

KARAKTERISTIK KEMUNCULAN SINTILASI IONOSFER KAITANNYA DENGAN FENOMENA *PLASMA BUBBLE* DI INDONESIA SELAMA 2010-2011

Prayitno Abadi^{1,3,*} dan Susumu Saito², dan Wahyu Srigutomo³

¹Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Bandung, Indonesia

²Electronic Navigation Research Institute (ENRI), Chofu-Tokyo, Japan

³Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, Indonesia
praynestroy@yahoo.co.id ; prayabadi@bdg.lapan.go.id

Abstract

This research have investigated temporal and latitudinal variation of post-sunset low-latitude ionospheric scintillation over Indonesia using GPS receiver installed at Bandung (107.6°E, 6.9°S; magnetic latitude 17.5°S) and Pontianak (109.3°E, 0.02°S; magnetic latitude 8.9°S). This research used S_4 index data during 2010-2011 for both stations. This observation geometry allowed us to study latitudinal variation of post-sunset scintillation, from inside magnetic equator (close to magnetic latitude 0°) to equatorial anomaly region/EIA (equatorial ionization anomaly). This research analyzed temporal variation of scintillation occurrences in day number versus local time (17.00–00.00 LT) plot. This paper found the highest frequent of post-sunset scintillation on equinox months (Mar-Apr and Sep-Oct) for both stations data. The patterns of temporal variation between two stations were quite similar. Furthermore, this research investigated spatial distribution of post-sunset scintillation occurrences using elevation-azimuth coordinate (sky plot). The spatial distribution of scintillation occurrences is concentrated between Bandung and Pontianak that it location is average of crest EIA. Comparing between spatial and temporal variation, post-sunset scintillation occurrences were associated with plasma bubble that generated at equator magnetic then extend to EIA.

Keyword: *ionospheric scintillation, low-latitude, plasma bubble*

Abstrak

Penelitian ini menggunakan data indeks S_4 dari GPS receiver di Bandung (107,6°BT; 6,9°LS; lintang magnetik 17,5°LS) dan Pontianak (109,3°BT; 0,02°LS; lintang magnetik 8,9°LS) selama tahun 2010-2011 untuk meneliti variasi temporal dan lintang kemunculan sintilasi ionosfer di Indonesia. Geometri dari dua lokasi pengamatan tersebut berguna untuk menganalisis variasi lintang kemunculan sintilasi ionosfer, yaitu dari magnetik ekuator menuju daerah anomali lintang kemunculan sintilasi ionosfer, yaitu dari magnetik ekuator menuju daerah anomali lintang kemunculan sintilasi ionosfer (equatorial ionization anomaly/EIA). Makalah ini membuat pola kemunculan sintilasi dalam bentuk plot antara hari (sumbu-y) dan waktu lokal/17.00–00.00 (sumbu-x). Kemunculan sintilasi tertinggi di bulan ekuinoks (Mar-Apr dan Sep-Okt) untuk analisis kedua stasiun. Bahkan, pola variasi temporal keduanya sangat mirip. Hal ini konsisten dengan studi sebelumnya bahwa sintilasi akan terjadi saat sudut solar terminator sejajar deklinasi magnetik. Untuk Indonesia, solar terminator sejajar dengan deklinasi magnetik terjadi pada bulan-bulan ekuinoks. Pada penelitian ini menggunakan koordinat elevasi-azimut (sky plot) untuk menganalisis pola spasial kemunculan sintilasi. Pola variasi spasial dari analisis data Bandung dan Pontianak menunjukkan bahwa konsentrasi kemunculan sintilasi di antara kedua lokasi tersebut. Hasil-hasil tersebut menunjukkan kemunculan sintilasi ionosfer terkait erat dengan fenomena *plasma bubble*. Fenomena ini terbentuk pertama kali di ekuator magnetik, kemudian berkembang menuju EIA.

Kata kunci: *sintilasi ionosfer, lintang rendah magnetik, plasma bubble*

1. PENDAHULUAN

Penyimpangan atau anomali kerapatan elektron ionosfer di daerah ekuatorial dan lintang rendah magnetik menjadi permasalahan serius bagi teknologi navigasi atau komunikasi transionosfer. Penyimpangan ionosfer di daerah tersebut terkait erat dengan penipisan kerapatan elektron, fenomena penyimpangan ini disebut juga *plasma bubble*. Sinyal radio transionosfer ketika melewati daerah *plasma bubble* akan mengalami fluktuasi kuat sinyal (Camargo, dkk., 2000). Peristiwa fluktuasi kuat sinyal ini disebut sintilasi ionosfer. Dalam kasus ekstrem, sintilasi ionosfer dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam penentuan posisi pada sistem navigasi GPS (*Global Positioning System*) (Seo, dkk., 2010). Oleh karena itu, pengembangan model referensi sintilasi ionosfer baik secara temporal maupun spasial sangat diperlukan untuk kebutuhan teknologi komunikasi transionosfer.

Wilayah Indonesia terletak pada lintang rendah magnetik sehingga sering terjadi fenomena *plasma bubble* di daerah ini. *Plasma bubble* pertama kali terbentuk di ekuator magnetik kemudian berkembang dan mampu menjangkau ke lintang yang lebih tinggi bergantung pada aktivitas matahari (Shiokawa, dkk., 2005). Fakta ini juga menjelaskan bahwa sintilasi ionosfer lebih sering terjadi di Indonesia. Dengan demikian, pembuatan model referensi kemunculan sintilasi ionosfer berguna bagi pengguna teknologi komunikasi transionosfer di Indonesia. Pusat Sains Antariksa (Pussainsa)-LAPAN telah memasang GISTM (*GPS Scintillation and TEC Ionospheric Monitoring*) yaitu GPS *receiver* tipe GSV4004B di Bandung (lintang magnetik 17,5°S) dan Pontianak (lintang magnetik 8,9°S). Pemasangan instrumen di dua lokasi tersebut dapat digunakan untuk pembangunan sistem monitoring sintilasi ionosfer di Indonesia.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik kemunculan sintilasi ionosfer menggunakan GSV4004B Bandung dan Pontianak, baik secara temporal maupun spasial untuk wilayah Indonesia. Kami menganalisis variasi temporal sintilasi ionosfer dengan membahas variasi musiman dan waktu lokal. Kami melakukan pembahasan variasi spasial berupa analisis kemunculan sintilasi ionosfer terhadap lintang. Sasaran hasil penelitian ini untuk mendapatkan basis karakteristik sintilasi ionosfer untuk pembuatan peta sintilasi ionosfer di Indonesia.

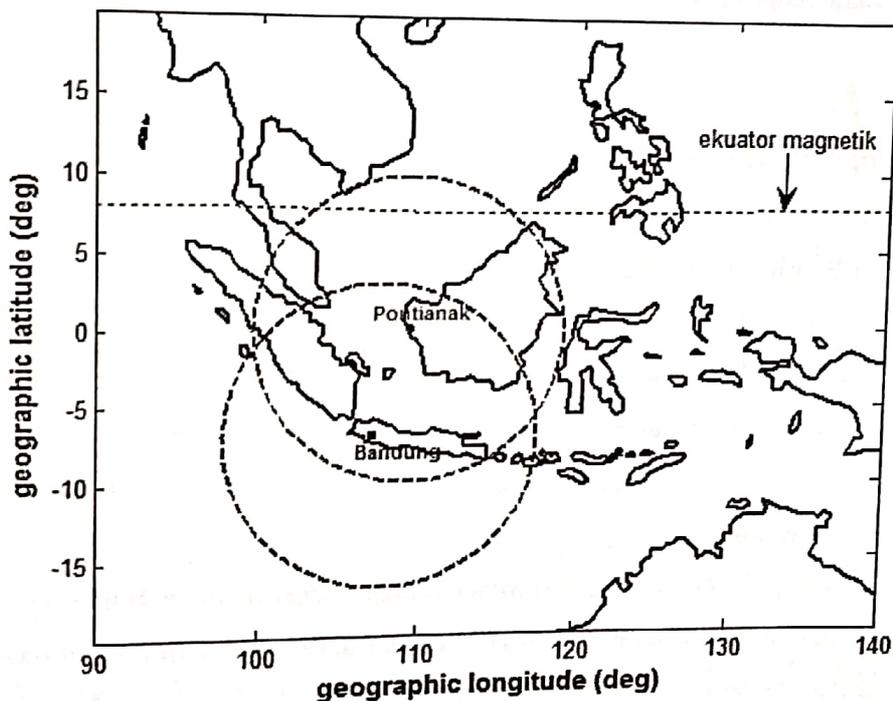
2. DATA DAN METODE

GSV4004B merupakan *receiver* sinyal GPS yang menggunakan antena *chocke ring*. Penggunaan antena tersebut mengurangi efek *multipath* dan bias interfrekuensi. Studi ini menggunakan data yang diperoleh dari *receiver* yang dipasang di Bandung dan Pontianak. Geometri pengamatan dua *receiver* tersebut berguna untuk menganalisis variasi lintang sintilasi ionosfer, yaitu dari sekitar ekuator magnetik hingga daerah *equator ionization anomaly* (EIA) yang terletak di

sekitar bagian selatan Indonesia. Gambar 1 memperlihatkan geometri pengamatan dalam studi kami. Daerah jangkauan dua *receiver* tersebut mampu mendeteksi sintilasi ionosfer di bagian utara hingga selatan Indonesia pada ketinggian 300 km.

Data yang kami gunakan adalah indeks S_4 yang mengindikasikan aktivitas sintilasi ionosfer. Indeks ini merupakan perbandingan antara standar deviasi dan nilai rata-rata dari kuat sinyal yang diterima dan direkam setiap satu menit oleh *receiver* GSV4004B. Indeks ini mempunyai nilai dari 0 hingga 1 dan tidak mempunyai satuan. Kami menggunakan data S_4 mulai dari elevasi 10° . Terdapat dua indeks S_4 yang diukur oleh *receiver*, yaitu S_4 total (S_{4tot}) dan S_4 koreksi (S_{4kor}). S_{4tot} merupakan indeks S_4 yang mengandung efek ionosfer dan *multipath* ataupun derau, sedangkan S_{4kor} merupakan indeks S_4 yang hanya mengandung *multipath* atau derau. Kami mendefinisikan indeks S_4 yang hanya mengandung efek sintilasi ionosfer dengan formulasi berikut.

$$S_4 = S_{4tot} - S_{4kor} \quad (1)$$



Gambar 1. Geometri pengamatan sintilasi ionosfer milik LAPAN yang mampu mencakup daerah ekuator magnetik hingga daerah EIA. Lingkaran biru dan merah merupakan cakupan ionosfer di ketinggian 300 km yang dapat dideteksi masing-masing oleh perangkat pengamatan di Bandung dan Pontianak.

Kami menggunakan data hasil pengamatan tahun 2010 hingga 2011 yang mengindikasikan periode kenaikan aktivitas matahari. Nilai SSN (*smoothed sunspot number*) tahunan untuk 2010

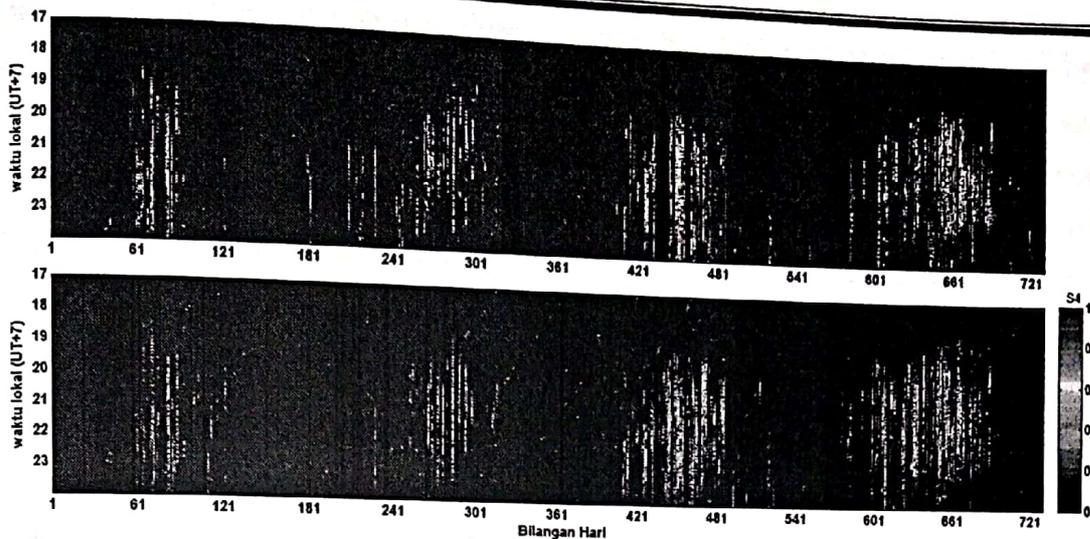
adalah 16,5 dan untuk 2011 adalah 55,7. Data pengamatan selama dua tahun cukup untuk menganalisis variasi temporal sintilasi ionosfer. Sintilasi ionosfer yang terkait dengan fenomena *plasma bubble* terjadi setelah matahari terbenam hingga tengah malam sehingga kami memfokuskan analisis S_4 hanya malam hari waktu lokal (17.00–00.00). Kami membuat plot antara harian/bilangan hari (*day number*) dan waktu lokal untuk menganalisis variasi musiman sintilasi ionosfer. Waktu lokal sama dengan UT (*universal time*) plus 7. Plot tersebut dibuat untuk rentang waktu dua tahun sehingga kami juga dapat menganalisis kaitan antara variasi sintilasi ionosfer dan kenaikan aktivitas matahari.

Analisis distribusi spasial sintilasi ionosfer menggunakan koordinat elevasi dan azimut (*sky plot*). Plot tersebut menganalisis spasial kemunculan sintilasi secara direksional terhadap lokasi *receiver*. Kami menghitung persentase kemunculan sintilasi dalam setiap rentang 10° elevasi dan 20° azimut. Dengan cara tersebut, kami dapat menganalisis kaitan jumlah sintilasi ionosfer terhadap karakteristik kerapatan elektron ionosfer di suatu arah tertentu atau lintang magnetik dari lokasi *receiver*.

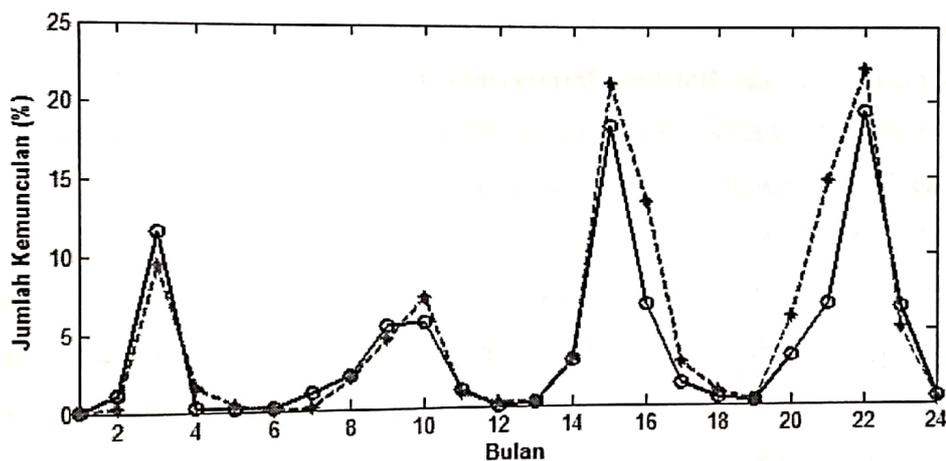
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 menunjukkan variasi musiman dan waktu lokal kemunculan sintilasi ionosfer untuk Bandung dan Pontianak. Indeks S_4 yang diplot merupakan nilai tertinggi di antara nilai S_4 yang tertangkap oleh *receiver* dalam satu menit. Berdasarkan gambar tersebut, kemunculan sintilasi ionosfer pada tahun 2011 lebih tinggi dibanding di tahun 2010, baik untuk Bandung maupun Pontianak. Sintilasi ionosfer membentuk pola puncak kemunculan di bulan ekuinoks (Mar-Apr dan Sep-Okt) setiap tahunnya. Kemunculan sintilasi ionosfer dimulai setelah matahari terbenam, yaitu sekitar pukul 19.00 waktu lokal.

Secara kualitatif, pola kemunculan sintilasi ionosfer dari analisis Bandung dan Pontianak memiliki kemiripan dalam variasi temporal. Analisis kuantitatif pola temporal sintilasi ionosfer dari kedua stasiun tersebut dibandingkan melalui nilai korelasi pola persentase kemunculan sintilasi bulanan. Gambar-3 menunjukkan perbandingan pola persentase kemunculan sintilasi ionosfer bulanan kedua stasiun selama 2010-2011. Kedua pola memiliki kemiripan yang tinggi. Nilai koefisien korelasi kedua pola tersebut adalah 0,9413. Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, pola variasi musiman dan waktu lokal dari kemunculan sintilasi ionosfer antara Bandung dan Pontianak sangatlah mirip.



Gambar 2. Variasi musiman dan harian lokal kemunculan sintilasi ionosfer dari analisis data Bandung (atas) dan Pontianak (bawah) selama 2010-2011.

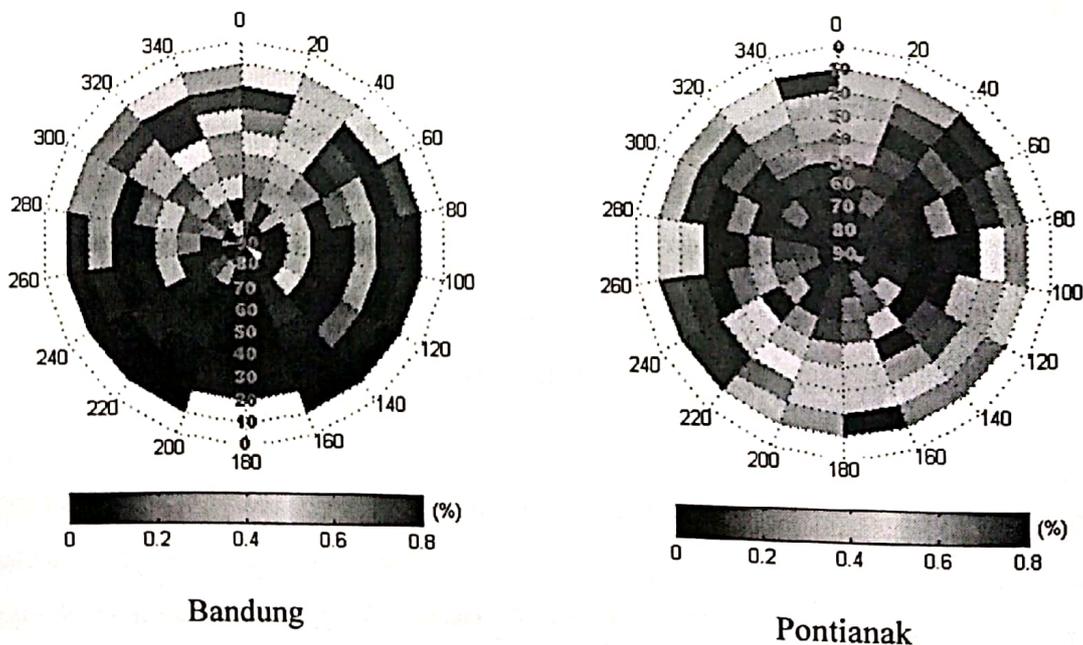


Gambar 3. Persentase kemunculan sintilasi ionosfer bulanan selama 2010-2011 untuk analisis data Bandung (garis solid) dan Pontianak (garis putus-putus).

Variasi musiman dan waktu lokal kemunculan sintilasi ionosfer menunjukkan kaitan erat dengan fenomena iregularitas ekuatorial atau *plasma bubble*. *Plasma bubble* terbentuk setelah matahari terbenam melalui mekanisme instabilitas Rayleigh-Taylor (RTI) di dasar ionosfer ekuator kemudian berkembang ke bagian atas dan di saat bersamaan memanjang mengikuti garis geomagnet menuju lintang rendah magnetik. Fakta pertama adalah variasi harian lokal kemunculan sintilasi setelah matahari terbenam, yaitu pada pukul 19.00 waktu lokal. Fakta kedua adalah variasi musiman sintilasi ionosfer di Indonesia konsisten dengan variasi musiman *plasma bubble*. *Plasma bubble* di sektor Pasifik (termasuk Indonesia) akan semakin tinggi frekuensinya pada bulan-bulan ekuinoks (Otsuka, dkk., 2004). Pada bulan ekuinoks, *solar terminator* untuk sektor

longitudinal Pasifik sejajar dengan deklinasi magnetik sektor tersebut. Kesejajaran *solar terminator* dan deklinasi magnetik membangkitkan medan listrik arah Timur yang merupakan komponen utama dalam pembangkitan *plasma bubble* (Tsunoda, 1985). Fakta ketiga adalah frekuensi kemunculan sintilasi berkorelasi positif dengan aktivitas matahari (Sobral, dkk., 2002). Fakta keempat adalah kemiripan variasi temporal sintilasi ionosfer antara Bandung dan Pontianak. *Plasma bubble* sering terjadi dan mampu menjangkau lintang rendah yang lebih jauh saat periode aktivitas matahari menuju maksimum (Shiokawa, dkk., 2005). Kemiripan pola variasi temporal kedua stasiun mengindikasikan *plasma bubble* yang berkembang menuju ke arah selatan terdeteksi oleh dua stasiun di lintang rendah yang terpisah secara latitudinal.

Analisis spasial kemunculan sintilasi dari data Bandung dan Pontianak akan memperkuat keterkaitan sintilasi dan *plasma bubble*. Gambar 4 menunjukkan persentase kemunculan sintilasi dalam *sky plot* untuk Bandung dan Pontianak selama 2011. Berdasarkan gambar tersebut, distribusi spasial kemunculan sintilasi ionosfer ternyata berlawanan arah. Distribusi spasial kemunculan sintilasi ionosfer untuk analisis Bandung terkonsentrasi di bagian utara dari lokasi *receiver* yang ditunjukkan oleh dominasi warna kuning hingga merah tua. Distribusi spasial kemunculan sintilasi ionosfer untuk analisis Pontianak lebih kuat di bagian selatan dari *receiver*.

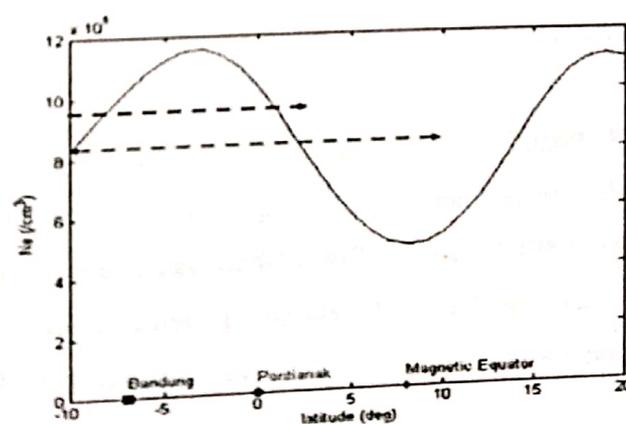


Gambar 4. Distribusi spasial kemunculan sintilasi ionosfer (dalam persen) selama 2011 dalam koordinat elevasi (angka berwarna merah)-azimut (angka berwarna hitam). Titik tengah merupakan lokasi *receiver*.

Frekuensi kemunculan dan intensitas sintilasi ionosfer bergantung pada amplitudo iregularitas ionosfer dan kondisi kerapatan elektron (Maurits, dkk., 2008). Dalam hal ini, iregularitas ionosfer adalah *plasma bubble*. Intensitas sintilasi ionosfer semakin kuat saat *plasma*

bubble yang kuat terjadi. Saat *plasma bubble* menjangkau daerah EIA yang mempunyai kerapatan elektron sangat tinggi, sintilasi akan cenderung menjadi semakin kuat dan frekuensi kemunculannya semakin tinggi pula (Aggarwal, dkk., 2012). Untuk kasus Bandung, distribusi spasial kemungkinan besar dipengaruhi oleh lokasi ekuator magnetik dan daerah puncak EIA yang terletak di sebelah utara Bandung. Lokasi Pontianak kemungkinan besar berada di antara ekuator magnetik dan daerah EIA. Untuk Pontianak, distribusi spasial sintilasi di bagian utara yang lebih lemah dipengaruhi oleh terbentuknya *plasma bubble* di ekuator magnetik, sedangkan distribusi yang lebih kuat di bagian selatan dipengaruhi oleh daerah EIA. Di daerah ini, sintilasi semakin kuat dan lebih tinggi frekuensi kemunculannya karena kerapatan elektronnya tinggi.

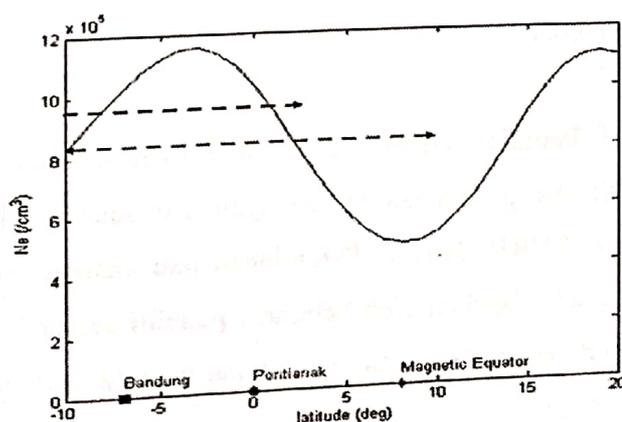
Kami menggunakan model *IRI-2001* untuk mengetahui karakteristik umum kerapatan elektron di Indonesia. Gambar 5 merupakan plot antara lintang geografi dan kerapatan elektron. Gambar tersebut memberikan informasi kondisi tipikal kerapatan elektron ionosfer di ketinggian 300 km untuk sektor lintang geografi Indonesia. Puncak kerapatan elektron yang merupakan puncak EIA belahan bumi selatan ternyata terletak di antara Bandung dan Pontianak. Hasil ini memperkuat dugaan kami bahwa ionosfer sebelah utara Bandung adalah puncak EIA. Receiver Bandung mendeteksi sintilasi ionosfer yang terkonsentrasi di daerah EIA. Gambar tersebut juga memperkuat dugaan bahwa Pontianak terletak di antara ekuator magnetik dan puncak EIA. Distribusi spasial untuk analisis data Pontianak tersebar di bagian utara dan selatan, namun lebih kuat di bagian selatan. Ekuator magnetik terletak di bagian utara Pontianak sebagai daerah awal terbentuknya *plasma bubble*, sedangkan puncak EIA terletak di bagian selatan dengan iregularitasnya akan semakin kuat sehingga menyebabkan banyak sintilasi ionosfer.



Gambar 5. Kondisi umum kerapatan elektron ionosfer di sektor lintang Indonesia berdasarkan model *IRI-2001*. Tanda panah biru dan merah merupakan indikasi area ionosfer di ketinggian 300 km yang dapat dideteksi oleh masing-masing receiver Bandung dan Pontianak.

bubble yang kuat terjadi. Saat *plasma bubble* menjangkau daerah EIA yang mempunyai kerapatan elektron sangat tinggi, sintilasi akan cenderung menjadi semakin kuat dan frekuensi kemunculannya semakin tinggi pula (Aggarwal, dkk., 2012). Untuk kasus Bandung, distribusi spasial kemungkinan besar dipengaruhi oleh lokasi ekuator magnetik dan daerah puncak EIA yang terletak di sebelah utara Bandung. Lokasi Pontianak kemungkinan besar berada di antara ekuator magnetik dan daerah EIA. Untuk Pontianak, distribusi spasial sintilasi di bagian utara yang lebih lemah dipengaruhi oleh terbentuknya *plasma bubble* di ekuator magnetik, sedangkan distribusi yang lebih kuat di bagian selatan dipengaruhi oleh daerah EIA. Di daerah ini, sintilasi semakin kuat dan lebih tinggi frekuensi kemunculannya karena kerapatan elektronnya tinggi.

Kami menggunakan model *IRI-2001* untuk mengetahui karakteristik umum kerapatan elektron di Indonesia. Gambar 5 merupakan plot antara lintang geografi dan kerapatan elektron. Gambar tersebut memberikan informasi kondisi tipikal kerapatan elektron ionosfer di ketinggian 300 km untuk sektor lintang geografi Indonesia. Puncak kerapatan elektron yang merupakan puncak EIA belahan bumi selatan ternyata terletak di antara Bandung dan Pontianak. Hasil ini memperkuat dugaan kami bahwa ionosfer sebelah utara Bandung adalah puncak EIA. Receiver Bandung mendeteksi sintilasi ionosfer yang terkonsentrasi di daerah EIA. Gambar tersebut juga memperkuat dugaan bahwa Pontianak terletak di antara ekuator magnetik dan puncak EIA. Distribusi spasial untuk analisis data Pontianak tersebar di bagian utara dan selatan, namun lebih kuat di bagian selatan. Ekuator magnetik terletak di bagian utara Pontianak sebagai daerah awal terbentuknya *plasma bubble*, sedangkan puncak EIA terletak di bagian selatan dengan iregularitasnya akan semakin kuat sehingga menyebabkan banyak sintilasi ionosfer.



Gambar 5. Kondisi umum kerapatan elektron ionosfer di sektor lintang Indonesia berdasarkan model *IRI-2001*. Tanda panah biru dan merah merupakan indikasi area ionosfer di ketinggian 300 km yang dapat dideteksi oleh masing-masing receiver Bandung dan Pontianak.

Berdasarkan analisis temporal dan spasial, kemunculan sintilasi ionosfer dari data Bandung dan Pontianak terkait erat dengan fenomena *plasma bubble*. Fenomena ini mencakup daerah ekuatorial dan lintang rendah magnetik, bergantung pada aktivitas matahari, memiliki puncak kemunculan di bulan ekuinoks setiap tahunnya, dan mulai muncul setelah matahari terbenam hingga tengah malam. Untuk siklus matahari ke-24, fenomena ini akan semakin banyak terjadi di tahun 2012-2013. Dengan demikian, sintilasi ionosfer juga akan semakin banyak pada tahun-tahun tersebut.

4. KESIMPULAN

Kami telah menginvestigasi kemunculan sintilasi ionosfer lintang rendah untuk sektor Indonesia tahun 2010-2011 menggunakan data S_4 receiver GSV4004B dari stasiun Bandung dan Pontianak. Kami menyimpulkan bahwa kemiripan pola variasi musiman dan harian lokal dari dua stasiun tersebut terkait erat dengan fenomena *plasma bubble*. Sintilasi ionosfer yang terkait dengan fenomena *plasma bubble* memiliki variasi musiman dengan puncak kemunculan di bulan ekuinoks setiap tahunnya, frekuensi kemunculan semakin tinggi sesuai dengan kenaikan aktivitas matahari, dan mulai muncul setelah matahari terbenam. Analisis distribusi spasial kemunculan sintilasi ionosfer juga memperkuat keterkaitannya dengan fenomena *plasma bubble* yang menjangkau ekutor magnetik hingga daerah *EIA*. Berdasarkan analisis spasial pengamatan Pontianak dan Bandung, kami menyimpulkan bahwa sintilasi ionosfer yang terkait *plasma bubble* terkonsentrasi di antara Pontianak dan Bandung. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa lokasi umum puncak *EIA* berada di antara dua lokasi tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi Republik Indonesia atas pendanaan pemagangan riset selama 3 bulan di *Electronic and Navigation research Institute* (ENRI), Jepang. Pengolahan dan analisis data dilakukan di ENRI, serta bimbingan melakukan riset diberikan oleh beberapa peneliti senior ENRI. Serta, penulis juga mengucapkan terima kasih staf stasiun Pontianak yang telah menjaga keberlangsungan operasional perangkat GISTM.

DAFTAR RUJUKAN

Aggarwal, M., H. P. Joshi, k. N. Iyer, Y.-S. Kwak, J. J. Lee, and H. Chandra, Day-today Variability of Equatorial anomaly in GPS-TEC during Low Solar Activity Period, *Advances in Space Research*, 49, 1709-1720, 2012.

- Camargo, P. de Oliveria, J. F. G. Monico, and L. D. D. Ferreira, Application of Ionospheric Corrections in the Equatorial Region for L1 GPS Users. *Earth Planets Space*, 52, 1083-1089, 2000.
- Maurits. S. A., V. E. Gherm, N. N. Zernov, and H. J. Starngeways, Modeling of Scintillation Effects on High-latitude transionospheric Paths using Ionospheric Model (UAF EPPIM) for Background Electron Density Specifications. *Radio Science*, Vol. 43, RS4001, doi:10.1029/2006RS003539, 2008.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, and T. Ogawa, Equatorial Ionospheric Scintillations and Zonal Irregularity Drifts Observed with Closely-Spaced GPS Receivers in Indonesia. *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol. 84A, pp. 343-351, 2006.
- Seo, J., T. Walter, and P. Enge, Correlation of GPS Signal Fades due to Ionospheric Scintillation for Aviation Applications, *Advances in Space Research*, 47, 1777-1788, 2010.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, and T. Ogawa, Quasiperiodic southward Moving Waves in 630-nm Airglow Images in the Equatorial Thermosphere, *Journal of Geophys. Res.*, Vol. 111, A06301, doi:10.1029/2005JA011406, 2006.
- Sobral, J. H. A., M. A. Abdu, H. Takahashi, M. J. Taylor, E. R. De Paula, C. J. Zamlutti, M. G. de Aquino, G. L. Borba, Ionospheric Plasma Bubble Climatology over Brazil based on 22 Years (1977-1998) of 630-nm Airglow Observations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 1517-1524, 2002.
- Tsunoda, R. T., Control of the Seasonal and Longitudinal Occurrence of Equatorial Scintillation by the Longitudinal Gradient in Integrated E Region Pederson Conductivity, *Journal of Geophys. Res.* Vol 90, A1, 447-456, 1985.