indeks geomagnet; Dst dan Ap, model TEC JSTRU yang dihasilkan memiliki kesalahan terbesar. Model JSTRU yang dihasilkan juga jatuh pada nilai σ terbesar. Berarti dengan memasukkan dua indeks geomagnet tersebut model JSTRU harus dapat memberi respon terhadap aktivitas geomagnet daerah aurora sekaligus dapat merespon pengaruh gangguan geomagnet dari daerah ekuator geomagnet, sehingga memerlukan nilai σ lebih besar sehingga menghasilkan model TEC JSTRU setelah diuji dengan data baru mempunyai kesalahan terbesar. Di samping itu nilai kedua indeks tersebut berlawanan. Jika terjadi badai geomagnet sangat besar, indeks Ap bernilai positif besar, sebaliknya indeks Dst bernilai negatif besar. Nilai indeks yang berlawanan seperti

ini dapat menghasilkan model TEC yang tidak efektif.

Kesalahan model JSTRU bervariasi terhadap lintang geomagnet menunjukkan bahwa prediktibilitas ionosfer tergantung lintang. Di daerah ekuator geomagnet prediktibilitas ionosfer paling rendah dengan kesalahan model bisa di atas 2,0 TECU. Sedangkan di lintang tengah prediktibilitas ionosfer tertinggi dengan MAD kurang dari 0,5 TECU. Hal ini terkait dengan pengaruh aktivitas aurora yang paling kecil terjadi di lintang geomagnet 39,8° baik di utara maupun selatan. Lintang geomagnet 39,8° juga paling kecil dipengaruhi oleh aktivitas elektrojet ekuator. Semakin rendah lintang geomagnet semakin rendah prediktibilitas ionosfer karena pengaruh aktivitas elektrojet ekuator makin kuat dan semakin tinggi lintang geomagnet mulai dari 39,8° prediktibilitas ionosfer makin rendah karena semakin kuat pengaruh aktivitas aurora. Tetapi pengaruh aktivitas elektrojet terlihat lebih besar di ionosfer dari pada pengaruh aktivitas aurora.

Variasi diurnal nilai korelasi $F_{10.7}$ dengan TEC seperti diperlihatkan pada Gambar 5-5 memberikan informasi bahwa pengaruh aktivitas matahari yang diindikasikan dengan $F_{10.7}$ terjadi paling kuat pada pukul 02:00 UT atau pukul 09:00 LT di pagi hari beberapa jam setelah matahari terbit. Nilai paling rendah korelasi $F_{10.7}$ dengan TEC pada pukul 20:00 UT atau pukul 03:00 waktu lokal menunjukkan bahwa pada malam hari tersebut selain pengaruh matahari juga ada faktor lain yang mempengaruhi ionosfer walaupun sangat kecil.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5-6 dan 5-7 variabilitas korelasi indeks aktivitas geomagnet dengan TEC memiliki kemiripan tetapi berkebalikan korelasinya. Mempunyai korelasi tertinggi pada sore hari yaitu sekitar pukul 15:00 LT untuk Dst dengan TEC dan pukul 16:00 untuk korelasi TEC dan Ap, dan kedua parameter memiliki korelasi terendah dengan TEC pada pukul 22:00 UT atau pukul 05:00 LT. Rendahnya nilai korelasi pada malam hari sampai menjelang matahari terbit disebabkan kondisi ionosfer pada waktu tersebut dalam keadaan tanpa energi ionisasi dan dalam tahap rekombinasi di mana waktu hidup ion-ion dan elektron sudah hampir habis. Pada saat tersebut pengaruh gangguan geomagnet mencapai nilai terendah.

Dengan meninjau lokasi data TEC pada 5 °LS, dapat dipahami perbedaan nilai korelasi antara TEC dengan indeks Dst yang mencapai maksimum pada pukul 15:00 LT dan dengan Ap yang mencapai maksimum pukul 17:00 LT. Perbedaan nilai maksimum korelasi tersebut menunjukkan adanya perbedaan respon ionosfer terhadap indeks Ap yang merupakan indikator aktivitas aurora dan indeks Dst yang merupakan indikator aktivitas arus cincin. Karena TEC lintang rendah yang ditinjau maka perbedaan waktu tersebut menunjukkan bahwa pengaruh aktivitas aurora sekitar 2 jam lebih lambat dari pada pengaruh arus cincin pada TEC di lintang rendah.

6 KESIMPULAN

Melalui pengujian parameter masukan $F_{10.7}$, indeks Dst dan Ap untuk pemodelan TEC ionosfer di daerah ekuator, lintang rendah, tengah dan tinggi dari data TEC GIM bulan Januari tahun 1999 - 2010, pada 105° BT menggunakan JSTRU menunjukkan bahwa selain waktu UT dan $F_{10.7}$, penggunaan indeks geomagnet Dst dapat menghasilkan model TEC lebih akurat dibandingkan dengan model TEC dengan masukan indeks geomagnet Ap, khususnya di daerah lintang rendah.

Dari variabilitas akurasi model terhadap lintang geomagnet diperoleh bahwa TEC ionosfer pada 39,8 ° lintang geomagnet utara dan selatan adalah suatu daerah yang paling stabil dan paling kecil dipengaruhi oleh aktivitas elektrojet ekuator dan aurora. Pengaruh elektrojet ekuator pada ionosfer lebih kuat dibandingkan pengaruh aktivitas aurora pada ionosfer yang ditandai dengan simpangan model TEC dengan masukan indeks Dst di daerah ekuator, lintang rendah dan lintang tengah lebih kecil

dibandingkan kesalahan model TEC dengan masukan indeks Ap. Menggunakan analisis korelasi telah dikonfirmasi bahwa indeks Dst memiliki korelasi yang lebih tinggi dengan TEC dibandingkan antara Ap dengan TEC.

Dalam pengembangan model klimatologi TEC ionosfer untuk daerah lintang rendah hendaknya menggunakan indeks geomagnet Dst selain indeks $F_{10.7}$ dan UT.

DAFTAR RUJUKAN

- Bergeot, N., Tsagouri, I., Bruyninx, C., Legrand, J., ean-Marie, Chevalier, Pascale Defraigne, P., Baire, Q., and Pottiaux, E., 2013. *The Influence of Space Weather on Ionospheric Total Electron content during the 23rd solar cycle*, J. Space Weather Space.
- Clette, F., D. Berghmans, P. Vanlommel, R. Van der Linden, A. Koeckelenbergh, and L. Wauters, 2007. *From the Wolf number to the International Sunspot Index: 25 years of SIDC*, Adv. Space Res., 40 (7), 919–928, ISSN: 0273-1177, DOI:10.1016/j.asr.2006.12.045.
- Covington, A. E., 1969. *Solar Radio Emission at 10.7 cm, 1947–1968*, J. R. Astron. Soc. Can., 63, 125–132.
- Disorntetiawat, P., dan Dagli, C. H., 2010. *Simple Ensemble-Averaging Model based on Generalized Regression Neural Network in Financial Forecasting Problems*, Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000. AS-SPCC, IEEE.
- Hathaway, D.H., 2013. *The Sunspot Cycle*, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>, diakses 10 Oktober 2013.
- Liu, L., and Y. Chen, 2009. *Statistical Analysis of Solar Activity Variations of Total Electron Content Derived at Jet Propulsion Laboratory from GPS Observations*, J. Geophys. Res., 114, A10311, DOI:10.1029/2009JA014533.
- Liu, L., W. Wan, B. Ning, O.M. Pirog, and V.I. Kurkin, 2006. *Solar Activity Variations of the Ionospheric Peak Electron Density*, J. Geophys. Res., 111 (8), A08304, DOI: 10.1029/2006JA011598.
- Scharroo, R., and Smith, W. H. F., 2010. *A Global Positioning System-Based Climatology for the Total Electron Content in the Ionosphere*, Journal of Geophysical Research, Vol. 115, A10318.
- Rostoker, 1972. *Geomagnetic Indices*, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 10, No. 4, PP. 935-950.
- Specht, D. F., 1991. *A General Regression Neural Network*, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 2., No. 6.