

## Permulaan Gelembung Plasma Khatulistiwa Semasa Angin Neutral Kuat dan Lemah di Asia Tenggara

(Equatorial Plasma Bubble Onset During Strong and Weak Neutral Winds Over Southeast Asia)

Idahwati Sarudin<sup>a\*</sup>, Nurul Shazana Abdul Hamid<sup>b,c</sup>, Mardina Abdullah<sup>c,d</sup>, Suhaila M Buhari<sup>e</sup>, Yuichi Otsuka<sup>f</sup>, Septi Perwitasari<sup>g</sup> & Clara Yatini<sup>h</sup>

<sup>a</sup>*School of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Pulau Pinang, Malaysia,*

<sup>b</sup>*Department of Applied Physics, Faculty of Science and Technology,*

<sup>c</sup>*Space Science Centre (ANGKASA), Institute of Climate Change,*

<sup>d</sup>*Department of Electrical, Electronic and Systems Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Malaysia*

<sup>e</sup>*Department of Physics, Faculty of Science, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM, Skudai, Johor, Malaysia*

<sup>f</sup>*Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan*

<sup>g</sup>*National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan*

<sup>h</sup>*Research Center for Space (BRIN), Bandung, Indonesia*

\*Corresponding author: [idahwati@usm.my](mailto:idahwati@usm.my)

Received 19 June 2023, Received in revised form 5 February 2024  
Accepted 15 March 2024, Available online 30 May 2024

### ABSTRAK

Gelembung plasma khatulistiwa (EPBs), merupakan pengurangan ketumpatan plasma di ionosfera yang mengganggu gelombang radio, menunjukkan dinamika kompleks yang mungkin dipengaruhi oleh angin neutral. Kajian ini bertujuan untuk menyiasat hubungan antara permulaan EPBs dan halaju angin neutral. Permulaan EPBs ditentukan daripada Kadar Perubahan Jumlah Kandungan Elektron (ROTI) keogram yang diperoleh menggunakan data Sistem Penentuan Global (GPS) di sektor Asia Tenggara. Sementara itu, angin neutral termosfera diukur menggunakan Fabry-Perot Interferometer (FPI) dan ketinggian lapisan F diperoleh daripada ionosonde, kedua-dua alat berada di Kototabang (KTB), Indonesia. Pemerhatian diklasifikasikan kepada dua kes berdasarkan kekuatan angin: angin kuat dan lemah pada malam yang berbeza. Kajian ini berjaya melaporkan masa dan lokasi permulaan EPBs berlaku pada 1320 UT (2120 LT) dan 100° (500 km) longitude, disebabkan oleh pra peningkatan pembalikan (PRE). Kami menyimpulkan bahawa angin neutral termosfera memberikan sumbangan yang signifikan kepada permulaan EPBs yang diperhatikan di mana bergerak ke arah zonal. Oleh itu, penemuan ini mengukuhkan kajian-kajian lepas yang menunjukkan peningkatan ketinggian lapisan F dapat memainkan peranan penting dalam menentukan permulaan EPBs.

Kata kunci: Gelembung plasma khatulistiwa; halaju angin neutral; Asia Tenggara

## ABSTRACT

*Equatorial plasma bubbles (EPBs), which are depletions in the ionosphere disrupting radio waves, exhibit complex dynamics influenced by neutral winds. The present study aims to investigate the relationship between the onset of EPBs and the velocities of neutral winds. The onset of EPBs was determined from the rate of the Total Electron Content Index (ROTI) keogram obtained using Global Positioning System (GPS) data over the Southeast Asia sector. Meanwhile, thermospheric neutral winds were measured using a Fabry-Perot interferometer (FPI), and the height of the F layer was acquired from an ionosonde, both instruments positioned in Kototabang (KTB), Indonesia. The observations are classified into two cases based on the strength of winds: strong and weak winds on different nights. This study successfully reported the onset time and location of EPBs occurred at 1320 UT (2120 LT) and 100° (500 km) longitude, attributed to pre-reversal enhancement (PRE). We conclude that thermospheric neutral wind makes a significant contribution to the observed onsets of EPBs driven in the zonal direction. Therefore, this finding reinforces past studies that have shown an increase in the height of the F layer could play an important role in determining the onset of EPBs.*

*Keywords: Equatorial plasma bubbles onset; neutral winds velocities; Southeast Asia*

## PENGENALAN

Pengurangan ketumpatan plasma di kawasan lapisan F ionosfera yang diperhatikan di khatulistiwa selepas Matahari terbenam dikenali sebagai gelembung plasma khatulistiwa (EPB). Medan elektrik zonal adalah pengawal utama perkembangan dan evolusi EPB. Di kawasan E dan F, angin neutral yang bergerak merentasi garisan medan magnet menghasilkan medan elektrik (tindakan dinamo) (Rishbeth et al. 1972; Heelis et al. 1974). Kajian pertama yang dijalankan oleh Rishbeth pada tahun 1971 menunjukkan bahawa angin neutral arah timur di kawasan khatulistiwa, yang bertiup merentasi medan magnet, menyebabkan hanyutan ion melintang perlahan berserenjang dengan kedua-dua angin neutral dan medan magnet, mengakibatkan polarisasi medan elektrik diarahkan menegak ke bawah. Medan elektrik ke bawah ini menyebabkan plasma hanyut ke arah timur, arah yang sama dengan angin neutral. Pada waktu malam, ionosfera tidak stabil kerana kecerunan ketumpatan plasma adalah ke atas dan arus ionosfera mengalir ke arah timur. Tambahan pula, selepas Matahari terbenam, lapisan F2 khatulistiwa mengalami kenaikan yang cepat disebabkan oleh peningkatan halaju menegak pada waktu petang yang dipanggil sebagai pra peningkatan pembalikan (PRE), yang memberi peluang dalam pembentukan ketidakstabilan plasma (contohnya, Fesen et al. 2000). Woodman. (1970) mendapati bahawa PRE, iaitu peningkatan yang ketara ke atas halaju ion menegak yang berlaku dengan cepat selepas Matahari terbenam, merupakan ciri unik dalam ionosfera latitud rendah. Struktur EPB biasanya dapat diperhatikan selepas PRE untuk medan elektrik zonal (Heelis et al. 1974; Fesen et al. 2000). Peningkatan yang berkaitan dengan bahagian bawah ionosfera dipanggil sebagai peningkatan selepas waktu senja (PSSR), dipercayai antara salah satu faktor terpenting yang bertanggungjawab terhadap permulaan EPB (Basu et al. 1983; Fejer et al. 1999).

Semasa fasa permulaan yang berlaku sekitar penghujung PSSR, struktur EPB yang pertama iaitu pada waktu petang dapat diperhatikan (Tsunoda, 1981, 2015).. Walau bagaimanapun, kejadian EPB berbeza dari hari ke hari (Magdaleno et al., 2017; Abdu, 1983). Fenomena ini telah disiasat secara meluas selama beberapa dekad menggunakan peralatan yang berbeza seperti radar serakan balik (EAR), pengimejan cahaya teja (ASI) dan satelit (Mukherjee et al. 1997; Immel et al. 2004; Muralikrishna et al. 2007; Sharma et al. 2014; Mersha et al. 2020; Yeboah et al. 2021).

Kajian terdahulu cenderung untuk menyiasat kejadian EPB menggunakan teknik pengimejan (Otsuka et al. 2004; Chapagain et al. 2011, 2012a, 2012b; Wu et al. 2014; Hosokawa et al. 2020), dan seterusnya dibandingkan dengan data berasaskan dasar lain seperti angin neutral termosfera yang diperoleh daripada Fabry-Perot Interferometer (FPI) (Mukherjee et al. 1997; Fukushima et al. 2015; Barros et al. 2018; Sarudin et al. 2021). Semasa tempoh evolusi EPB pada awal petang, mereka mendapati bahawa halaju angin neutral adalah lebih tinggi daripada halaju hanyutan EPB. Dengan itu, mereka membuat kesimpulan bahawa dinamo lapisan F tidak diaktifkan sepenuhnya. Kajian terdahulu menggunakan data satelit telah melaporkan sekumpulan EPB dijana berhampiran garis puncak Matahari terbenam dan EPB wujud sepanjang waktu malam sehingga waktu Matahari hampir terbit (06:00–08:00 LT) (Huang et al. 2013b). Selain itu, terdapat kajian terbaru oleh Das et al. (2022) yang menunjukkan bahawa ketinggian yang lebih tinggi dari bahagian bawah lapisan F (dengan 50–60 km) telah diperhatikan di sekitar Gadanki dikaitkan dengan pertumbuhan EPB. Dengan itu, kemajuan teknologi dan teknik yang terkini iaitu dengan mempunyai data yang lebih komprehensif berbanding julat alatan yang terhad dalam kajian lepas adalah penting untuk kajian pada masa kini. Oleh itu, data dengan liputan yang luas dan perbandingan dengan ukuran yang berbeza ini dapat menjelaskan masa permulaan dan lokasi permulaan EPB dalam kajian semasa.

Dalam kajian ini, kami mendedahkan pemerhatian EPB berdasarkan keogram ROTI menggunakan kira-kira 130 stesen penerima daripada data rangkaian sistem penentu kedudukan global (GPS) di Asia Tenggara (SEA) termasuk rangkaian *Real-Time Kinematics GNSS Network Malaysia* (MyRTKnet), *Sumatran GPS Array* (SuGAR), dan *International GNSS Service* (IGS). Selain itu, angin neutral termosfera diukur menggunakan FPI dan ketinggian lapisan F diperoleh daripada *ionosonde*. Kami melaporkan fasa permulaan dari segi masa dan lokasi EPB daripada perbandingan pemerhatian serentak dengan mengelaskan analisis kepada dua kes iaitu kes angin kuat dan lemah. Fasa permulaan dalam kerja ini merujuk kepada gelembung yang bergerak ke arah timur selepas ia berjaya terbentuk di sekitar khatulistiwa. Tingkah laku PRE adalah sebagai penunjuk (*indicator*) pertumbuhan EPB difahami dengan baik daripada pemerhatian, manakala pengetahuan tentang kejanggalan adalah terhad kerana kekurangan pemerhatian di bahagian bawah lapisan ionosfera. Memandangkan kajian ini menggunakan rangkaian penerima GPS berkepadatan tinggi di Asia Tenggara, kami dapat meneliti dan menggambarkan fasa permulaan EPB dengan lebih tepat, yang tidak dapat diperhatikan oleh kajian terdahulu kerana alatan dan data yang terhad. Di samping itu, kajian ini penting dan sangat berguna dalam sudut pandangan permodelan saintifik.

#### KAEDAH KAJIAN

##### PEMERHATIAN TERHADAP GELEMBUNG PLASMA Khatulistiwa

MyRTKnet mempunyai lebih daripada 78 stesen penerima GPS di seluruh Malaysia. Data GPS dari Singapura, Indonesia dan Thailand dikumpul daripada rangkaian IGS dan SuGAR yang dimuat turun dari pangkalan data *Scripps Orbit and Permanent Array Center* (SOPAC) melalui laman sesawang <http://sopac.ucsd.edu/>. Jumlah kandungan elektron (TEC) diperoleh di sepanjang garis penglihatan antara penerima dan satelit, dengan mengambil kira  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elektron/m}^2$  untuk dua isyarat yang disampaikan oleh satelit (Sarudin et al. 2020). Data fasa pembawa yang menyediakan pengukuran TEC berkepadatan tinggi digunakan untuk mengira TEC. Turun naik yang berskala kecil di dalam struktur EPB boleh dikenal pasti daripada pengukuran TEC berkepadatan tinggi.

Struktur EPB memanjang di arah utara ke selatan dan bergerak ke arah timur dengan masa (cth., Otsuka et al. 2004; Buhari et al. 2014). Kadar perubahan TEC (ROT) diperolehi untuk setiap 30 saat. ROT dirumuskan oleh perbezaan TEC dengan masa. Seterusnya, dengan menggunakan kaedah yang diterangkan oleh Nishioka et

al. (2008) dan kemudian diikuti oleh Buhari et al. (2014) di mana sisihan piawai ROT diambil pada masa selang 5 minit untuk memperolehi kadar indeks perubahan TEC atau peta ROTI keogram. Evolusi ROTI biasanya diperhatikan pada 2000 LT. Struktur awal EPB diperhatikan pada  $104^\circ\text{T}$  dan diikuti oleh struktur berikutnya yang bergerak ke arah barat yang mengikuti garis puncak Matahari terbenam (Yokoyama et al. 2006; Buhari et al. 2014). Kajian ini memberi tumpuan kepada kajian kes ROTI keogram yang diperolehi daripada rangkaian GPS untuk penyiasatan berkenaan permulaan EPB. Keogram ROTI dibentuk dengan memilih profil mendatar ROTI pada latitud  $5^\circ\text{U}$ . Penerangan terperinci tentang keogram ROTI yang dihasilkan diterangkan oleh Sarudin et al. (2020). Pada tarikh ini nilai Kp berjulat dari 0 hingga 27, nilai Dst di antara -21 hingga 12 dan nilai parameter F10.7 ialah 109.3 iaitu menandakan bahawa hari tersebut adalah hari senyap (Rizal et al. 2020; Nasuddin et al. 2023). Manakala, waktu dalam kajian ini dipamerkan sebagai waktu sejagat (*Universal Time, UT*). Berdasarkan keratan rentas ROTI, kehadiran EPB disahkan dengan julat ambang ROTI antara 0.04 dan 0.07 TECU/minit dalam keogram. Nilai julat ini adalah penting untuk menjelaskan kehadiran EPB di kawasan pemerhatian (Buhari et al. 2017).

#### PENGUKURAN TERHADAP HALAJU ANGIN NEUTRAL

Keadaan latar belakang termosfera seperti angin neutral dan suhu dikaji menggunakan data yang diperoleh daripada FPI. FPI (FP03) beroperasi di Kototabang, Indonesia berada di bawah *Optical Mesosphere Thermosphere Imagers* (OMTIs) (Shiokawa et al. 2012) dan dikendalikan oleh *Institute for Space-Earth Environmental Research* (ISEE), Nagoya University. FPI menggunakan CCD yang disejukkan pada  $-80^\circ\text{C}$  dan etalon dengan diameter 70 mm. Penapis gangguan yang melepasi pelepasan 630 nm dengan lebar jalur 2.5 nm digunakan. Pengimbas langit yang diletakkan di atas optik terdiri daripada dua motor dan dua cermin selari  $45^\circ$  untuk membolehkan paksi optik FPI ditujukan ke mana-mana arah di langit. Pengimbas langit ini dipasang pada bahagian atas FPI, yang menghala ke utara (U), selatan (S), timur (T) dan barat (B) dengan masa pendedahan, 3.5 minit. Etalon Fabry-Perot dibuat oleh teknologi optik dengan jarak, 15 mm. Oleh itu, 10 gangguan pinggir telah digunakan sebagai imej piksel CCD  $1024 \times 1024$ . Peralihan doppler bagi pancaran cahaya udara 630-nm menyebabkan peralihan lokasi puncak di 10 gangguan pinggir ini. Lokasi puncak gangguan pinggir yang berintegrasi secara azimut ditentukan oleh prosedur *Gaussian-fitting* yang sesuai. Kemudian halaju angin zonal dan meridional dikira dengan mengambil perbezaan lokasi

puncak pinggir bagi pinggir T dan B serta pinggir U dan S, masing-masing Sarudin et al. (2022). Memandangkan 10 halaju angin neutral (zonal) bebas dari 10 gangguan pinggir diperolehi, purata dan sisihan piawai dari 10 halaju ini dapat dikira. Perincian prosedur pemprosesan data ini diterangkan oleh Shiokawa et al. (2012).

#### PENGUKURAN TERHADAP KETINGGIAN LAPISAN F IONOSFERA

*Ionosonde* terletak di Kototabang (KTB), Indonesia dan telah dipasang sejak 2004 dengan geografi (longitud 100.3 darjah timur, geografi (latitud 0.2 darjah selatan dan geomagnet (latitud) 10.0 darjah selatan. *Ionosonde* ini adalah sebahagian daripada projek *Southeast Asia Low-latitude Ionospheric Network* (SEALION) yang dimiliki oleh *National Institute of Information and Communications Technology* (NICT), Jepun. Gelombang radio yang dihantar oleh *ionosonde* (2 hingga 30 MHz) menerima gema dari ionosfera untuk mengumpul maklumat seperti profil ketumpatan plasma bawah. Walau bagaimanapun, dalam kajian ini kami menggunakan ketinggian maya untuk menyokong perbincangan. Jenis antena yang digunakan ialah antena delta setinggi 30 m. Bagi mengelakkan sebarang gangguan radio dengan alatan lain di kawasan stesen KTB, frekuensi tertinggi dihadkan kepada 20 MHz. Dalam kerja ini, ketinggian maya lapisan F ( $h'F$ ) digunakan untuk menunjukkan variasi ketinggian di bahagian bawah lapisan F (Dao et al. 2017). Puncak yang menaik dengan ketara dalam halaju ion menegak yang diperhatikan dari variasi  $h'F$  dianggap sebagai peristiwa PRE. Apabila puncak (variasi  $h'F$  dalam waktu tempatan) lebih tinggi daripada 325 km, Saito et al. (2006) mengklasifikasi ikasikan PRE adalah kuat.

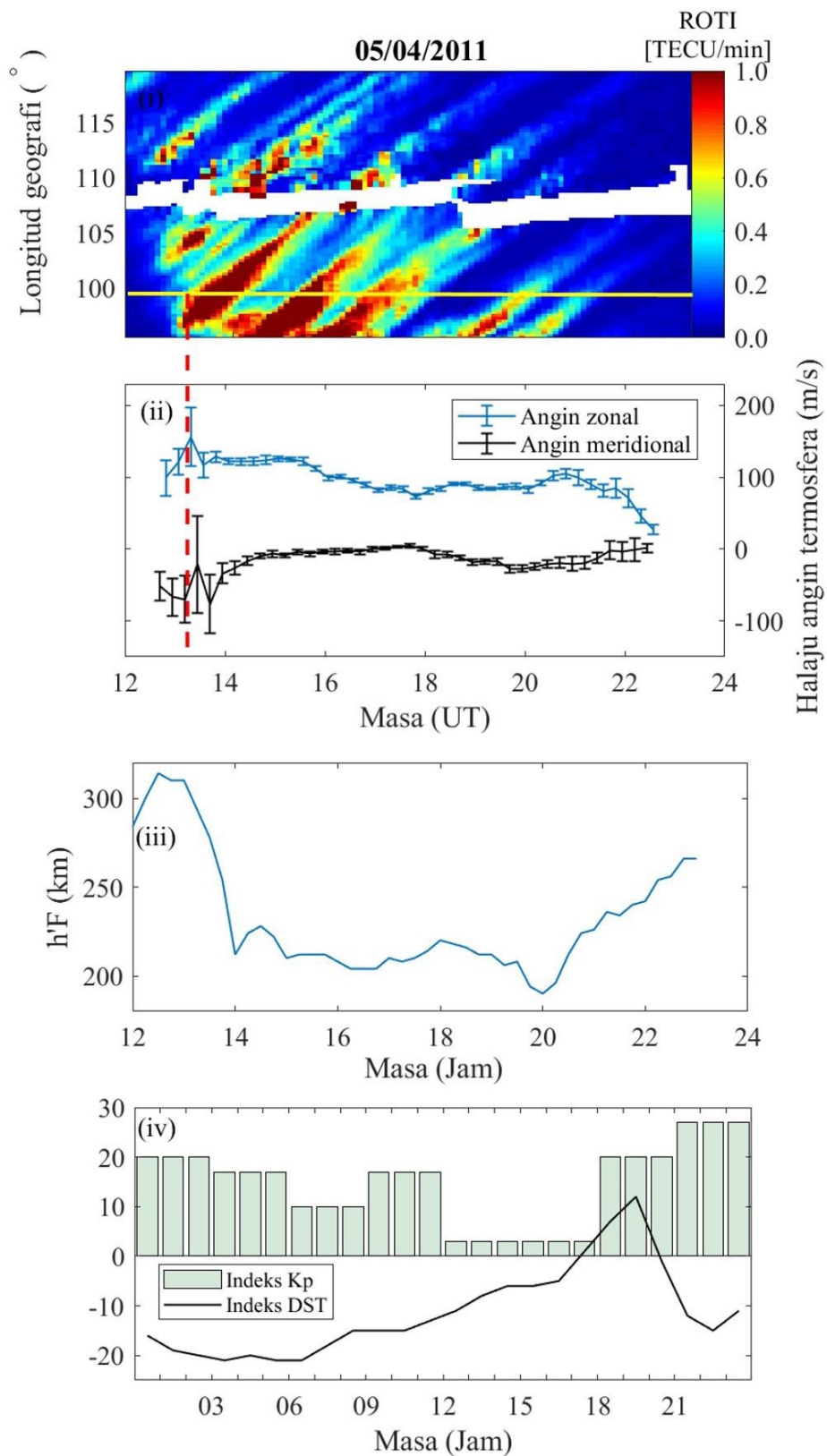
#### KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

##### ANGIN KUAT

Kami secara serentak memerhatikan EPB menggunakan pengukuran ROTI GPS daripada rangkaian GPS berkepadatan tinggi di SEA serta angin termosfera menggunakan FPI dan ketinggian maya lapisan F daripada data *ionosonde*, kedua-duanya diperolehi daripada stesen

KTB. Pada hari pemerhatian, nilai indeks Dst berkisar dari sekitar -20 nT hingga 10 nT, dengan nilai positif menunjukkan keadaan yang bebas dari gangguan ribut geomagnet. Variasi dalam indeks Dst ini adalah mungkin kerana perubahan dalam dinamik teras Bumi yang boleh mempengaruhi kekuatan dan konfigurasi keseluruhan medan. Nilai Dst sebanyak 10 nT menunjukkan gangguan minimum terhadap medan magnetik Bumi iaitu ia tidak dianggap sebagai petanda hari aktif. Garis merah lurus dalam Rajah 1 menunjukkan permulaan EPB pada longitud 100°T. Berdasarkan Rajah 1, EPB terus bergerak ke arah T pada masa dan lokasi permulaan yang tepat iaitu kira-kira 1320 UT (2120 LT) dan 100°T. Walau bagaimanapun, daripada kajian lepas oleh Chapagain et al. (2012), didapati permulaan EPB awal muncul pada ~ 1915-2000 LST di atas Pulau Ascension. Chapagain et al. (2011) membuat pemerhatian ke atas Pulau Krismas dan mendedahkan bahawa, pada kebanyakan malam, EPB kali pertama diperhatikan muncul pada waktu malam sekitar 1930-2030 LST.

Kami selanjutnya memerhatikan angin termosfera menggunakan FPI di stesen KTB pada longitud 100°T seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Garis biru mewakili halaju angin zonal (positif: arah T) manakala garis hitam menunjukkan halaju angin meridional (positif: arah U). Purata anggaran angin neutral adalah kira-kira 150 m/s ke arah T dan 30 m/s ke arah U untuk Rajah 1(ii) apabila permulaan EPB diperhatikan. Angin arah T menunjukkan nilai yang lebih tinggi daripada angin arah U. Ini menunjukkan bahawa angin ke arah T memainkan peranan penting dalam menggerakkan EPB ke arah T. Ini boleh dijelaskan oleh polarisasi medan elektrik yang dihasilkan oleh angin melalui dinamo lapisan F. EPB bergerak ke arah zonal pada halaju hanyut  $E \times B$ . Hanyutan  $E \times B$  disebabkan oleh angin neutral zonal di kawasan khatulistiwa F yang bertiup merentasi medan magnet boleh menyebabkan hanyutan ion melintang perlahan berserenjang dengan kedua-dua angin neutral dan medan magnet, menghasilkan medan elektrik terpolarisasi yang diarahkan menegak ke bawah. Medan elektrik ke bawah ini menyebabkan plasma hanyut ke arah T, arah yang sama dengan angin neutral. Selain itu, pada waktu malam, ionosfera menjadi tidak stabil disebabkan oleh kecerunan ketumpatan plasma ke atas dan aliran arus ionosfera ke arah T.



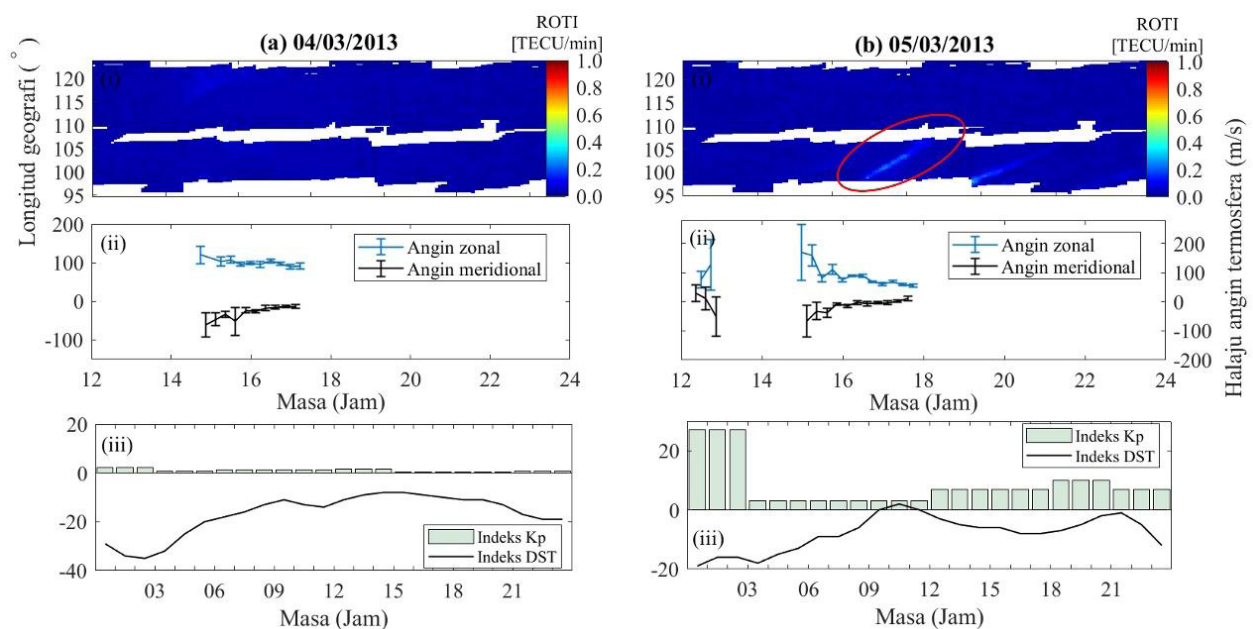
RAJAH 1. Kejadian EPB pada 05 April 2011. (i) Keogram GPS ROTI dibentangkan dengan beberapa struktur EPB secara berturutan yang diperoleh daripada rangkaian GPS di SEA; (ii) Halaju angin neutral termosfera yang diperhatikan oleh FPI di KTB; (iii) Ketinggian lapisan F yang diperhatikan oleh *ionosonde* di KTB dan (iv) Variasi indeks Kp dan Dst. Garis kuning dan garis merah mewakili lokasi dan masa permulaan EPB

Rajah 1(iii) menunjukkan ketinggian maya lapisan F di stesen KTB. Keputusan kami menggambarkan bahawa permulaan EPB berlaku selepas PRE di mana ketinggian maya lapisan F dengan cepat menurun dari sekitar 310 hingga 210 km (Rajah 1(iii)) pada 1300 hingga 1400 UT (2100 hingga 2200 LT). Dengan perbandingan ketiga-tiga alatan berasaskan dasar ini, mengukuhkan cadangan kenaikan lapisan F memainkan peranan penting dalam menentukan permulaan EPB. Peningkatan lapisan F mungkin disebabkan oleh peningkatan medan elektrik selepas Matahari terbenam. Peningkatan medan elektrik, yang juga dirujuk sebagai PRE, adalah kuat sebelum EPB mula diperhatikan. PRE menggerakkan lapisan F ke altitud tinggi dan menyebabkan penjanaan EPB (Huang et al. 2013a).

#### ANGIN LEMAH

Bagi menyokong pemerhatian ini, analisis diteruskan kepada pemerhatian kepada kes hari dimana halaju angin zonal adalah lemah iaitu pada 4 Mac, 2013 dan 5 Mac, 2013. Pada tarikh ini, nilai indeks Kp adalah antara 0 hingga 23, indeks Dst adalah antara -35 hingga 2 dan F10.7

ialah 79.1 dan 112.4, masing-masing. Pemerhatian untuk kedua-dua data GPS dan FPI ditunjukkan dalam Rajah 2 adalah tanpa ketersediaan data *ionosonde*. Rajah 2a(i) menunjukkan tiada kejadian EPB diperhatikan, manakala dalam Rajah 2b(i), menunjukkan kurangnya kejadian EPB yang diperhatikan daripada keogram GPS ROTI dengan angin lemah sepadan yang diperhatikan daripada FPI dalam Rajah 2a(ii) dan 2b(ii). Dalam Rajah 2a(ii), angin arah T hampir  $\sim 100$  m/s pada 15-16 UT. Ia serupa dengan Rajah 2b di mana angin zonal adalah  $\sim 100$  m/s dan ke bawah apabila tiada EPB diperhatikan. Walau bagaimanapun, kajian ini menjangkakan terdapat EPB yang diperhatikan bermula pada 15 UT (dalam bulatan merah), maka, angin arah T adalah tinggi ( $\sim 150$  m/s) pada masa tersebut. Angin arah U ataupun angin meridional menunjukkan nilai yang sangat kecil iaitu hampir sifar dan ke bawah. Selain itu, tiada pengaruh aktiviti geomagnet untuk kes ini kerana pemerhatian dilakukan adalah pada hari senyap. Fakta bahawa kedua-dua kes (angin kuat dan lemah) adalah semasa ekuinoks dan keadaan suria sederhana menunjukkan bahawa tiada pengaruh musim dan aktiviti suria. Oleh itu, dalam perbandingan kedua-dua kes, kami membuat kesimpulan bahawa angin neutral zonal mempengaruhi permulaan EPB.



RAJAH 2. Kejadian EPB pada 04 Mac 2013 dan (b) 05 Mac 2013. (i) Keogram GPS ROTI yang dibentangkan diperoleh daripada rangkaian GPS di SEA tanpa EPB diperhatikan untuk (a); dan beberapa struktur EPB untuk (b); (ii) Halaju angin neutral termosfera yang diperhatikan oleh FPI di KTB; (iii) Variasi indeks Kp dan Dst

Pemerhatian ini mengukuhkan cadangan sumbangan angin neutral zonal (arah T) pada permulaan EPB. Ini juga disebabkan oleh hubungan antara angin neutral dan medan elektrik di lapisan F boleh didedahkan dengan pemeriksaan arus yang terhasil daripada lapisan E dan F. Kekonduksian Pedersen mendominasi kekonduksian Hall di kawasan khatulistiwa iaitu kira-kira di ketinggian 120 km. Oleh itu, angin zonal memacu arus yang pada asasnya menegak dan berserenjang dengan medan magnet. Ini adalah salah satu faktor yang menunjukkan angin mempengaruhi permulaan EPB. Kepentingan angin neutral pada permulaan EPB boleh diperhatikan berdasarkan keseluruhan rajah yang ditunjukkan dalam Rajah 1 dan Rajah 2. Heelis et al. (2012), mendapati bahawa peningkatan lapisan F dihasilkan oleh pembalikan dalam angin zonal lapisan F. Ini menyebabkan jumlah arus dikekalkan melalui peningkatan dalam arus zonal iaitu arah T dan dikaitkan dengan pergerakan ion. Walau bagaimanapun, keamatan PRE dan kejadian EPB tidak mempunyai kebergantungan antara satu dengan yang lain (Abdu, 2001). Kita dapat melihat bahawa permulaan EPB berlaku selepas PRE di mana ketinggian maya lapisan F dengan cepat menurun dari 310 hingga 210 km pada 1300 hingga 1400 UT (2100 hingga 2200 LT). Dengan itu, berdasarkan tiga alatan berasaskan dasar ini, dicadangkan bahawa kenaikan lapisan F memainkan peranan penting dalam menentukan permulaan EPB.

#### KESIMPULAN

Kajian semasa ini telah menyasiat permulaan EPB yang diperhatikan dari keogram ROTI menggunakan rangkaian penerima GPS berkepadatan tinggi di SEA. Kami berjaya menjelaskan permulaan EPB yang diperhatikan pada kira-kira 1320 UT (2120 LT) dan longitud 100°T. Anggaran angin ke arah T ialah ~150 m/s (angin zonal) dan ~30 m/s ke arah U (angin meridional) apabila permulaan EPB diperhatikan. Sementara itu, angin zonal didapati ~100 m/s dan ke bawah dilaporkan apabila tiada EPB diperhatikan dengan angin meridional yang sangat kecil (~0 dan negatif). Keputusan ini menyokong kajian lepas bahawa peningkatan lapisan F memainkan peranan penting dalam menentukan permulaan EPB.

#### PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada MyRTKnet melalui pautan (<http://www.rtknet.gov.my/>) sebagai sumber permohonan data GPS kerana dasar data Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia, JUPEM. Data GPS lain yang

disokong (rangkaiannya SuGAR dan IGS) diperoleh daripada <http://sopac.ucsd.edu/>. Ketersediaan data FPI telah disemak dari <http://stdb2.isee.nagoya.u.ac.jp/omti/index.html>, dan ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Institut Penyelidikan Alam Sekitar Angkasa-Bumi (ISEE), Universiti Nagoya, untuk menyediakan data FPI di Kototabang. Data *ionosonde* dibekalkan oleh Rangkaian Ionosfera Latitud Rendah Asia Tenggara (SEALION), NICT, Jepun di <http://seg-web.nict.go.jp/sealion/>. Kerja ini disokong oleh Geran Jangka Pendek Universiti Sains Malaysia dengan No Projek: 304/PFIZIK/6315730.

#### PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

#### RUJUKAN

- Abdu, M., de Medeiros, R. T., Bittencourt, J. A., & Batista, I. S. 1983. Vertical ionization drift velocities and range type spread F in the evening equatorial ionosphere. *Journal Geophysical Research: Space Physics* 88: 399-402.
- Abdu, M. 2001. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 63: 869-884.
- Buhari, S. M., Abdullah, M., Hasbi, A. M., Otsuka, Y., Tokoyama, T., Nishioka, M., & Tsugawa, T. 2014. Continuous generation and two-dimensional structure of equatorial plasma bubbles observed by high-density GPS receivers in Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research* 119: 10,569-10,580.
- 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* 122: 2174-2184.
- Barros, D., Takahashi, H., Wrasse, C. M., & Figueiredo, C. A. O. B. 2018. Characteristics of equatorial plasma bubbles observed by TEC map based on ground-based GNSS receivers over South America. *Annales Geophysicae* 36: 91-100.
- Chapagain, N. P., Michael, J. T., & Eccles, J. V. 2011. Airglow observations and modelling of F region depletion zonal velocities over Christmas Island. *Journal of Geophysical Research* 116: A02301.
- Chapagain, N. P., Michael, J. T., Jonathan, J. M., & Timothy, M. D. 2012a. Equatorial plasma bubble zonal velocity using 630.0 nm airglow observation and plasma drift modelling over Ascension Island.

- Journal of Geophysical Research: Space Physics* 117: A06316.
- Chapagain, N. P., Jonathan, J. M., John, W. M., Daniel, J. F., Ricardo, A. B., & Amauri, F. M. 2012b. Comparison of nighttime zonal neutral winds and equatorial plasma bubble drift over Brazil. *Journal of Geophysical Research* 117: A06309.
- Das, S. K., Pavanchaitanya, P., Patra, A. K., & Niranjana, K. 2022. On the Onset Time and Background Ionospheric Conditions of Postsunset Equatorial Plasma Bubble. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 127: e2022JA030731.
- Dao, T., Otsuka, Y., Shiokawa, K., Nishioka, M., Yamamoto, M., Buhari, S.M., Abdullah, M., & Husin, A. 2017. Coordinated observations of postmidnight irregularities and thermospheric neutral winds and temperatures at low latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 122: 7504-7518.
- Fejer, B. G., Scherliess, I., & de Paula, E. R. 1999. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 104: 19859-19869.
- Fesen, C. G., Roble, R. G., Richmond, A. D., Crowley, G., & Fejer, B. G. 2000. Simulation of the pre-reversal enhancement in the low-latitude vertical ion drifts. *Geophysical Research Letter* 27: 1851-1854.
- Fukushima, D., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Kubota, M., Tsugawa, T., Nagatsuma, T., Komonjinda, S., & Yatani, C. Y. 2015. Geomagnetically conjugate observation of plasma bubbles and thermospheric neutral winds at low latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120: 2222-2231.
- Heelis, R. A., Crowley, G., Rodrigues, F., Reynolds, A., Wilder, R., & Azeem, I. 2012. The role of zonal winds in the production of a pre-reversal enhancement in the vertical ion drift in the low latitude ionosphere. *Journal of Geophysical Research* 117: A08308.
- Huang, C. S., de La Beaujardiere, O., Roddy, P. A., Hunton, D. E., Ballenthin, J. O., Hairston, M. R., & Pfaff, R. F. 2013.a Large-scale quasiperiodic plasma bubbles: C/NOFS observation and causal mechanism. *Journal of Geophysics: Space Physics* 118: 3602-3612.
- Huang, C. S., de La Beaujardiere, O., Roddy, P. A., Hunton, D. E., Ballenthin, J. O., & Hairston, M. R. 2013b. Long-lasting daytime equatorial plasma bubbles observed by the C/NOFS satellite. *Journal of Geophysics: Space Physics* 118: 2398-2408.
- Immel, T. J., Frey, H. U., Mende, S. B., & Sagawa, E. 2004. Global observations of the zonal drift speed of equatorial plasma bubbles. *Annales Geophysicae* 22: 3099-3107.
- Mersha, M. W., Lewi, E., Jakowski, N., Wilken, V., Berdermann, J., Kriegel, M., & Damtie, B. 2020. A Method for Automatic Detection of Plasma Depletions by Using GNSS Measurements. *Journal of Geophysical Research: Radio Science* 55: e2019RS006978.
- Mukherjee, G. K., Carlo, L., Mahayan, S. H., & Patil, P. T. 1997. First results of all-sky imaging from India. *Earth, Planets and Space* 50: 119-127, 1998.
- Muralikrishna, P & Leandro Paulino Vieira. 2007. Equatorial F-region irregularities generated by the Rayleigh-Taylor instability mechanism - rocket observations from Brazil. *Revista Brasileira de Geofisica* 25.
- Magdaleno, S., Herraiz, M., Altadill, D., & de la Morena, B. A. 2017. Climatology characterization of equatorial plasma bubbles using GPS data. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 7, A3. <https://doi.org/10.1051/swsc/2016039>
- Nasuddin, K. A., Abdullah, M., & Hamid, N. S. A. 2023. Correlation Analysis of Geomagnetic Parameter with South Atlantic Anomaly Region. *Jurnal Kejuruteraan* 35(1): 2023: 237-246.
- Otsuka, Y., Shiokawa, K., Ogawa, T., Yokoyama, T., Yamamoto, M., & Fukao, S. 2004. Spatial relationship of equatorial plasma bubbles and field-aligned irregularities observed with an all-sky imager and the Equatorial Atmosphere Radar. *Geophysical Research Letter* 31: L20802.
- Nishioka, M., Saito, A., & Tsugawa, T. 2008. Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground based GPS receiver networks. *Journal of Geophysical Research*, 113, A05301.
- Rishbeth, H. 1971. The F-layer dynamo. *Journal of Planetary and Space Science* 19: 263-267.
- Rishbeth, H., Bauer, P., Hanson, W. B. 1972. Molecular ions in the F2 layer. *Journal of Planet and Space Science* 20: 1287-1293.
- Rizal, N. A. M., Yusoff, S. H. M., Hamid, N. S. A., & Sarudin, I. 2020. Variation of Electron Density before Large Earthquakes in Southeast Asia Observed by CHAMP Satellite from 2004 to 2009. *Jurnal Kejuruteraan* 3(1): 2020: 15-21.



- Shiokawa, K., Otsuka, Y., Oyama, S., Nozawa, S., Satoh, M., Katoh, Y., et al. 2012. Development of low-cost sky-scanning Fabry-Perot interferometer for airglow and auroral studies. *Earth, Planets and Space* 64: 1033–1046.
- Sharma, A. K., Nade, D. P., Nikte, S. S., Patil, P. T., Ghodpage, R. N., Vhatkar, R. S., et al. 2014. Occurrence of equatorial plasma bubble over Kolhapur. *Advances in Space Research* 54: 435–442.
- Saito, S., & Maruyama, T. 2006. Ionospheric height variations observed by ionosondes along magnetic meridian and plasma bubble onsets. *Annales Geophysicae* 24: 2991–2996.
- Sarudin, I., Hamid, N. S. A., Abdullah, M., Buhari, S. M., Shiokawa, K., Otsuka, Y., & Yatini, C. Y. 2020. Equatorial plasma bubble zonal drift velocity variations in response to season, local time, and solar activity across Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 125: e2019JA027521.
- Sarudin, I., Hamid, N. S. A., Abdullah, M., Buhari, S. M., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Hozumi, K., & Jamjareegulgarn, P. 2021. Influence of zonal wind velocity variation on equatorial plasma bubble occurrences over Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 126: e2020JA028994.
- Sarudin, I., Hamid, N. S. A., Abdullah, M., Rusli, F. N. S. M., Otsuka, Y., Shiokawa, K., Yatini, C., Komonjinda, S. & Somboon, E. 2022. Variations of zonal wind velocity in the thermosphere observed at southeast Asian sector during quiet and active geomagnetic days. *Jurnal Fizik Malaysia* 43(1): 10025–10035.
- Tsunoda, R. T. 1981. Time evolution and dynamics of equatorial backscatter plumes, 1. Growth phase. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 86: A1, 139–149.
- Tsunoda, R. T. 2015. Upwelling: A unit of disturbance in equatorial spread F. *Earth, and Planetary Science* 2: 9.
- Woodman, R. F. 1970. Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 75: 6249–6259.
- Wu, Q., Yuan, W., Xu, J., Huang, C., Zhang, X., Wang, J.-S., & T., Li. 2014. First U.S.- China joint ground-based Fabry-Perot interferometer observations of longitudinal variations in the thermospheric winds. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 5755–5763.  
<https://doi.org/10.1002/2014JA020089>
- Yeboah, E. A., Fagundes, P. R., Tardelli, A., Pillat, V. G., Pignalberi, A., Kavutarapu, V., Pezzopane, M., & Vieira, F. 2021. Ground and satellite-based observations of ionospheric plasma bubbles and blobs at 5.65° latitude in the Brazilian sector. *Advances in Space Research* 67: 2416–2438.
- Yokoyama, T., Fukao, S. 2006. Upwelling backscatter plumes in growth phase of equatorial spread F observed with the Equatorial Atmosphere Radar. *Journal of Geophysical Research* 33: L08104.