

**STUDI VARIASI MUSIMAN KEMUNCULAN PLASMA *BUBBLE*
MENGUNAKAN *AIRGLOW IMAGER* DAN
GPS SINTILASI DI ATAS KOTOTABANG
[STUDY ON SEASONAL VARIATION OF PLASMA BUBBLE
OCCURRENCES OBSERVED BY GPS SCINTILLATION AND AIRGLOW
MEASUREMENTS OVER KOTOTABANG]**

Ednofri^{*)}, Susumu SAITO^{)}, Yuichi OTSUKA^{***)}**

^{*)} Loka Pengamatan Atmosfer Lapan Kototabang, Indonesia

^{**)} Electronic Navigation Research Institute (ENRI), Tokyo, Japan

^{***)} Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Japan

e-mail: ednofri_japan@yahoo.com

ABSTRACT

With the increasing reliance on satellite-based positioning, navigation and timing systems on GNSS, predicting the plasma bubble occurrence is more and more demanded. This study aimed to characterize the impacts of ionospheric irregularities associated with plasma bubbles occurrences and scintillation on GNSS application during the declining solar activity. To reveal seasonal variation of ionospheric irregularities associated with plasma bubbles, we use an all-sky airglow imager (ASI) that are installed at Kototabang (0.2°S, 100.3°E, -10.4° magnetic latitude), Indonesia to detect large-scale plasma density depletions as two-dimensional images, the amplitude scintillation index (S_4) obtained from three single-frequency GPS receivers installed at the same location and geomagnetic storm event (Dst index) obtained from the World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. We analyzed the occurrence of plasma bubble in ASI images from 2003-2009 and found that the occurrence rate was highest during May-July than other months which is different from the seasonal variation of scintillation occurrences that were generally known so far. The high occurrence rate in May-July was not due to geomagnetic storms, because the statistics did not change after removing the plasma bubble events that may be caused by geomagnetic storms. We also studied the spatial relationship between the ionospheric scintillation and the large-scale plasma bubble structure seen in ASI images. We found some events where the ionospheric pierce points (IPPs) of the GPS satellites were inside the large-scale plasma bubble structure seen in ASI images without scintillation occurrence.

Keywords: *Plasma bubbles, Scintillation, Geomagnetic storms, GNSS*

ABSTRAK

Dengan meningkatnya ketergantungan pada sistem penentuan posisi berbasis satelit, navigasi dan waktu pada GNSS, prediksi kejadian gelembung plasma menjadi lebih dibutuhkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakter dampak iregularitas ionosfer yang terkait dengan kejadian gelembung plasma dan sintilasi pada aplikasi GNSS selama aktivitas matahari menurun. Untuk mendapatkan informasi variasi musiman iregularitas ionosfer yang terkait dengan gelembung plasma, kami menggunakan *All-sky Airglow Imager* (ASI) yang dipasang di Kototabang (0.2°LS, 100.3°BT, -10,4° lintang magnetik) Indonesia, untuk mendeteksi penipisan kepadatan plasma skala besar dalam bentuk citra dua dimensi, indeks amplitudo sintilasi (S_4)

yang diperoleh dari tiga *single-frequency GPS receiver* yang dipasang di lokasi yang sama dan kejadian badai magnetik (indeks Dst) yang diperoleh dari *World Data Center for Geomagnetism*, Kyoto. Kami menganalisis kejadian gelembung plasma pada citra ASI dari tahun 2003-2009 dan menemukan bahwa tingkat kejadian tertinggi pada bulan Mei-Juli yang berbeda dari variasi musiman kejadian gelembung plasma yang umumnya diketahui selama ini. Tingkat kejadian yang tinggi pada Mei-Juli bukan disebabkan oleh badai magnetik, karena statistik menunjukkan tidak ada perubahan yang signifikan setelah peristiwa gelembung plasma yang mungkin disebabkan oleh badai magnetik dieliminasi. Kami juga mempelajari hubungan spasial antara sintilasi ionosfer dan struktur gelembung plasma skala besar yang terlihat pada citra ASI. Kami menemukan beberapa peristiwa dimana IPPs dari satelit GPS berada di dalam struktur gelembung plasma skala besar pada citra ASI, tetapi tidak teramati adanya sintilasi.

Kata Kunci: *Gelembung plasma, Sintilasi, Badai magnetik, GNSS*

1 PENDAHULUAN

Indonesia terletak di daerah lintang magnetik rendah dan mencakup wilayah yang sangat luas. Untuk tujuan transportasi nasional, pertahanan dan keamanan, teknologi berbasis satelit navigasi dan komunikasi radio HF akan sangat berguna. *Global Navigation Satellite System* (GNSS) adalah infrastruktur dasar yang mendukung berbagai moda transportasi (seperti darat, laut, dan udara), survei, dan waktu. Karena GNSS adalah teknologi trans-ionosfer, teknologi ini rentan terhadap gangguan ionosfer, seperti gelembung plasma yang dapat menyebabkan sintilasi pada sinyal radio. Variasi musiman tingkat kejadian gelembung plasma, yang tergantung pada bujur, dapat dijelaskan dalam kaitannya dengan deklinasi medan magnetik bumi (Tsunoda, 1985; Maruyama dan Matuura, 1984). Studi sebelumnya menunjukkan bahwa puncak variasi musiman kejadian sintilasi yang disebabkan oleh gelembung plasma adalah pada ekuinoks di Kototabang Indonesia (Otsuka et al. 2006). Lee et al. (2009) juga melaporkan variasi musiman yang sama untuk kejadian fluktuasi fase sinyal GPS yang tinggi di Taiwan.

Iregularitas ionosfer terbentuk setelah matahari terbenam karena proses ketidakstabilan *Rayleigh-Taylor* yang bekerja pada gradien kerapatan ke arah atas dengan medan listrik ke arah timur. Gelembung plasma pertama kali dihasilkan pada sisi bawah lapisan F, kemudian menembus ke sisi atas wilayah lapisan F (Woodman dan Lahoz, 1976). Di wilayah lintang rendah, gangguan plasma ionosfer, seperti penipisan kepadatan ionosfer yang disebut gelembung plasma, sering terjadi (Saito dan Maruyama, 2006; 2007). Selama ini diketahui bahwa gelembung plasma sering terjadi dalam kondisi magnetik tenang atau dalam kondisi sangat terganggu (Huang et al. 2001), yang menunjukkan perbedaan energi penggerak untuk memicu pertumbuhan gelembung plasma.

Di Kototabang (0.2 °LS, 100.3 °BT, -10.4° lintang magnetik), Sumatera Barat Indonesia, banyak diinstal peralatan penelitian untuk mempelajari kejadian gelembung plasma seperti *Equatorial Atmosphere Radar* (EAR), *All-sky Airglow Imager* (ASI), *GPS receiver*, Ionosonda dan *VHF backscatter radar*. Semua peralatan tersebut dapat mendeteksi perbedaan manifestasi dari gelembung plasma dengan kelebihan dan kekurangannya. Sebagai contoh, ASI mendeteksi penipisan *airglow* skala besar sebagai citra dua dimensi, tetapi hanya dalam kondisi langit cerah dan gelap saja.

Amplitudo sintilasi sinyal GPS dikaitkan dengan iregularitas ionosfer dengan skala ukuran dari beberapa ratus meter tidak tergantung pada kondisi cuaca. Namun, *receiver* hanya dapat mengamati beberapa titik di langit dimana satelit GPS berada. Karakteristik sintilasi ionosfer di atas Kototabang telah dipelajari oleh

Otsuka et al. (2006) dan secara umum konsisten dengan hasil penelitian di lokasi lain di dunia (Otsuka et al. 2006 dan referensi di dalamnya). Namun, analisis rinci serupa untuk karakteristik gelembung plasma yang terlihat pada citra ASI belum banyak dipelajari. Dengan demikian, akan lebih bermanfaat membandingkan karakteristik gelembung plasma yang diamati dengan metode yang berbeda.

Untuk mengetahui iregularitas ionosfer yang terkait dengan gelembung plasma, kami menggunakan indeks amplitudo sintilasi (S_4) yang diperoleh dari tiga *single-frequency GPS receivers* dan citra *airglow* diperoleh dari ASI. Amplitudo sintilasi sinyal GPS adalah penanda dari keberadaan (beberapa ratus meter) iregularitas plasma skala kecil. ASI dapat mendeteksi penipisan kepadatan plasma skala besar terkait dengan gelembung plasma sebagai citra dua dimensi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat kemungkinan penggunaan ASI dalam mengamati kejadian gelembung plasma dan sintilasi pada aplikasi GNSS selama magnetik tenang tahun 2003-2009. Untuk mengetahui perilaku yang berbeda dari gelembung plasma yang terlihat dalam pengukuran ASI dan GPS sintilasi, kami juga mempelajari hubungan spasial antara sintilasi ionosfer dan struktur gelembung plasma skala besar yang terlihat pada citra ASI.

2 DATA DAN METODOLOGI

Kami menggunakan citra *airglow*, intensitas sintilasi (indeks S_4) yang diperoleh dari peralatan *airglow imager* dan GPS sintilasi yang diinstal di Kototabang untuk semua kondisi aktivitas magnetik dari periode tahun 2003-2009 saat aktivitas matahari menurun. Peralatan *All-sky Airglow Imager* (ASI) diinstal di LAPAN Kototabang, Sumatera Barat Indonesia sejak Oktober 2002 sebagai bagian dari *Optical Mesosphere Thermosphere Imagers* (OMTIs) (Shiokawa et al. 1999). Peralatan ini menggunakan lensa *fish-eye* ($f = 24\text{mm}$), sebuah *cooled CCD camera*, dan 5 buah filter optik dengan *pass-band* yang sesuai dengan perbedaan proses emisinya dari ketinggian yang berbeda pula.

Tabel 2-1: DAFTAR 5 BUAH FILTER OPTIK DAN TINGKAT SENSITIVITAS DARI PERALATAN AIRGLOW IMAGER KOTOTABANG (Shiokawa et al. 2009)

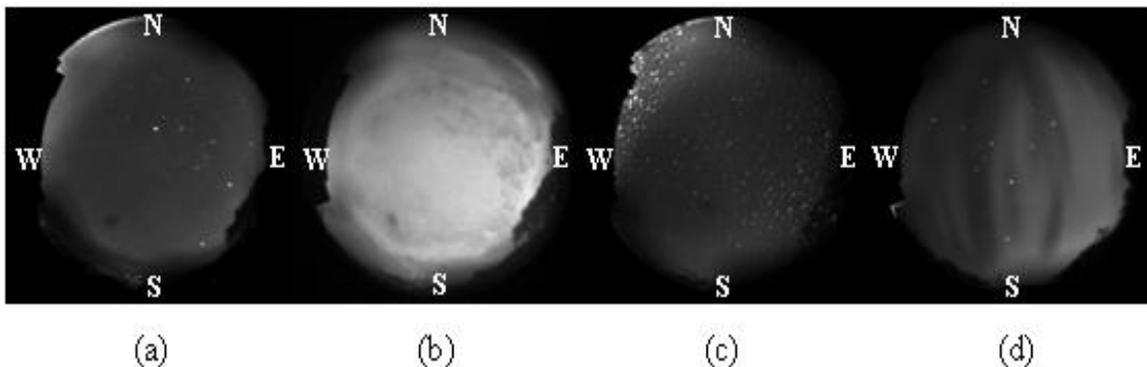
Emission	Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Exposure (sec)	Sensitivity (count/R/s)
OI	557.7	1.96	105	0.056
OI	630.0	1.98	105	0.115
OH	720-910*	190	15	–
OI	777.4	1.78	165	0.089
bg	572.5	2.06	105	0.082

Dalam penelitian ini kami menggunakan panjang gelombang 630 nm untuk mengamati kejadian gelembung plasma dalam bentuk citra dua dimensi. Persamaan (2-1) - (2-3) menunjukkan reaksi fotokimia dari *airglow* dengan panjang gelombang 630 nm. Panjang gelombang 630 nm dipancarkan melalui rekombinasi disosiatif ion molekul oksigen (O_2^+) yang dihasilkan oleh reaksi pertukaran muatan antara ion atom oksigen (O^+) dan molekul oksigen netral (O_2). Kerapatan ion atom oksigen (O^+) hampir sama dengan kerapatan elektron di lapisan F. Ketinggian puncak kerapatan elektron lapisan F adalah 400 km, sedangkan kerapatan molekul oksigen netral (O_2) meningkat dengan penurunan ketinggian. Dengan demikian emisi 630 nm adalah di sisi bawah lapisan F pada ketinggian 200-300 km. Jika ketinggian lapisan F menurun, emisi 630 nm akan meningkat, karena plasma lapisan F (ion-ion O^+) bereaksi dengan molekul

oksigen kerapatan tinggi di ketinggian yang lebih rendah. Dengan demikian, *airglow* dengan panjang gelombang 630 nm merupakan suatu indikator dari ketinggian dan kerapatan plasma lapisan F (Shiokawa et al. 2006);



Gambar 2-1 menunjukkan contoh-contoh citra *airglow* pada panjang gelombang 630 nm dengan kondisi langit yang berbeda di atas Kototabang. Bagian utara geografis adalah ke arah atas dari titik tengah dan timur geografis berada di arah sebelah kanan.



Gambar 2-1: Kondisi langit dari citra *airglow imager* yang teramati menggunakan panjang gelombang 630 nm, (a) langit cerah dengan banyak bintang, (b) berawan, (c) hujan, (d) langit cerah dengan banyak bintang dan teramati kemunculan gelembung plasma

Tabel 2-2 di bawah menunjukkan jumlah data hari pengamatan setiap bulannya dari ASI selama tahun 2003-2009 yang digunakan dalam penelitian ini. Adanya data pengamatan yang tidak lengkap setiap bulannya karena masalah teknis instrumen, yang terjadi secara sporadis dan juga karena pengurangan 3-5 hari pengamatan untuk menghindari cahaya bulan yang selalu ada setiap bulannya, mengingat operasional ASI yang tidak dapat dilakukan jika ada cahaya terang.

Tabel 2-2: JUMLAH DATA HARI SETIAP BULAN DARI PENGAMATAN *AIRGLOW IMAGER* (630 nm) YANG AKAN DIANALISIS

Thn/Bln	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2003	27	23	27	24	27	8	0	12	25	25	26	24
2004	26	25	27	25	28	24	22	22	23	19	24	22
2005	26	22	27	25	28	26	27	25	22	24	19	1
2006	23	24	27	23	21	17	0	22	25	15	12	0
2007	18	16	1	6	24	25	25	25	25	27	27	20
2008	26	25	26	25	27	23	21	22	21	19	24	27
2009	26	24	4	0	3	2	4	21	25	22	10	8

Tingkat kejadian penipisan *airglow* terkait dengan gelembung plasma dievaluasi dengan menghitung jumlah jam langit cerah dan jumlah jam kemunculan gelembung plasma dalam citra ASI oleh mata manusia malam hari dengan tidak membedakan kejadian sebelum dan setelah tengah malam. Total probabilitas kejadian gelembung plasma (P_{PB}) dirumuskan sebagai;

$$P_{PB} = (H_{PB} / H_{cerah}) \tag{2-4}$$

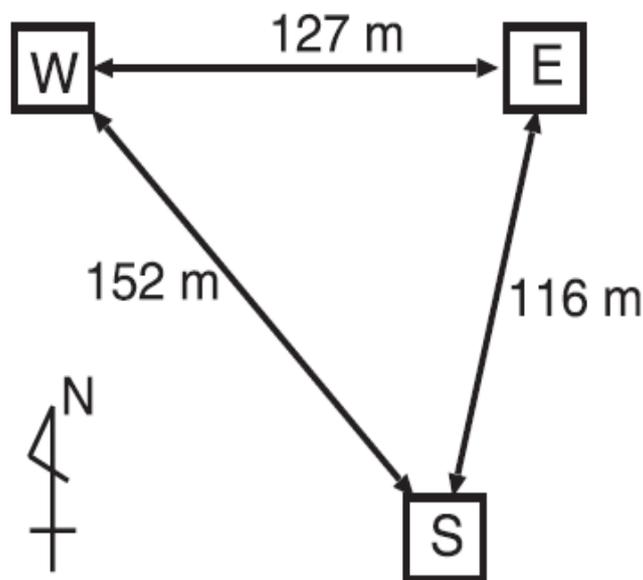
Dimana H_{PB} dan H_{cerah} adalah jumlah jam gelembung plasma dan langit cerah dalam data ASI. Analisis kami hanya fokus pada kondisi langit cerah pada malam hari, kemudian melihat kemunculan gelembung plasma selama periode langit cerah tersebut (Suzuki et al. 2004; Shiokawa et al. 2006).

Untuk menghapus dampak dari badai magnetik, probabilitas gelembung plasma dalam kondisi magnetik tenang ($P_{PB, tenang}$) dirumuskan sebagai;

$$P_{PB,tenang} = H_{PB,tenang} / H_{cerah,tenang} \tag{2-5}$$

di mana $H_{PB, tenang}$ dan $H_{cerah, tenang}$ adalah jumlah jam gelembung plasma dan langit cerah dalam data ASI yang diperoleh dalam kondisi magnetik tenang.

GPS sintilasi diinstal di lokasi yang sama dengan peralatan *all-sky airglow imager*. Karena sintilasi disebabkan oleh iregularitas plasma dengan skala spasial 400 m yang ada dalam gelembung plasma, kejadian sintilasi dapat dianggap sebagai penanda dari kejadian gelembung plasma di atas Kototabang. Tiga buah receiver GPS sintilasi (Astech G12) dengan frekuensi tunggal (1,5754 GHz) diinstal berdekatan dengan jarak 116, 127 dan 152 m dapat mendeteksi gelembung plasma sebagai sintilasi pada sinyal GPS dan mengukur kecepatan pergerakan mereka dalam area 500 km di sekitar Kototabang pada ketinggian 350 km. Tingkat sampling dari receiver GPS sintilasi adalah 20 Hz. Sintilasi sinyal GPS direpresentasikan oleh indeks S_4 untuk mempelajari efek iregularitas skala kecil (beberapa ratus meter) terkait dengan gelembung plasma terhadap perambatan gelombang radio melalui ionosfer.

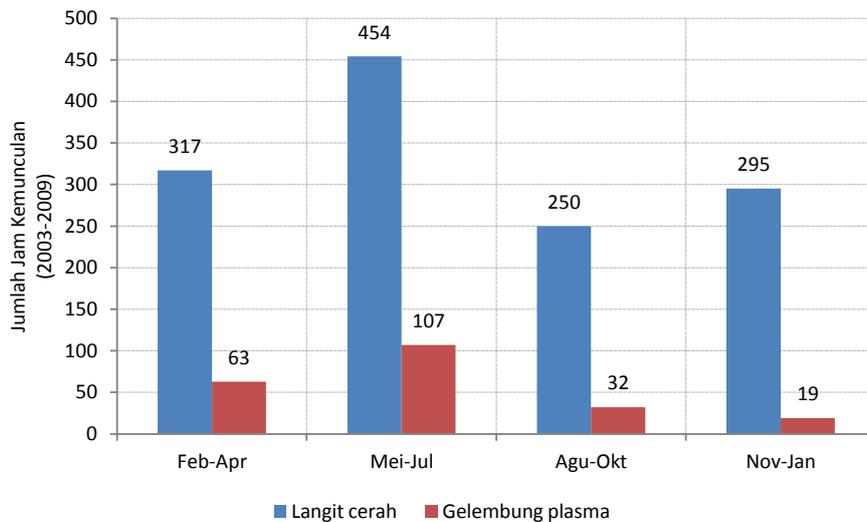


Gambar 2-2: Konfigurasi tiga receiver GPS yang dipasang di Kototabang. Dua receiver (E dan W) ditempatkan dalam arah timur-barat dan receiver (S) terletak di sebelah selatan mereka. Jarak antara masing-masing receiver 116, 127, dan 152m (Otsuka et al. 2006)

Badai magnetik ditandai oleh komponen horizontal (H) dari medan magnet bumi. Dalam hal ini dinyatakan oleh indeks geomagnet Dst, diperoleh dari *World Data Center for Geomagnetism*, Kyoto (www.wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp). Badai diklasifikasikan dengan indeks intensitas Dst negatif. Dalam studi ini, intensitas badai magnetik yang kami gunakan adalah <-50 nT.

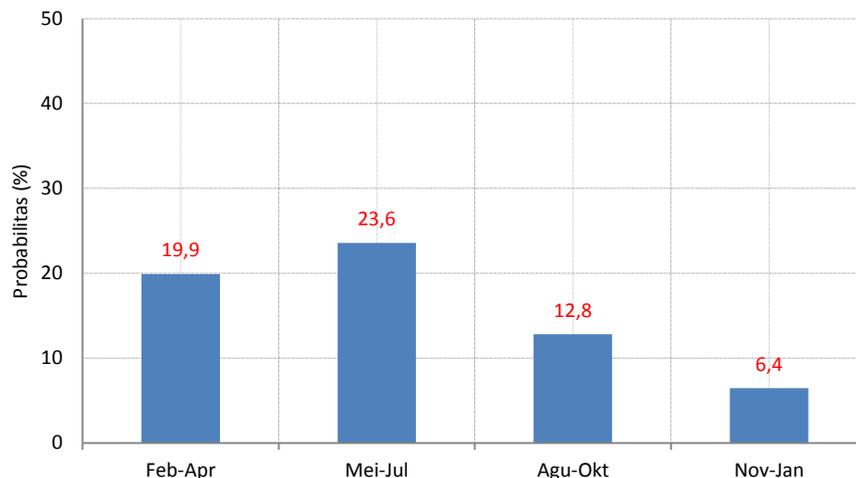
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3-1 menunjukkan tingkat terjadinya jumlah jam langit cerah (H_{cerah}) dan jumlah jam kejadian gelembung plasma (H_{PB}) selama 7 tahun dari pengukuran otomatis oleh *airglow imager*, dari tahun 2003-2009. Disebabkan iklim tropis dan banyaknya pegunungan disekitar pulau Sumatera, langit di Kototabang cenderung berawan. Kemungkinan puncak langit cerah adalah pada bulan Mei dan Juni. Namun, karena pengukuran otomatis jangka panjang, kami memiliki puluhan jam interval langit cerah untuk setiap bulannya. Kami telah mempelajari variasi musiman dari kejadian gelembung plasma dalam data ASI yang diperoleh dari tahun 2003-2009. Masing-masing ada 317, 454, 250, dan 295 jam kondisi langit malam yang cerah pada periode bulan Februari-April, Mei-Juli, Agustus-Oktober, dan November-Januari. Pada periode tersebut, gelembung plasma terjadi selama 63, 107, 32, dan 19 jam.

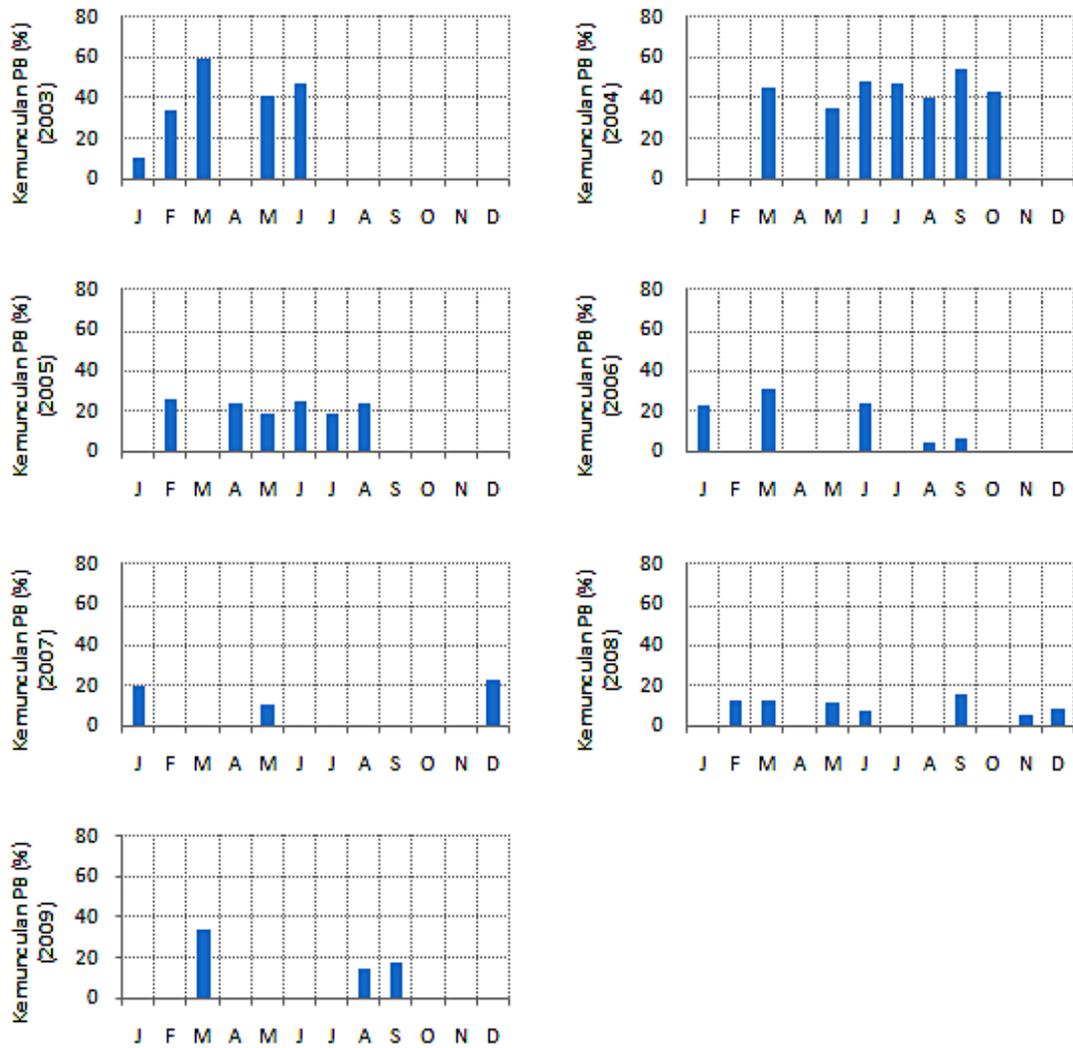


Gambar 3-1: Total jam untuk langit malam yang cerah dan kejadian gelembung plasma dari tahun 2003-2009 di atas Kototabang

Menggunakan persamaan (2-4) kami memperoleh probabilitas kejadian gelembung plasma yang tinggi pada bulan Mei-Juli (23,6%) dibandingkan bulan-bulan lainnya (Gambar 3-2). Hal ini berbeda dengan variasi musiman kejadian gelembung plasma yang umumnya dikenal sejauh ini. Misalnya, Otsuka et al. (2006) telah menunjukkan bahwa selama tahun 2003-2004 variasi harian dari S_4 adalah tinggi pada bulan-bulan ekuinoks (Maret-April dan September-Oktober).



Gambar 3-2: Probabilitas variasi musiman kemunculan gelembung plasma tahun 2003-2009



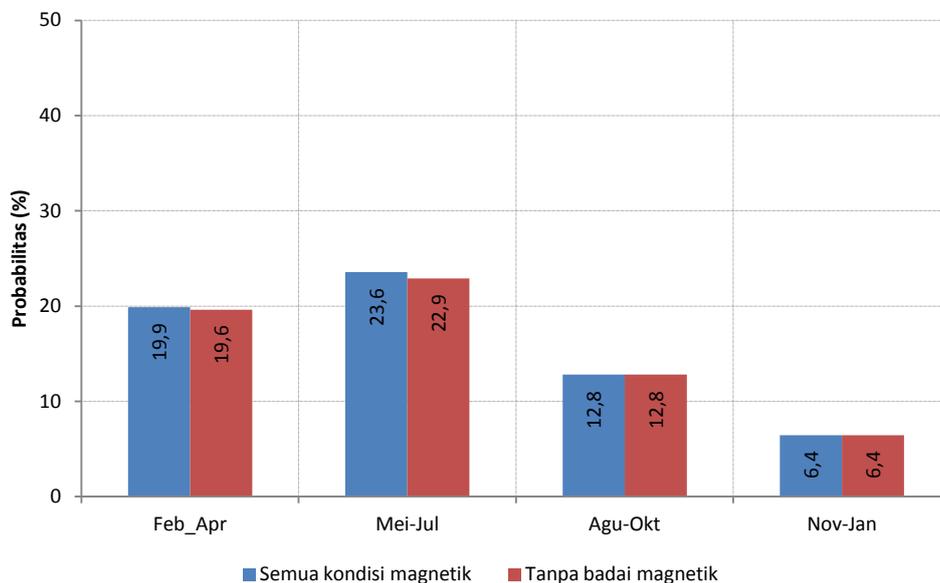
Gambar 3-3: Variasi musiman kejadian gelembung plasma setiap tahunnya dari 2003-2009

Gambar 3-3 menunjukkan probabilitas bulanan kemunculan *depletions airglow*/gelembung plasma (P_{PB}) yang dipisah setiap tahunnya dari 2003-2009 selama fase siklus matahari menurun. Aktivitas gelembung plasma terlihat berkurang dengan menurunnya aktivitas matahari selama tahun 2003-2009. Meskipun data untuk setiap bulannya tidak lengkap karena masalah teknis instrumen dan terbatasnya kondisi langit cerah di atas Kototabang, probabilitas variasi musiman kejadian gelembung plasma untuk setiap tahun umumnya sama dengan rata-rata keseluruhan tahun (Gambar 3-2). Ini berarti bahwa puncak probabilitas kejadian gelembung plasma di bulan Mei-Juli tidak memiliki ketergantungan pada aktivitas matahari.

Kemungkinan-kemungkinan yang menyebabkan peningkatan gelembung plasma pada bulan Mei-Juli ini, masih menjadi pertanyaan. Selama ini diketahui bahwa kemunculan gelembung plasma maksimum setelah tengah malam (*post-midnight*) dibandingkan kemunculannya sebelum tengah malam (*post-sunset*) selama aktivitas matahari menurun (Abdu et al. 2012). Gelembung plasma juga dikenali sebagai penyebaran *echo* pada ionogram (ESF), *echo* pada HF-VHF radar dan sintilasi ionosfer dari sinyal satelit. MacDougall et al. (1998) melaporkan dari sektor Brazil bahwa kejadian *spread F* maksimum pada periode setelah matahari terbenam dan lebih banyak terjadi pada waktu ekuinoks selama aktivitas matahari meningkat, sedangkan selama aktivitas matahari menurun puncak terjadinya *spread F* maksimum setelah tengah malam selama titik balik matahari (*solstice*) yang didahului oleh

peningkatan abnormal pada ketinggian lapisan F. Pada penelitian yang lain, pengamatan ionosonda di India menunjukkan tingkat terjadinya *spread F* yang tinggi setelah tengah malam di bulan Juni (*solstice*) selama aktivitas matahari menurun (Subbarao et al. 1994; Chandra et al. 2003).

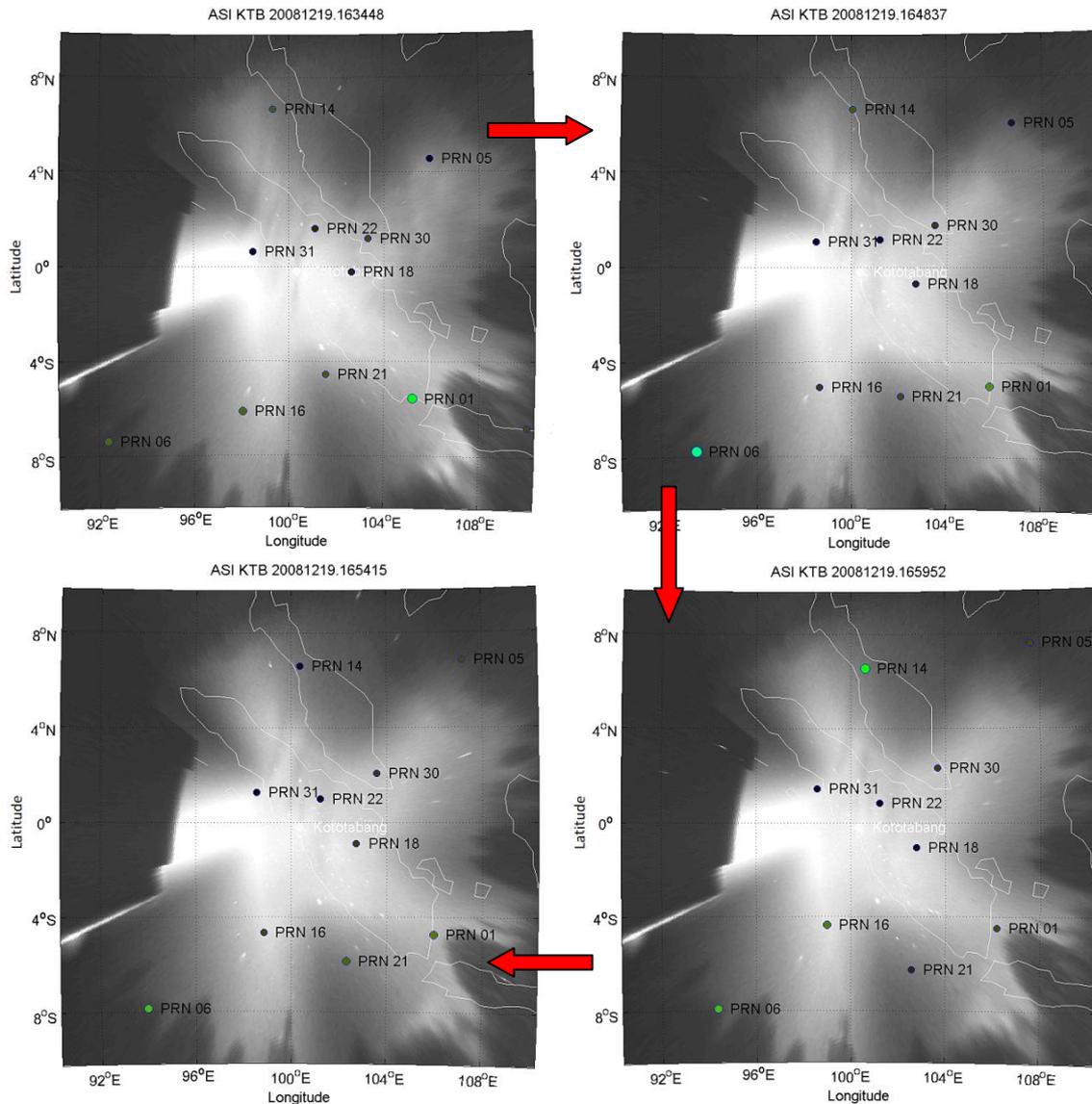
Hipotesis awal kami untuk peningkatan gelembung plasma pada bulan Mei-Juli ini adalah karena tingkat langit cerah di Kototabang sangat rendah, maka jumlah datanya sedikit, sehingga kontaminasi badai magnetik yang menginduksi gelembung diperkirakan dapat mengubah probabilitas kejadian gelembung plasma yang tinggi pada bulan Mei-Juli tersebut. Untuk menguji hipotesis ini, kami memperkirakan probabilitas terjadinya gelembung plasma dalam kondisi magnetik tenang ($P_{PB, \text{tenang}}$) dari persamaan (2-5). Masing-masing ada 316, 450, 250, dan 295 jam untuk kondisi langit malam yang cerah saat aktivitas magnetik tenang ($H_{\text{cerah, tenang}}$) pada bulan Februari-April, Mei-Juli, Agustus-Oktober, dan November-Januari. Saat periode tersebut, gelembung plasma terjadi selama 62, 103, 32, dan 19 jam ($H_{PB, \text{tenang}}$). Gambar 3-4 membandingkan probabilitas kejadian gelembung plasma dalam kondisi untuk semua aktivitas magnetik (P_{PB}) dengan kondisi magnetik tenang saja ($P_{PB, \text{tenang}}$).



Gambar 3-4: Perbandingan probabilitas kejadian gelembung plasma dari tahun 2003-2009 setelah menghapus efek dari badai magnetik

Disini jelas bahwa probabilitas kemunculan yang tinggi pada bulan Mei-Juli tidak turun signifikan setelah mengeliminasi efek dari badai magnetik. Kami menemukan penurunan kecil dari probabilitas kejadian gelembung plasma setelah menghapus efek badai magnetik, seperti untuk bulan Mei-Juli dari 23,6% menjadi 22,9%. Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa aktivitas magnetik dapat meningkatkan kejadian gelembung plasma ekuator. Misalnya, Basu et al. (2001; 2007) menyarankan bahwa penetrasi medan listrik ke arah timur pada sore hari selama fase utama badai magnetik menyebabkan ionosfer ekuatorial terangkat dengan cepat dan mengatur ketidakstabilan plasma untuk menjadi gelembung plasma. Huang et al. (2010) meneliti pengukuran *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) dan menemukan bahwa penetrasi medan listrik waktu sore hari adalah ke arah timur, berlangsung selama beberapa jam selama fase utama badai magnetik dan menyebabkan pergeseran ion yang besar ke arah atas dalam ionosfer ekuatorial. Kelley et al. (2008) mengukur medan listrik sebagai input ke dalam model ionosfer dan berhasil menemukan gelembung plasma skala besar di ionosfer ekuator saat badai magnetik yang kuat.

Untuk menyelidiki perbedaan perilaku dari gelembung plasma yang teramati dalam ASI dan GPS sintilasi, satu peristiwa dipilih dari pengamatan panjang gelombang 630 nm *airglow* dan receiver GPS sintilasi.



Gambar 3-5: Pemetaan citra ASI dengan IPP satelit GPS (19/12/2008)

Gambar 3-5 menunjukkan distribusi *airglow* pada peta geografis dari emisi yang diasumsikan diketinggian 250 km yang diamati pada malam tanggal 19 Desember 2008. Lingkaran titik di peta menunjukkan lokasi titik dari satelit GPS yang menembus ionosfer (IPP) dilacak oleh *receiver* GPS sintilasi. Ukuran dan warna titik mewakili besarnya sintilasi (indeks S₄). Saat nilai indeks S₄ meningkat, lingkaran titik membesar, dan perubahan warna menjadi hijau, kuning, dan selanjutnya menjadi merah. Hubungan spasial antara sintilasi dan gelembung plasma pada peta ASI (Gambar 3-5) menunjukkan bahwa IPP dari satelit PRN22 benar-benar berada dalam struktur gelembung plasma (23:48:37 LT), tetapi tidak teramati adanya sintilasi. Gelembung plasma tanpa terjadinya sintilasi seperti yang diamati pada Gambar 3-5 mungkin bisa menjadi salah satu penjelasan untuk perilaku musiman yang berbeda dari gelembung plasma dalam data ASI dan GPS sintilasi. Kejadian sintilasi setelah tengah malam diketahui berkurang, karena iregularitas ionosfer dengan ukuran skala yang lebih kecil menghilang lebih cepat (Basu et al. 1978). Bahkan, Otsuka et al. (2006) menunjukkan bahwa sintilasi ionosfer di atas Kototabang dengan cepat menghilang setelah tengah malam. Saito et al. (2008) juga melaporkan

iregularitas skala 3m menghilang setelah tengah malam, meskipun masih ada gelembung plasma. Namun, kejadian yang ditampilkan dalam makalah ini adalah sebelum tengah malam. Kondisi ini dapat disebabkan oleh iregularitas yang terlalu lemah untuk menimbulkan sintilasi; densitas yang rendah sekitar IPP karena aktivitas matahari menurun, jauh dari puncak anomali ekuator, faktor kemiringan lebih kecil untuk sudut elevasi satelit yang lebih tinggi. Ini adalah temuan penting bahwa karakteristik kemunculan gelembung plasma dapat berbeda untuk manifestasi yang berbeda dari gelembung plasma seperti sintilasi ionosfer.

Di akhir periode aktivitas matahari minimum, telah dilakukan pengamatan *Field-Aligned Irregularities* (FAIs) di lapisan F menggunakan radar VHF dengan frekuensi 30,8 MHz setelah tengah malam selama tahun 2006-2007 di atas Kototabang (Otsuka et al. 2009). Mereka melaporkan bahwa sintilasi sinyal GPS tidak teramati setelah tengah malam oleh radar VHF, tapi lebih banyak teramati pada periode sebelum tengah malam Li et al. (2011) dengan menggunakan data fluktuasi TEC global saat matahari maksimum menunjukkan bahwa, tingkat kejadian *equator F region irregularities* (EFIs) yang tinggi setelah tengah malam di wilayah Afrika dan Pasifik, sedang untuk kawasan Asia Tenggara, dan rendah di wilayah Peru, dan sebagian besar kejadian EFIs setelah tengah malam adalah kelanjutan dari EFIs setelah matahari terbenam. EFIs setelah tengah malam jarang teramati di TEC tetapi sangat sering ditemukan pada ionogram sebagai *spread-F* selama matahari minimum.

Hal ini masih belum dipahami dengan baik, apa yang menyebabkan terjadinya FAIs setelah tengah malam tanpa sintilasi GPS selama tahun-tahun matahari minimum. Temuan kami mengenai perilaku musiman gelembung plasma yang berbeda pada citra ASI dan GPS sintilasi bisa menjadi sebuah petunjuk untuk memecahkan masalah ini.

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Kami menemukan aktivitas gelembung plasma terlihat berkurang dengan menurunnya aktivitas matahari selama tahun 2003-2009. Kami juga mendapatkan variasi musiman yang berbeda antara kejadian gelembung plasma dengan sintilasi di atas Kototabang selama tahun 2003-2009. Tingkat kejadian tertinggi diperoleh pada periode bulan Mei-Juli (*June solstice*), kemungkinan peningkatan pada Mei-Juli disebabkan kemunculan gelembung plasma yang lebih banyak terjadi setelah tengah malam selama aktivitas matahari menurun (misalnya, Subbarao et al. 1994; MacDougall et al. 1998; Chandra et al. 2003; Abdu et al. 2012).

Tingkat kejadian tinggi pada Mei-Juli juga tidak berubah setelah menghapus kejadian gelembung plasma yang mungkin disebabkan oleh badai magnetik. Kami menemukan penurunan kecil dari kejadian gelembung plasma setelah menghapus efek badai magnetik, yang konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa aktivitas magnetik dapat meningkatkan kejadian gelembung plasma ekuator (misal, Basu et al. 2001; 2007; Huang et al. 2010; Kelley et al. 2008).

Hubungan spasial antara sintilasi ionosfer dan struktur gelembung plasma skala besar yang terlihat pada citra ASI dipelajari dengan memproyeksikan citra ASI dan IPP satelit GPS pada peta geografis. Kami menemukan beberapa kejadian dimana IPP dari satelit GPS berada di dalam struktur gelembung plasma skala besar terlihat dalam citra ASI tanpa terjadinya sintilasi. Ini adalah temuan penting bahwa karakteristik kejadian gelembung plasma dapat berbeda untuk manifestasi yang berbeda dari gelembung plasma seperti sintilasi ionosfer. Temuan kami mengenai perilaku musiman gelembung plasma yang berbeda di citra ASI dan GPS sintilasi bisa menjadi petunjuk untuk memahami mekanisme FAIs dari radar VHF setelah tengah malam yang diamati oleh Otsuka et al. (2009) di atas Kototabang pada periode matahari minimum.

Dalam studi ini kami tidak memisahkan antara kejadian gelembung plasma yang muncul sebelum dan setelah tengah malam, dan juga tidak melakukan normalisasi probabilitas gelembung plasma. Disarankan untuk penelitian selanjutnya melakukan normalisasi mengingat keterbatasan kondisi langit cerah di atas Kototabang dan adanya data pengamatan yang tidak lengkap setiap bulannya karena masalah teknis instrumen yang terjadi secara sporadis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LAPAN dan RISTEK dalam mendukung penelitian ini. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada ENRI Jepang yang telah memberikan kesempatan untuk mengunjungi dan bekerja di laboratorium mereka.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdu, M. A, 2012. *Equatorial Spread F Development and Quiet Time Variability Under Solar Minimum Conditions*, Indian Journal of Radio & Space Physics, Vol 41, pp 168-183.
- Basu, S., F. J. Rich, 2007. *Response of the Equatorial Ionosphere at Dusk to Penetration Electric Fields During Intense Magnetic Storms*, Journal of Geophysical Research A, vol. 112, no. 8, Article ID A08308, 14 pages, 2007.
- Basu, S., K. M. Groves, 2001. *Response of the Equatorial Ionosphere in the South Atlantic Region to the Great Magnetic Storm of July 15, 2000*, Geophysical Research Letters, vol. 28, no. 18, pp. 3577–3580.
- Basu, S., Su. Basu, J. Aarons, J.P. McClure, and M. D. Cousins, 1978. *On the Coexistence of Kilometer- and Meter-scale Irregularities in the Nighttime Equatorial F Region*, J. Geophys. Res., 83, 4219-4226.
- Chandra, H., Sharma S, Abdu M A & Batista I S, 2003. *Spread-F at Anomaly Crest Regions in the Indian and American Longitudes*, Adv Space Res (UK), 31. 3717.
- Huang, C., F. J. Rich, and W. J. Burke, 2010. *Storm Time Electric Fields in the Equatorial Ionosphere Observed Near the Dusk Meridian*, Journal of Geophysical Research A, vol. 115, no. 8, Article ID A08313, 14 pages.
- Huang, C., W. J. Burke, J. S. Machuzak, L. C. Gentile, and P. J. Sultan, 2001. *DMSP Observations of Equatorial Plasma Bubbles in the Topside Ionosphere Near Solar Maximum*, J. Geophys. Res., 106, 8131–8142.
- Kelley, M. C and J. Retterer, 2008. *First Successful Prediction of a Convective Equatorial Ionospheric Storm using Solar Wind Parameters*, Space Weather, vol. 6, no. 8, Article ID S08003, 4 pages.
- Lee, C. C., F. D. Chu, W. S. Chen, J. Y. Liu, S.-Y. Su, Y. A. Liou, and S. B. Yu, 2009. *Spread F, GPS Phase Fluctuations, and Plasma Bubbles Near the Crest of Equatorial Ionization Anomaly During Solar Maximum*, J. Geophys. Res., 114, A08302, doi:10.1029/2009JA014195.
- Li, G., Ning, B., Abdu, M. A., Yue, X., Liu, L., Wan, W., and Hu, L, 2011. *On the Occurrence of Postmidnight Equatorial F Region Irregularities During the June Solstice*, J. Geophys. Res., 116, A04318.
- MacDougall, J. W., Abdu M A, Jayachandran P T, Cecile J-F and Batista I S, 1998. *Pre Sunrise Spread F at Forteleza*, J Geophys Res (USA)., 103 (A10) 23415.
- Maruyama, T and N. Matuura, 1984. *Longitudinal Variability of Annual Changes in Activity of Equatorial Spread F and Plasma Bubbles*, J. Geophys. Res., 89, 10, 903-10,912.

- Otsuka, Y., K. Shiokawa, and T. Ogawa, 2006. *Equatorial Ionospheric Scintillations and Zonal Irregularity Drifts Observed with Closely-Spaced GPS Receivers in Indonesia*, J. Meteorological Soc. Japan, 84A, 343 – 351.
- Otsuka, Y., T. Ogawa, and Effendy, 2009. *VHF Radar Observations of Nighttime F-Region Field-Aligned Irregularities Over Kototabang, Indonesia*, Earth Planets Space, 61, 4311–437.
- Saito, S and T. Maruyama, 2006. *Ionospheric Height Variations Observed by Ionosondes Along Magnetic Meridian and Plasma bubble Onsets*, Ann. Geophys., 24, 2991–2996.
- Saito, S and T. Maruyama, 2007. *Large-scale Longitudinal Variation in Ionospheric Height and Equatorial Spread F Occurrences Observed by Ionosondes*, Geophysical Research Letters, Vol. 34, L16109, doi:10.1029/2007GL030618.
- Saito, S., S. Fukao, M. Yamamoto, Y. Otsuka, and T. Maruyama, 2008. *Decay of 3-m-Scale Ionospheric Irregularities Associated with a Plasma Bubble Observed with the Equatorial Atmosphere Radar*, J. Geophys. Res., 113, A11318, doi:10.1029/2008JA013118.
- Shiokawa, K., S. Suzuki, Y. Otsuka, T. Ogawa, T. Nakamura, M. G. Mlynczak, and J. M. Russell III, 2006. *A Multi-instrument Measurement of a Mesospheric Front-like Structure at the Equator*, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 84A, pp. 305-316.
- Shiokawa, K., Y. Katoh, M. Satoh, M. K. Ejiri, T. Ogawa, T. Nakamura, T. Tsuda, and R. H. Wiens, 1999. *Development of Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTI)*, Earth Planets Space, 51, 887-896.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, and T. Ogawa, 2009. *Propagation Characteristics of Nighttime Mesospheric and Thermospheric Waves Observed by Optical Mesosphere Thermosphere Imagers at Middle and Low Latitudes*, Earth Planets Space, 61, 479-491.
- Subbarao, K S V and Krishna Murthy B V, 1994. *Seasonal Variations of Equatorial Spread-F*, Ann Geophys (France), 12. 33.13.
- Suzuki, S., K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Ogawa, and P. J. Wilkinson, 2004. *Statistical Characteristics of Gravity Waves Observed by an all-sky Imager at Darwin, Australia*, J. Geophys. Res., 109, D20S07, doi:10.1029/2003JD004336.
- Tsunoda, R.T, 1985. *Control of the Seasonal and Longitudinal Occurrence of Equatorial Scintillations by the Longitudinal Gradient in the Integrated E Region Pedersen Conductivity*, J. Geophys. Res., 90, 447-456
- Woodman, R. F and C. LaHoz, 1976. *Radar Observations of F Region Equatorial Irregularities*, J. Geophys. Res., 81, 5447–5466.