

Variasi Jumlah Kandungan Elektron Ionosfera di Malaysia ketika Solar Minimum (Variations Total Electron Content of Ionospheric in Malaysia during Minimum Solar)

SITI AMINAH BAHARI*, MARDINA ABDULLAH & BAHARUDIN YATIM

ABSTRAK

Ionosfera merupakan satu lapisan atmosfera bumi yang mengandungi elektron bebas dan boleh memberi kesan ralat kepada perambatan gelombang elektromagnetik terutama kepada sistem kedudukan global (GPS). Kesan jumlah kandungan elektron (TEC) dan fenomena melibatkan sistem suria-magnetosfera-ionosfera-termosfera kepada isyarat satelit dan komunikasi radio sentiasa berubah. Kajian ini memfokuskan kepada perubahan TEC ketika aktiviti suria di tahap minimum. Objektif utama kajian ini adalah untuk mengkaji variasi TEC di rantau Malaysia terhadap masa harian, perubahan musim, aktiviti suria dan medan magnet bumi. Isyarat GPS yang disebarkan pada dua frekuensi jalur L1 dan L2 mengandungi data kod dan fasa membolehkan pengiraan TEC diperoleh menggunakan GPS. Data GPS pada tahun 2007 yang diperolehi daripada Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia (JUPEM), digunakan dalam kajian ini. Hasil kajian di Asia Tenggara menunjukkan ketika musim ekuinoks, nilai purata TEC dicatatkan tinggi iaitu 35 TEC unit (TECU) berbanding dengan nilai purata TEC pada solstis yang mencatatkan bacaan 25 TECU. Aktiviti suria didapati lebih memberi kesan kepada perubahan TEC berbanding dengan medan magnet bumi dengan faktor kolerasi antara aktiviti suria adalah lebih tinggi iaitu 0.64 berbanding dengan medan magnet bumi iaitu 0.34 sahaja. Kajian ini tertumpu ketika aktiviti suria di tahap minimum dengan keadaan medan magnet bumi secara puratanya adalah senyap. Ini seterusnya membolehkan hasil kajian ini menjadi asas kepada maklumat mengenai ionosfera di Malaysia.

Kata kunci: GPS; ionosfera; solar minimum

ABSTRACT

The ionosphere is a layer in the Earth's atmosphere where free electrons exist in sufficient numbers to affect the propagation of electromagnetic waves especially the Global Positioning System (GPS) signals. The ionosphere is also known as 'space weather laboratory' as it is directly affected by any activity in space. The influence of the total electron content (TEC) and physical phenomenon regarding the sun-magnetosphere-ionosphere-thermosphere system on satellite and radio communication is constantly changing. The study of the TEC variation in ionosphere and structures is important to ensure the security of radio communication systems, to enhance the currently restricted global ionospheric mapping and accurate space weather forecasting. This paper focused on the variation of TEC during solar minimum. The main objective of this research was to study the variation of TEC over Malaysia on diurnal, seasonal solar and geomagnetic activity using GPS. Since the GPS signals are broadcasted in two widely spread L-band frequency channels L1 and L2 consisting of code and phase, it is possible to determine the TEC using GPS. To achieve this objective, GPS data for year 2007 was obtained from the Department of Survey and Mapping Malaysia (JUPEM) were used in this research. The results over South East Asia showed that the mean TEC during equinox was higher than solstice, whereby 35 TECU was recorded during the equinoxes but only 25 TECU was observed during solstice. It was found that solar variation had more effects on the variation of TEC as compared to the geomagnetic variation. The correlation factor for solar variation was higher, that is 0.64 but yielded only 0.34 for geomagnetic variation. This research was carried out during solar minimum and quiet geomagnetic conditions. Therefore, the results from this research can be used as a reference for the characterization of ionosphere in Malaysia.

Keywords: GPS; ionosphere; minimum solar

PENGENALAN

Ionosfera terletak pada ketinggian 60 sehingga 1000 km di atas permukaan bumi. Lapisan ini terdiri daripada elektron dan ion bebas yang terhasil melalui proses fotopengionan antara sinaran suria dengan gas bebas (Elmunim et al. 2017). Aktiviti suria sentiasa berubah seterusnya menyebabkan perubahan dalam sebahagian lapisan atas atmosfera (termosfera). Perubahan ini memberi

kesan kepada struktur dan ketumpatan jumlah kandungan elektron (TEC) (Akir et al. 2017).

Lapisan ionosfera terbahagi kepada empat lapisan utama iaitu D, E, F1 dan F2. Lapisan F2 sentiasa berubah-ubah sifatnya disebabkan oleh proses dinamik yang berlaku pada lapisan tersebut yang bergantung kepada perubahan masa dan geografi. Antara proses dinamik yang terlibat ialah perubahan kandungan kimia bahagian

atas atmosfera yang sentiasa berubah, proses penghasilan dan mekanisme kehilangan ion, penyebaran zarah dan fenomena elektrodinamik. Lapisan ionosfera lain seperti D, E dan F1 bersifat lebih kepada perubahan jangka panjang, lapisan F2 kepada perubahan jangka pendek, anggaran dalam beberapa jam dengan nilai TEC selalunya tinggi ketika musim ekuinoks (Oyeyemi et al. 2006).

Ionosfera dicirikan dengan ketumpatan elektron, N_e dalam unit elektron setiap meter padu, manakala TEC ditakrifkan sebagai jumlah bilangan elektron yang terdapat sepanjang laluan isyarat yang dipancarkan oleh satelit Sistem Kedudukan Global (GPS) kepada penerima di bumi dalam ruang yang mempunyai luas keratan rentas meter persegi seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. TEC merupakan satu parameter yang amat berguna untuk mengesan gangguan dalam lapisan ionosfera. Kesan ralat ionosfera terhadap penyebaran gelombang radio juga boleh diketahui melalui TEC (Akir et al. 2017).

Lapisan ionosfera berubah bergantung kepada waktu harian tempatan, musim, kitar suria, lokasi geografi penerima dan medan geomagnetik (Chaitanya et al. 2015). Perubahan yang biasa bagi ketumpatan elektron bebas dalam ionosfera disebabkan oleh waktu harian tempatan. Oleh kerana radiasi suria tidak wujud pada waktu malam, ketumpatan elektron bebas berkurang perlahan-lahan apabila matahari terbenam dan meningkat semula apabila matahari terbit.

Selain itu, ketumpatan elektron turut dipengaruhi oleh perubahan cuaca bermusim iaitu ekuinoks dan solstis. Ekuinoks berlaku apabila matahari melintasi khatulistiwa dan waktu siang dan malam menjadi sama panjang. Solstis pula berlaku apabila matahari paling jauh ke utara atau ke selatan khatulistiwa. Ini bermaksud, semakin banyak cahaya matahari yang diterima di suatu tempat, nilai ketumpatan elektron menjadi semakin tinggi (Bahari et al. 2015).

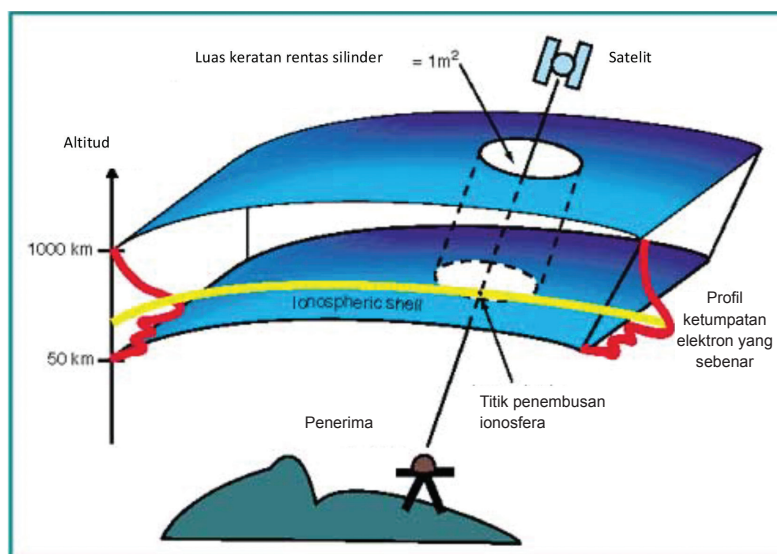
Perubahan seperti ini diketahui boleh memberi kesan kepada komunikasi satelit dan komunikasi frekuensi tinggi (HF), pelayaran dan altimetri. Apabila isyarat radio melalui lapisan ionosfera, isyarat yang diterima atau dipancarkan mengalami perubahan yang drastik daripada segi amplitud, fasa dan putaran Faraday. Ini berlaku kerana ketidakseragaman keamatan elektron pada lapisan ionosfera pada ketika itu (Momani et al. 2008).

Pelbagai kajian terhadap ionosfera di Malaysia telah dijalankan oleh penyelidik untuk memahami ciri ionosfera di Malaysia. Berdasarkan kajian terdahulu, ionosfera di Malaysia mengalami anomali dan menunjukkan variasi harian, bermusim, terhadap latitud, longitud serta aktiviti suria dan variasi geomagnetik (Bahari et al. 2015, Buhari et al. 2017). Di kawasan khatulistiwa, pengetahuan tentang usikan di lapisan ionosfera sangat penting dalam usaha untuk mengatasi kesan ionosfera terhadap komunikasi radio.

Sifat ionosfera ketika solar minimum penting dalam memahami respon sebenar ionosfera terhadap sebarang perubahan terutama medan magnet bumi dan aktiviti suria. Di kawasan khatulistiwa, angin termosfera dan medan elektrik, bersama dengan medan magnet bumi memainkan peranan penting dalam perubahan ionosfera (Chaitanya et al. 2015). Tujuan utama kajian ini dijalankan adalah untuk mengenal pasti perubahan TEC di Malaysia dengan memetakan TEC pada kawasan kajian ketika suria minimum berdasarkan waktu harian, musim, lokasi geografi dan aktiviti medan magnet serta suria menggunakan data penerima isyarat GPS di Malaysia.

KAEDAH DAN DATA

Dalam konteks GPS, isyarat yang dipancarkan ke bumi mengalami lengah yang didapati berkadar terus dengan ketumpatan elektron bebas sepanjang laluan isyarat



RAJAH 1. TEC di sepanjang laluan isyarat daripada satelit kepada penerima GPS

Sumber: Adaptasi daripada Komjathy et al. 2002

tersebut dari satelit ke penerima di bumi. Langkah yang dialami oleh isyarat GPS ini membolehkan pengkaji ionosfera mengetahui jumlah kandungan elektron pada masa tertentu. Pengiraan jumlah kandungan elektron boleh diperoleh daripada penerima dual-frekuensi GPS di bumi. Berdasarkan kajian terdahulu, GPS menjadi alat yang penting dalam proses mengkaji ciri ionosfera kerana kewujudan GPS itu yang bergerak pada orbitnya mengelilingi bumi membolehkan para pengkaji menggunakan data tersebut pada tempat dan masa yang dikehendaki (Dach et al. 2015).

GPS satelit menghantar isyarat radio yang mengandungi dua fasa pembawa dalam jalur gelombang mikro kelas L, dua julat semu (*pseudorange*) dan maklumat pelayaran menghasilkan dua pembawa koherens iaitu L1 dan L2 dalam jalur - L. Dua frekuensi pembawa pada dua pembawa koherens L1 dan L2 ini boleh ditakrifkan sebagai:

$$L1 = f_1 = 154 f_0 = 1575.42 \text{ MHz} \quad (1)$$

$$L2 = f_2 = 120 f_0 = 1227.60 \text{ MHz} \quad (2)$$

dengan

$f_0 = 10.23 \text{ MHz}$, merupakan frekuensi asas satelit.

Kesan ionosfera pada frekuensi pembawa ditakrifkan sebagai

$$\frac{f_1}{f_2} \Delta \rho_{i,ion}^k \quad (3)$$

dengan $\Delta \rho_{i,ion}^k$ atau n_{ion} ialah ralat atau langkah isyarat yang disebabkan oleh ionosfera. Pengiraan TEC akan diterangkan pada bahagian seterusnya (Dach et al. 2015).

Data GPS dalam format *receiver independent exchange* (RINEX) yang digunakan dalam kajian ini ialah daripada stesen-stesen yang diselenggarakan oleh Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia (JUPEM). Kajian ini menumpukan pada data untuk bulan Mac, Jun, September dan Disember 2007 bagi menganalisis variasi ionosfera terhadap musim. Sebanyak 51 stesen GPS yang terdapat di Malaysia digunakan dalam analisis ini. Data GPS pada kawasan sekitar Malaysia seperti Indonesia, Singapura, Thailand, Vietnam dan Filipina diperoleh secara percuma dan dimuat turun daripada laman sesawang Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) dan IGS turut digunakan dalam kajian ini (SOPAC, IGS).

PENGIRAAN TEC

Nilai TEC boleh diperoleh daripada perbezaan antara masa langkah ($P_1 - P_2$) atau perbezaan fasa pembawa ($L_1 - L_2$) pencerapan isyarat GPS (Dach et al. 2015). TEC sendeng (slant TEC) ialah kamiran ketumpatan elektron

$$E = \int N_e(\rho) d\rho \quad (4)$$

dengan, $N_e(\rho)$ merupakan ketumpatan elektron sepanjang laluan isyarat GPS. Dalam istilah penyebaran gelombang yang berfrekuensi tinggi seperti isyarat GPS, indeks biasan

n_{ion} boleh diperkembangkan dalam frekuensi saling bagi gelombang elektromagnet sebagai

$$n_{ion} = 1 - \frac{C_x}{2} N_e f^{-2} \pm \frac{C_x C_y}{2} N_e H_0 \cos \theta f^{-3} - \frac{C_x^2}{8} N_e f^{-4} \quad (5)$$

dengan pemalar

$$C_x = \frac{e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}, C_y = \frac{\mu_0^2}{2\pi m_e} \quad (6)$$

dengan:

N_e ialah ketumpatan elektron; H_0 ialah kekuatan medan magnet; θ sudut di antara arah penyebaran gelombang elektromagnet dan vektor medan geomagnet; e ialah caj bagi satu electron; ϵ_0 ialah ketelusan dalam vakum; m_e ialah jisim elektron; dan μ_0 ialah ketelapan dalam vakum.

Jarak antara satelit dan penerima, ρ' boleh dikaitkan dengan nilai TEC dengan mengkamirkan indeks biasan, n sepanjang laluan isyarat tersebut melalui persamaan berikut:

$$\rho' = \int n(\rho) d\rho \quad (7)$$

dan juga (1) menghasilkan (7),

$$\rho' = \rho + \Delta \rho_{trop} + \Delta \rho_{ion} \quad (8)$$

Dengan

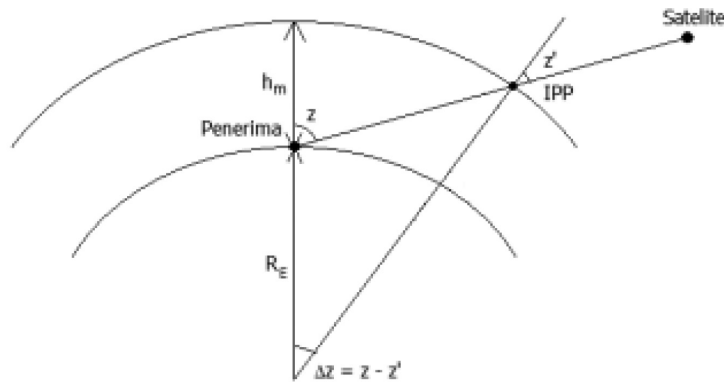
$\rho = \int d\rho$ ialah jarak geometri di antara satelit dan penerima; $\Delta \rho_{trop} = \int (n_{trop}(\rho) - 1) d\rho$ ialah langkah yang disebabkan oleh troposfera; $\Delta \rho_{ion} = \int (n_{ion}(\rho) - 1) d\rho = \mp \frac{C_x}{2} E f^{-2}$ ialah langkah

yang disebabkan oleh ionosfera; $C_x/2 \approx 40.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ berkadar terus dengan faktor berdasarkan konstan C_x ; $E = \int N_e(\rho) d\rho$ ialah TEC laluan nampak dalam nilai elektron setiap meter kuasa dua; dan f^{-2} ialah frekuensi yang merambat dalam gelombang elektromagnet.

Dalam menentukan nilai TEC pada suatu kawasan, model TEC diperlukan untuk mendapatkan nilai yang jitu dan tepat. Model yang digunakan untuk mengira nilai TEC ialah model lapisan tunggal (SLM) (Dach et al. 2015).

MODEL LAPISAN TUNGGAL

TEC di sepanjang laluan nampak isyarat daripada satelit kepada penerima mengandungi ralat dalaman penerima dan satelit. Profil ketumpatan elektron terhadap ketinggian tidak dapat diperoleh dengan pencerapan data penerima GPS sahaja. Bagi mengatasi masalah ini, SLM digunakan. SLM seperti Rajah 2 mengandaikan bahawa semua elektron bebas pada altitud berkumpul dalam satu silinder yang tertutup dengan ketebalan sangat kecil. Altitud untuk model SLM ini biasanya ditetapkan berdasarkan ketinggian yang mempunyai ketumpatan elektron yang tinggi (Dach et al 2015). Bagi kawasan Malaysia, kajian sebelum ini menggunakan nilai ketinggian yang berbeza



RAJAH 2. Model lapisan tunggal ionosfera

iaitu 350, 400 atau 450 km (Akir et al. 2017; Buhari et al. 2017; Hasbi et al. 2009). Dalam kajian ini, nilai ditetapkan pada 450 km kerana ketinggian paling ideal dan sesuai untuk diaplikasikan di kawasan khatulistiwa yang diketahui mempunyai ketumpatan elektron yang tinggi iaitu antara 300 - 450 km.

Dengan menggunakan SLM, TEC sendeng daripada pelbagai garis nampak dapat dipetakan kepada dua dimensi satah. Untuk mengatasi masalah kebergantungan terhadap sudut dongak, satu fungsi pemetaan diperkenalkan. Persamaan (9) menunjukkan fungsi pemetaan

$$F(z) = \frac{E(z)}{E_v} \text{ dan } E_v = E(0) \tag{9}$$

Nilai TEC menegak ditentukan pada titik penembusan ionosfera (IPP). IPP ialah titik persilangan garis nampak antara satelit dan penerima dengan lapisan ionosfera.

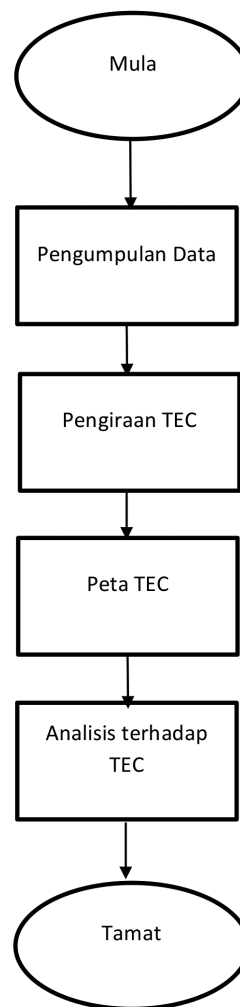
Persamaan berikut menunjukkan perkaitan di antara jarak zenit satelit, z' pada titik penembusan ionosfera dan jarak zenit penerima, z berdasarkan SLM dengan

$$\sin z' = \frac{R}{R + H} \sin z \tag{10}$$

dengan

$R \approx 6371$ km ialah min jejari bumi; dan H ialah ketinggian lapisan tunggal.

Data daripada penerima GPS dalam format RINEX dan data satelit pada tarikh kajian dikumpulkan sebelum digunakan untuk mendapatkan nilai TEC menggunakan persamaan (1) - (10). Nilai TEC dalam format IONEX disusun dalam bentuk matriks mengikut longitud dan latitud untuk setiap epoks dan diunjurkan ke atas peta rantau Malaysia. Peta rantau Malaysia dihasilkan dengan menetapkan nilai latitud dari -5° hingga 10° dan longitud dari 90° hingga 120° . Berdasarkan nilai TEC ini, satu analisis variasi harian dan musim serta variasi harian TEC terhadap aktiviti geomagnetik dan suria dijalankan. Keseluruhan pemprosesan data dan penghasilan keputusan yang dihendaki diterangkan dalam Rajah 3.



RAJAH 3. Carta alir yang menunjukkan aliran pemprosesan data untuk menghasilkan TEC dan analisis berkaitan

ANALISIS DATA DAN PERBINCANGAN
VARIASI HARIAN DAN MUSIM

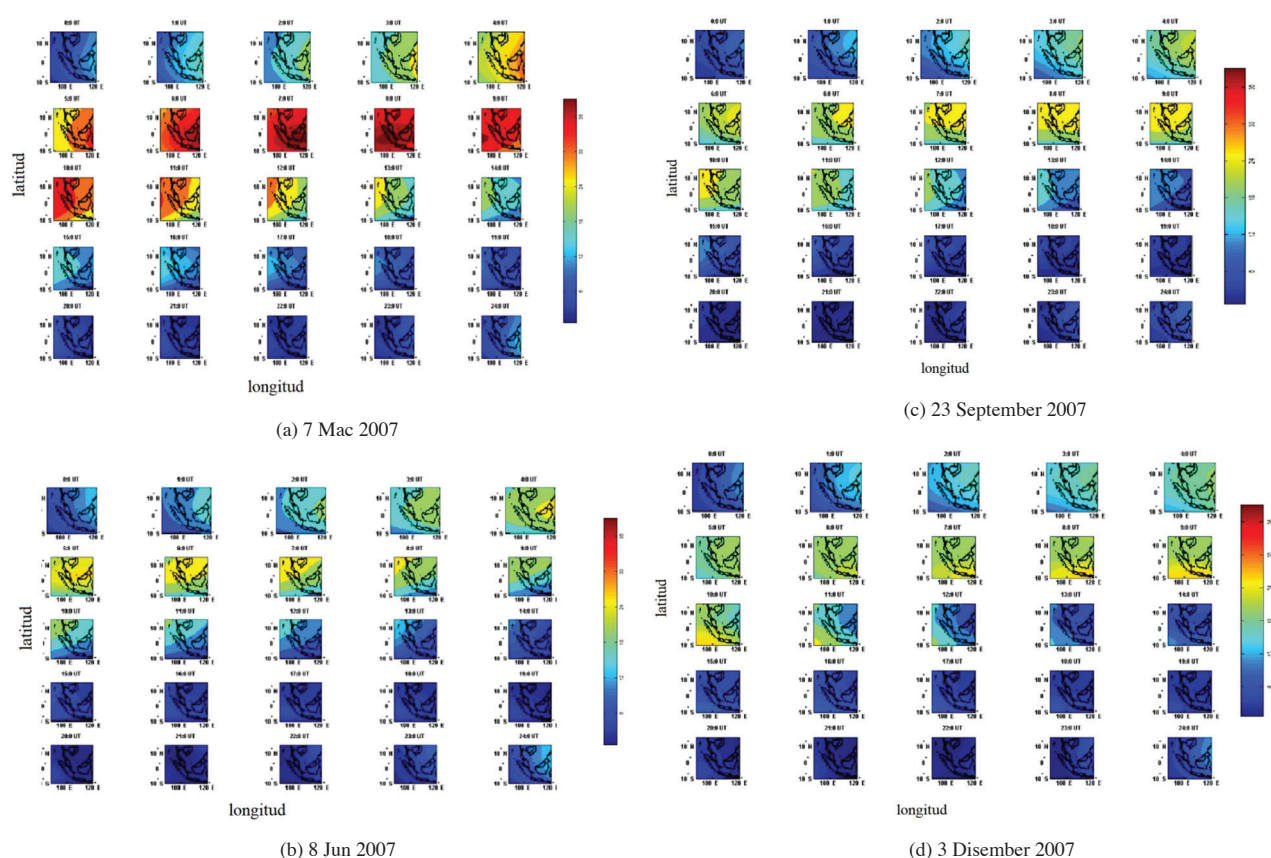
Variasi harian dan musim TEC di kawasan Malaysia telah dianalisis melalui peta harian TEC di kawasan Malaysia pada (a) 7 Mac 2007 (ekuinoкс), (b) 8 Jun 2007 (musim

panas), (c) 23 September 2007 (musim luruh) dan (d) 3 Disember 2007 (musim sejuk) seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4(a)-4(d). Tarikh yang dipilih ini mewakili variasi TEC pada hari yang geomagnetiknya tenang dan musim berbeza. Peta TEC ini dihasilkan pada latitud -16° sehingga 16° dan longitud meliputi 90° sehingga 120° dengan selang 1° untuk setiap latitud dan longitud. Peta ini dihasilkan setiap satu jam untuk 24 jam bermula dari 00:00 UT sehingga 24:00 UT. Masa kajian adalah dalam masa universal (UT) kerana masa tempatan (LT) adalah 8 jam lebih awal dari UTC.

Berdasarkan Rajah 4(a)-4(d), didapati nilai TEC pada 7 Mac 2007 direkodkan lebih tinggi berbanding dengan nilai TEC pada musim lain iaitu 36 TECU, manakala nilai TEC maksimum pada musim panas ialah 24 TECU, solstis (26 TECU) dan musim sejuk ialah 22 TECU. Nilai TEC direkodkan tinggi bermula dari arah timur sebelum bergerak ke arah barat. Nilai TEC sebelum mencapai nilai maksimum adalah berkadar terus dengan masa dengan nilai TEC semakin bertambah apabila masa semakin meningkat. Secara amnya, TEC menunjukkan peningkatan pada waktu siang tempatan dan beransur-ansur menurun selepas waktu senja. Setiap peta TEC yang ditunjukkan mempunyai variasi harian yang sama walaupun pada musim berbeza. Keputusan ini sama dengan hasil kajian yang diperolehi oleh Suparta et al. (2009) dengan waktu maksimum TEC

ialah pada waktu selepas tengah hari dan minimum pada waktu matahari terbit. Namun kajian tersebut hanya merangkumi jangka masa pendek iaitu pada 12 November sehingga 7 Disember 2007 dan hanya di satu kawasan iaitu UKM Bangi, Selangor.

Bagi mendapat gambaran dengan lebih jelas variasi harian dan musim TEC pada kawasan Malaysia, nilai purata harian TEC bagi empat musim berbeza diplotkan dan ditunjukkan dalam Rajah 5. Rajah 5 menunjukkan nilai purata TEC bagi pada empat bulan berbeza iaitu Mac (ekuinoqs), Jun (musim panas), September (musim luruh) dan Disember (musim sejuk) untuk tahun 2007. Pada bulan Mac, TEC mencapai nilai maksimum pada 0800 UT (1600 LT). Manakala pada bulan Jun, TEC mencapai nilai maksimum pada 0600 UT (1400 LT) dan pada bulan September dan Disember ialah pada 0700 UT (1500 LT). Di kawasan India, Rama Rao et al. (2006) telah menunjukkan kawasan EIA nilai maksimum TEC dicapai pada 13:00 sehingga 16:00 LT dan minimum pada 05:00 dan 06:00 LT. Selain itu, beliau juga menunjukkan untuk kawasan India, EIA puncak didapati terjadi sekitar zon latitud 15 sehingga 25 N latitud geografi (5 sehingga 15 latitud magnet bumi). Variasi harian TEC adalah disebabkan oleh pelbagai parameter seperti fluks EUV, aktiviti geomagnet, kekuatan elektrojet dan juga keadaan atmosfera dalam termosfera kawasan kajian tersebut (Abdullah et al. 2007). Selain



RAJAH 4. Peta TEC kawasan Malaysia pada empat tarikh dan musim berbeza iaitu (a) 7 Mac 2007 (ekuinoqs), (b) 8 Jun 2007 (musim panas), (c) 23 September 2007 (musim luruh) dan (d) 3 Disember 2007 (musim sejuk)

daripada itu, pada musim ekuinoks kawasan Malaysia menerima sinaran suria tepat di atas kawasan. Perubahan sudut serong suria terhadap Malaysia bumi secara jelasnya memberi kesan yang besar. Ini dikuatkan lagi dengan fakta yang mengatakan magnitud kedua-dua isyarat berbeza pada soltis, tetapi ia lebih kurang sama pada musim ekuinoks. Berdasarkan kedudukan Malaysia, bumi secara nyatanya mempunyai kesan yang jelas terhadap perubahan TEC. Ini jelas menunjukkan bahawa purata TEC berkaitan dengan masa siang dan malam hemisfera mungkin boleh digambarkan dan dianalisis menggunakan cara yang sama. Perubahan musim juga memberi kesan kepada hubungan medan elektrik dan magnet, E dan B ($E \times B$). Ketika ekuinoks, medan elektrik dan medan magnet berserenjang di kawasan Malaysia, manakala ketika soltis, medan elektrik dan medan magnet berada pada sudut yang berkurangan. Perkara ini menentukan sifat hanyutan elektron dan ini menyumbang kepada kadar proses pengionan elektron dan ion. Daripada mekanisme ini, dianggarkan bahawa kadar pelenyapan elektron berkurangan ketika ekuinoks dan dengan itu meningkatkan TEC pada waktu tersebut. Nilai TEC selepas senja juga akan berubah atas sebab yang sama. Manakala menurut Rama Rao et al. (2006), faktor kejadian anomali khatulistiwa yang kerap dan kekuatan khatulistiwa elektrojet tinggi ketika bulan ekuinoks turut menyumbang kepada fenomena ini.

Menurut Jakowski et al. (2008) bahagian bawah ionosfera adalah dikawal sepenuhnya oleh radiasi suria tempatan, manakala lapisan F2 dan bahagian atas ionosfera adalah kurang cenderung kepada radiasi suria dan lebih dipengaruhi oleh proses taburan semula plasma. Di kawasan anomali khatulistiwa, proses pengangkutan plasma turut mendominasi proses fotokimia. Medan elektrik pada kawasan khatulistiwa turut memainkan peranan dalam proses pengionan dengan peningkatan medan elektrik menyebabkan proses pengionan kembali berlaku.

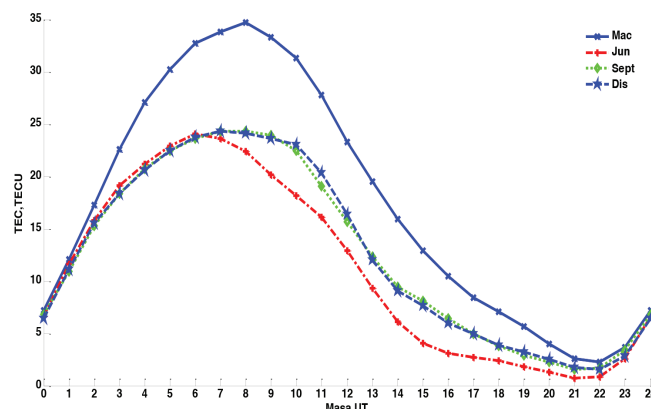
Zhao et al. (2007) menyatakan bahawa jika berdasarkan ramalan teori Chapman, lapisan F2 ionosfera ialah 'anomalous' daripada hanya menyatakan ia dikawal sepenuhnya oleh sudut zenit suria. Menurut Zhao et al. (2007) juga, TEC pada kawasan anomali iaitu melibatkan kawasan pada $\pm 10^\circ \sim 15^\circ$ magnetik latitud mencapai nilai maksimum pada waktu selepas tengah hari. Selain itu, hasil kajian Lal (1997) menunjukkan bahawa EUV daripada suria hanya menyumbang sebanyak 62% (ekuinoks), 75% (musim panas) dalam menghasilkan ion dan ini menunjukkan bahawa terdapat tenaga kedua yang turut menyumbang kepada proses penghasilan ion. Variasi ionosfera boleh dikawal oleh proses dalaman iaitu dalam bentuk pergerakan dan perubahan kimia berdasarkan penyerapan radiasi ionosfera dalam termosfera dan proses luar daripada termosfera, seperti gangguan magnetosfera ataupun gelombang dan pasang surut di bawah ionosfera. *Equatorward* mengerakkan angin neutral ketika ekuinoks dan menentang pergerakan *poleward* seterusnya memberi kesan kepada proses pengionan sepanjang garis medan magnet. Ini akan melambatkan pembentukan anomali khatulistiwa dan meningkatkan ketumpatan plasma pada

kawasan khatulistiwa, yang mungkin menyebabkan nilai maksimum TEC pada kawasan khatulistiwa ini adalah selepas tengah hari.

Pada waktu malam dan pagi, hanyutan elektromagnet $E \times B$ menggerakkan plasma daripada latitud tengah magnetik bumi kepada latitud rendah magnetik bumi dan penyebaran plasma merosot sepanjang garisan medan magnetik. Pada waktu malam juga, seperti yang diketahui umum berlaku proses pengabungan semula yang menyebabkan kadar kehilangan ion adalah tinggi. Kemerosotan hanyutan $E \times B$ pada waktu malam dan pagi menjadi penyebab utama kepada penurunan TEC pada waktu malam sehingga menjelang pagi.

Kajian yang dijalankan oleh Sharma et al. (2005) yang mengkaji suhu ion dan elektron di lapisan F ionosfera pada kawasan India ketika suria minimum tahun 1995 - 1996 mendapati bahawa suhu ion dan elektron adalah berkadar songsang dengan ketumpatan elektron, semakin tinggi suhu dicatat, semakin rendah nilai ketumpatan elektron. Maka, waktu suhu ion dan elektron tinggi menunjukkan nilai keamatan elektron pada ketika itu adalah rendah. Suhu ion dan elektron tinggi pada waktu awal pagi dan juga malam serta ketumpatan elektron pada waktu tersebut direkodkan rendah. Ketumpatan elektron rendah ketika awal pagi juga adalah kerana fotoelektron berkongsi tenaga dengan elektron sekeliling, menyebabkan suhu elektron meningkat dan peningkatan suhu ini drastik pada awal pagi. Selain itu, gas neutral lebih cepat terbentuk berbanding ion pada waktu pagi (0500 LT sehingga 0700 LT) turut menyumbang kepada variasi harian TEC yang rendah pada awal pagi. Penghasilan fotoelektron bermula pada waktu suria terbit melalui pengionan zarah neutral.

Rajah 5 juga menunjukkan nilai VTEC pada bulan Disember (musim sejuk) adalah lebih tinggi daripada bulan Jun (musim panas). Ketumpatan plasma akan meningkat pada kawasan hemisfera yang mengalami musim panas dan berkurang pada kawasan hemisfera yang mengalami musim sejuk. Oleh yang demikian, tindak balas pengionan berlaku pada julat yang rendah dengan meningkatnya altitud. Ini menyebabkan nilai kandungan elektron pada soltis musim sejuk (Disember) adalah lebih tinggi berbanding soltis musim panas (Jun). Selain itu, anomali ketika musim sejuk lebih kuat atau kerap terjadi berbanding ketika musim panas (Wu et al. 2004). Nilai TEC yang rendah diperolehi ketika musim panas berbanding musim sejuk kerana angin neutral dan juga kejadian anomali khatulistiwa yang tinggi. Ketumpatan plasma kawasan lapisan F ionosfera ketika siang lebih tinggi pada musim sejuk berbanding musim panas. Fenomena ini dikenali sebagai anomali musim sejuk atau anomali bermusim. Anomali musim sejuk adalah disebabkan oleh variasi bermusim komposisi neutral dalam lapisan termosfera. Nisbah $[O]/[N_2]$ ketika musim sejuk lebih tinggi berbanding musim sejuk kerana berlakunya aliran musim panas kepada musim sejuk di lapisan ini mengakibatkan berlaku gerakan ke atas pada hemisfera yang mengalami musim panas dan gerakan ke bawah pada kawasan hemisfera yang mengalami musim sejuk (Devi et al. 2002).



RAJAH 5. Purata TEC Malaysia ketika suria minimum pada Mac, Jun, September dan Disember 2007

Kajian ini dijalankan ketika aktiviti suria adalah pada tahap minimum. Namun, nilai TEC yang diperoleh masih menunjukkan pelbagai variasi. Oleh yang demikian, perubahan TEC terhadap variasi aktiviti suria dan magnet bumi dilakukan dan dibincangkan pada bahagian seterusnya.

PERUBAHAN TEC TERHADAP VARIASI MAGNET BUMI DAN AKTIVITI SURIA

Kebolehubahan aktiviti suria dan hubungannya dengan ionosfera sentiasa mendapat perhatian para penyelidik ionosfera. Variasi suria didapati lebih memberi kesan terhadap perubahan TEC berbanding dengan variasi geomagnetik. TEC harian berkorelasi dengan fluks suria dengan nilai korelasi ialah 0.87 (Ho 2003). Hasil kajian tersebut juga menunjukkan solar fluks dan bilangan tompok matahari berkorelasi baik dengan TEC ketika aktiviti suria rendah berbanding ketika aktiviti suria tinggi.

Berdasarkan kajian yang disebutkan sebelum ini serta keputusan yang diperoleh, kajian perubahan TEC terhadap variasi aktiviti suria dan variasi magnet diteruskan dengan menggunakan data ketika aktiviti suria adalah minimum. Secara umumnya, tahap aktiviti suria boleh diketahui melalui beberapa parameter untuk mengelaskan sinar suria dan cuaca angkasa lepas berdekatan dengan bumi. Dalam kajian ini, empat indeks dikaji iaitu dua mewakili geomagnetik indeks iaitu DST dan KP manakala dua lagi mewakili indeks suria iaitu SSN dan F10.7. Kesedaran regresi, R^2 digunakan untuk mengkaji kesan indeks kepada TEC di Malaysia.

Jadual 1 menunjukkan nilai R^2 antara indeks geomagnetik dan suria terhadap TEC. Data geomagnet

DST dan KP diperoleh daripada laman sesawang World Data Center for Geomagnetism (WDC) yang berpangkalan di Tokyo, Jepun (WDC 2017). Manakala, data suria SSN dan F10.7 diperoleh dari laman sesawang Space Weather Prediction Center (SWPC) (SWPC 2017). Nilai regresi, R^2 menunjukkan nilai yang rendah bagi semua indeks. Indeks yang mempunyai R^2 tinggi ialah SSN pada Disember 2007 dengan bacaan 0.410, manakala nilai R^2 yang paling rendah ialah KP dan juga SSN iaitu pada September 2007.

Nilai korelasi yang rendah adalah kerana, berdasarkan NOAA, nilai KP dicerap daripada 13 stesen geomagnetik yang berada antara 44° dan 66° utara atau selatan latitud geomagnetik dan ia tidak termasuk kawasan Malaysia, maka nilai KP untuk kawasan Malaysia adalah dilicinkan dan dianggarkan (NOAA 2017). Kebergantungan TEC terhadap variasi indeks KP bergantung kepada musim, tempat dan juga masa tempatan (Afraimovich et al. 2008). Berdekatan dengan kawasan magnet khatulistiwa, kejadian ketidakseragaman penyebaran isyarat pada lapisan F adalah berkadar songsang dengan aktiviti magnet bumi (Davies 1996) dan kolerasi antara ketaksekatan penyebaran isyarat pada lapisan F dan aktiviti magnet bumi adalah tinggi ketika musim luruh dan ekuinoks musim bunga. Manakala, pada soltis musim panas, kolerasi antara ketaksekatan penyebaran isyarat pada lapisan F dan aktiviti magnet bumi adalah sederhana dan lemah dalam musim sejuk. Hasil penemuan Davies (1996) ini menyokong hasil kajian yang diperoleh di Malaysia.

Pada kawasan berhampiran dengan medan magnet, pengaruh SSN dapat dilihat melalui gangguan medan magnet terhadap TEC. Kawasan Malaysia yang mengalami gangguan medan magnet boleh membesar (daripada segi

JADUAL 1. Kesedaran regresi R^2 antara indeks geomagnetik dan suria terhadap TEC

Bulan / Indeks	Mac	Jun	September	Disember
DST	0.253	0.0580	0.156	0.0230
KP	0.00004	0.026	0.000	0.007
SSN	0.147	0.087	0.000	0.410
F10.7	0.390	0.165	0.042	0.361

keluasan kawasan yang terlibat) dengan meningkatnya SSN dan keamatannya (Davies 1996). Pada bulan Mac dan September, korelasi R² antara nilai TEC dengan F10.7 ialah 0.390 untuk Mac dan 0.042 untuk bulan September. Manakala, nilai korelasi bagi bulan Jun juga adalah rendah iaitu 0.165 dan 0.361 pada bulan Disember. Nilai R² pada kali ini juga adalah rendah dengan yang paling tinggi dicatatkan ialah 0.410 (Disember), manakala tiada korelasi pada bulan September. Menurut Briggs (1964), melalui Davies (1996) menyatakan kebergantungan terhadap SSN adalah lebih kuat ketika musim panas berbanding musim sejuk. Selain itu, ini juga mungkin disebabkan oleh kewujudan secara semula jadi kawasan ionosfera termosfera yang inersia seterusnya menyebabkan parameter ionosfera iaitu TEC tidak berubah secara terus dengan fluks suria.

KESIMPULAN

Hasil kajian menunjukkan perubahan TEC yang ketara terhadap perubahan harian, musim, aktiviti suria serta medan magnet di kawasan Malaysia walaupun ketika solar minimum. TEC mencapai nilai maksimum selepas waktu tengah hari, 1400 LT dan tinggi pada ekuinoks serta rendah pada musim panas adalah kerana aktiviti medan magnet dan angin neutral serta anomali khatulistiwa. Kesan indeks aktiviti geomagnetik Dst, Kp dan juga pancaran suria, F10.7 terhadap variasi nilai purata TEC juga dikaji dalam kertas ini dengan hasil kajian mendapati pada aktiviti suria adalah minimum, indeks geomagnet tidak memberi kesan yang ketara kepada TEC. Hasil kajian pada suria minimum ini boleh dijadikan penanda aras untuk mengetahui perubahan TEC atau ionosfera ketika suria maksimum. Kajian tentang ionosfera ketika suria maksimum perlu dijalankan di Malaysia menggunakan data GPS bagi menghasilkan peta TEC di rantau Malaysia untuk hampir masa nyata.

PENGHARGAAN

Pengarang mengucapkan terima kasih kepada pihak Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia, International Global Navigation Satellite System (GNSS) Service (IGS) dan Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) atas kebenaran menggunakan data penerima GPS. Kajian ini disokong oleh geran GUP-2015-052 melalui Universiti Kebangsaan Malaysia.

RUJUKAN

- Abdullah, M., Mat, D.A.A., Zain, A.F.M., Abdullah, S. & Zulkifli, S.S.N. 2007. Analysis of ionospheric models during ionospheric disturbances. *Proceeding of 2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetic*. hlm. 1-5.
- Afraimovich, E.L., Astafyeva, E.I., Oinats, A.V., Yasukevich, Y.V. & Zhivetiev, I.V. 2008. Global electron content: A new conception to track solar activity. *Annales Geophysicae* 26: 335-344.
- Akir, R.M., Abdullah, M., Chellappan, K., Hasbi, A.M. & Bahari, S.A. 2017. Comparative study of TEC for GISTM stations in the Peninsular Malaysia region for the period of January 2011 to December 2012. *Advanced Science Letters* 23: 1304-1309.
- Bahari, S.A., Abdullah, M. & Hasbi, A.M. 2015. A review of ionospheric studies in Malaysia using GPS. *Proceeding of the 2015. International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*. hlm. 95-100.
- Buhari, S.M., Abdullah, M., Yokoyama, T., Otsuka, Y., Nishioka, M., Hasbi, A.M., Bahari, S.A. & Tsugawa, T. 2017. Climatology of successive equatorial plasma bubbles observed by GPS ROTI over Malaysia. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 122(2): 2174- 2184.
- Chaitanya, P.P., Patra, A.K., Balan, N. & Rao, S.V.B. 2015. Ionospheric variations over Indina low latitudes close to the equator and comparison with IRI-2012. *Annales Geophysicae* 33: 997-1006.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P. & Fridez, P. 2015. *Manual of Bernese GPS Software Version 5.2*. Switzerland: Astronomical Institute, University of Bern.
- Davies, K. 1996. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd.
- Devi, M., Barman, M.K. & Barbara, A.K. 2002. Identification of quiet and disturbed days through IEC profile features over anomaly crest region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64: 1413-1423.
- Elmunim, N.A., Abdullah, M., Hasbi, A. & Bahari, S.A. 2017. Investigation on the implementation of the Holt-Winter method for ionospheric delay forecasting. *Advanced Science Letters* 23: 1325-1328.
- Hasbi, A.M., Momani, M.A., Mohd Ali, M.A., Misran, N., Shiokawa, K., Otsuka, Y. & Yumoto, K. 2009. Ionospheric and geomagnetic disturbances during the 2005 Sumatran earthquakes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71: 1992-2005.
- International GNSS Service (IGS), 2017. <http://www.igs.org/products>. Diakses pada 16 Ogos 2017.
- Lal, C. 1997. Contribution to F2 layer ionization due to the solar wind. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* 59: 2203-2211.
- Momani, M.A., Mohd Ali, M.A., Yatim, B., Abdullah, M. & Misran, N. 2008. GPS observations at quasi-conjugate points under disturbed conditions. *Acta Geophysica* 56(4) : 1179-1201.
- Rama Rao, P.V.S., Krishna, S.G., Niranjan, K. & Prasad, D.S.V.V.D. 2006. Temporal and spatial variations in TEC using simultaneous measurements from the Indian GPS networks of receivers during the low solar activity period of 2004-2005. *Annales Geophysicae* 24: 3279-3292.
- Sharma, D.K. & Rai, J., Israil, M. & Subrahmanyam, P. 2005. Diurnal, seasonal and latitudinal variations of ionospheric temperatures of the topside F region over the Indian region during solar minimum (1995-1996). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67: 269-274.
- Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC). 2017. <http://sopac.ucsd.edu/>. Diakses pada 16 Ogos 2017.
- Space Weather Prediction Center (SWPC). 2017. <http://www.swpc.noaa.gov/> Diakses pada 16 Ogos 2017.
- Suparta, W., Yatim, B. & Mohd Ali, M.A. 2009. Pemantauan dan pencirian cuaca-angkasa di kawasan UKM Bangi, Selangor menggunakan GPS. *Sains Malaysiana* 38(4): 463-471.
- World Data Center for Geomagnetism (WDC). 2017. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> Diakses pada 16 Ogos 2017.

Wu, C.C., Fry, C.D., Liou, K. & Tseng, C.L. 2004. Annual TEC variation in the equatorial anomaly region during the solar minimum. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 66: 199-207.

Zhao, B., Wan, W., Liu, L., Mao, T., Ren, Z., Wang, M. & Christensen, A.B. 2007. Features of annual and semiannual variations derived from the global ionospheric maps of total electron content. *Annales Geophysicae* 25: 2513-2527.

Siti Aminah Bahari* & Mardina Abdullah
Space Science Center
Institute of Climate Change
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

Baharudin Yatim
Pusat Pengajian Fizik
Fakulti Sains dan Teknologi
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: sitiaminahbahari@ukm.edu.my

Diserahkan: 8 Mac 2017
Diterima: 20 September 2017