

KETIDAKTERATURAN LAPISAN IONOSFER DAN KAITANNYA DENGAN PROSES-PROSES KOPLING ATMOSFER-IONOSFER INDONESIA

[IONOSPHERIC IRREGULARITIES AND ITS RELATION TO COUPLING PROCESS OF ATMOSPHERE-IONOSPHERE OVER INDONESIA]

Dyah Rahayu Martiningrum
Peneliti Bidang Ionosfer dan Telekomunikasi
e-mail: dyahrm09@gmail.com
Diterima 8 April 2012; Disetujui 22 Juni 2012

ABSTRACT

Plasma irregularities or plasma instabilities in the ionosphere region is important to understand the mechanism that conduct those phenomena. Moreover, understanding the ionospheric irregularities is useful for constructing and developing the ionospheric model. Study of the ionospheric irregularities has been done by utilizing remote sensing technology, in this case the MF radar, the Equatorial Atmosphere Radar (EAR) and the GNU Radio Beacon Receiver). Thereafter, the output signals are processed to obtain several parameters of atmospheric and ionospheric dynamic. The relationship between the ionospheric irregularities in the form of Equatorial Spread F (ESF) and the dynamic processes can occur in the upper atmosphere through atmospheric gravity waves propagation from lower atmosphere to the upper atmosphere. We clearly found the process of coupling between E region and F region that play an important role in the formation of irregularities in the ionosphere region. The results also give relationship between solar activity and the Evening Ionospheric Irregularities (ESF) in the equatorial region of Indonesia.

Keywords: *Equatorial Spread F (ESF), Coupling of E region and F region*

ABSTRAK

Ketidakteraturan ataupun ketidakstabilan plasma di lapisan ionosfer perlu dijelaskan mekanismenya sehingga akan bermanfaat dalam pembangunan maupun pengembangan model lapisan ionosfer. Dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh, dalam hal ini adalah radar MF, Radar Atmosfer Ekuator (EAR), dan GNU Radio Beacon Receiver, sinyal-sinyal keluarannya diolah untuk mendapatkan parameter dinamika atmosfer-ionosfer. Hubungan antara ketidakteraturan lapisan ionosfer berupa Equatorial Spread F (ESF) dengan proses dinamis yang terjadi di lapisan atmosfer bawah dapat dijelaskan melalui mekanisme penjalaran gelombang gravitas dari atmosfer bawah ke atmosfer atas. Selain itu ditemukan juga adanya proses kopling antara lapisan E dan lapisan F yang berperan dalam terbentuknya ketidakteraturan lapisan ionosfer tersebut. Hasil lainnya menunjukkan adanya keterkaitan antara aktivitas matahari dengan ketidakteraturan di lapisan ionosfer dengan munculnya Equatorial Spread F (ESF) malam hari di wilayah ekuator Indonesia.

Kata Kunci: *Equatorial Spread F (ESF), Kopling lapisan E dan F*

1 PENDAHULUAN

Variasi lapisan ionosfer, baik yang sifatnya *reguler* maupun *irreguler* terus diteliti untuk mendapatkan pemahaman tentang karakteristik lapisan ionosfer. Hal itu

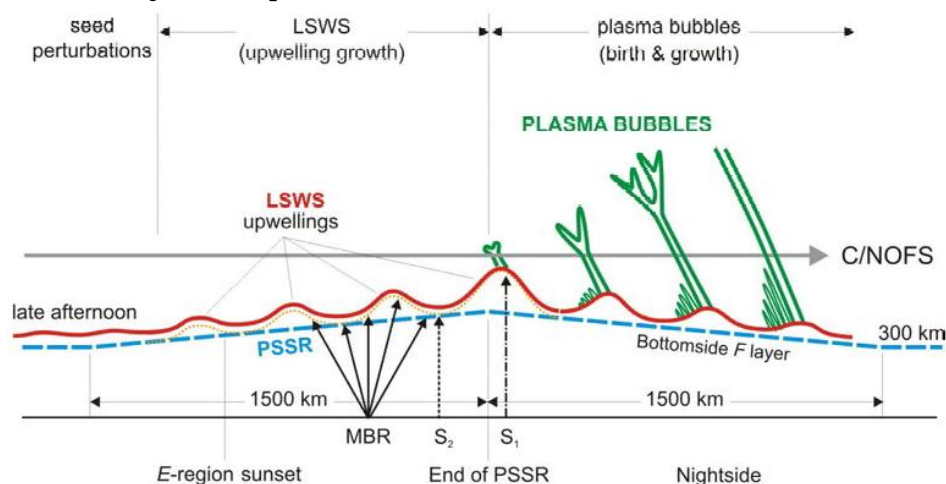
karena bila terjadi gangguan-gangguan pada lapisan ionosfer akan berdampak besar pada sistem-sistem aplikasi yang memanfaatkan dan dipengaruhi lapisan ionosfer tersebut.

Dinamika listrik di lapisan E ionosfer disebabkan oleh pasut atmosfer akibat adanya gradien tekanan dalam atmosfer netral. Gradien tekanan tersebut terjadi akibat adanya absorpsi radiasi UV matahari oleh ozon, uap air, dan atom oksigen (Chapman & Lindzen, 1970). Di lapisan F daerah lintang rendah, medan listriknya berarah ke timur pada siang hari dan ke barat pada malam hari. Medan listrik ke arah timur dan medan magnet ke arah utara akan menyebabkan *drift* $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ke arah atas (*drift* vertikal). Saat plasma mulai mengalami peningkatan kerapatan maka kesetimbangan plasma sepanjang garis medan magnet mulai terganggu dan membuat lapisan plasma kemudian mengalami penurunan. Akibatnya puncak kerapatan plasma di lapisan F₂ terjadi di wilayah ekuator dan menjadi maksimum di sekitar lintang geomagnet 10°-15°. Fenomena inilah yang dikenal dengan daerah anomali ekuator (Rastogi, 1959). Di daerah tersebut sering terbentuk *Field Aligned Irregularity* (FAI) yang menjadi indikator terjadinya ketidakstabilan di lapisan F ionosfer yang dikenal dengan *Equatorial Spread F* (ESF). Dari kajian teoritis ditunjukkan bahwa kejadian ESF dikendalikan oleh ketidakstabilan gravitasional Rayleigh-Taylor (GRT) di bagian bawah lapisan plasma.

Drift plasma dihasilkan oleh kombinasi dampak interaksi antara lapisan E dan F yang kompleks. Interaksi tersebut telah diteliti dengan mengembangkan model matematikanya baik berupa model global maupun model dinamo listrik ekuatorial (Forbes & Lindzen, 1977; Sundaresan & Rao 2010).

Penelitian tentang ketidakstabilan lapisan ionosfer telah memberi informasi awal mekanisme terjadinya fenomena E sporadis (Es) dan spread F di lapisan ionosfer, terutama lapisan ionosfer di atas stasiun Tanjungsari, Pameungpeuk dan Kototabang (Muslim, 2010; Martiningrum et al., 2011; Abadi et al., 2011). Ketidakstabilan yang terjadi baik di lapisan E maupun lapisan F diteliti lebih lanjut terutama interaksi antara keduanya melalui proses kopling antara parameter pada kedua lapisan tersebut.

Tsunoda (2012) memberikan gambaran komprehensif tentang ketidakstabilan di lapisan ionosfer seperti dapat dilihat pada Gambar 1-1. Tampak bahwa ada 3 selang waktu yang harus diperhatikan dalam memahami ketidakstabilan lapisan F ionosfer yaitu akhir siang hari sampai matahari terbenam di lapisan E, kemudian akhir matahari terbenam (*post sun set rise*) di lapisan E dan lapisan F, dan terakhir adalah malam hari. Ketiganya adalah waktu-waktu dimana ketidakstabilan baru mulai terjadi melalui proses *seeding*, kemudian dengan adanya *Large Scale Wave Structure* yang dibangkitkan angin zonal termosferik akan terjadi kenaikan plasma (*upwelling*) lapisan ionosfer sehingga terbentuk ketidakstabilan Rayleigh-Taylor di lapisan F bawah, dan pada malam hari terjadilah spread F.



Gambar 1-1: Mekanisme Spread F dari Interaksi Lapisan E dan F (Tsunoda, 2012)

Untuk lebih memahami dinamika di lapisan ionosfer terutama ketidakstabilan yang diakibatkan oleh adanya interaksi antara lapisan E dan lapisan F, maka makalah ini mengemukakan hasil kajian dan analisis tentang interaksi antara lapisan E dan lapisan F dengan memanfaatkan data radar EAR dan data penerima sinyal GNU Radio Beacon. Hasilnya dapat memberikan gambaran mekanisme yang menyebabkan ketidakstabilan di lapisan ionosfer.

2 DATA DAN METODE

Ketidakstabilan atau ketidakteraturan lapisan ionosfer di lapisan E dan F dapat diamati dengan bantuan alat radar *Equatorial Atmosphere Radar* (EAR) Kototabang (0,20 LS; 100,32 BT) yang memberi data *backscatter plumes* saat lapisan ionosfer mengalami ketidakteraturan yang dikenal dengan istilah *Field Aligned Irregularity* (FAI). Pengamatan FAI dilakukan baik untuk lapisan E maupun lapisan F. Data EAR yang digunakan didasarkan pada hasil kompilasi kejadian FAI sepanjang tahun 2011. Tidak dipungkiri bahwa dinamika atmosfer netral ikut berperan dalam kejadian *spread F*, oleh karena itu diperlukan informasi awal kondisi struktur gelombang skala besar (*Large Scale Wave Structure/LSWS*) dari analisis data *GNU Radio Beacon Receiver* (GRBR). Data *GNU Radio Beacon Receiver* (GRBR) yang digunakan adalah data tahun 2011.

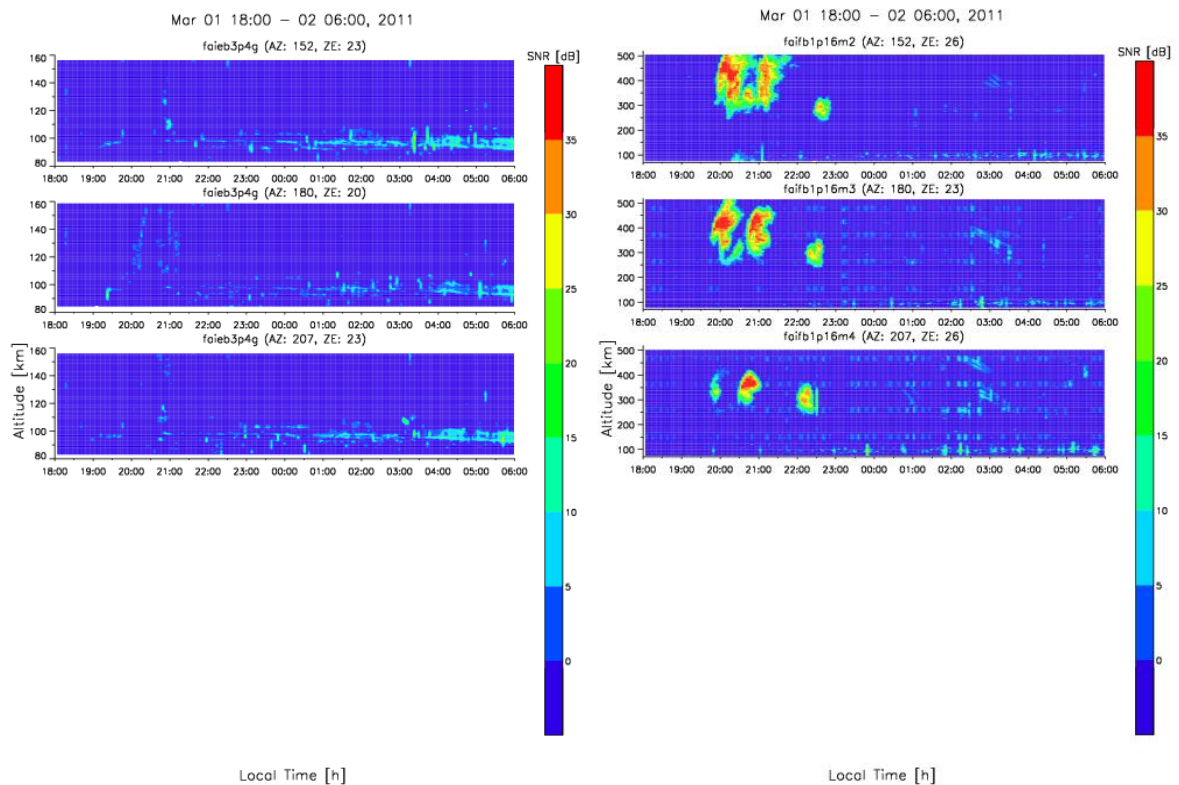
Data FAI dapat diperoleh dan dilihat secara cepat melalui situs <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/data-fai/index.html#rti>. Data berupa jadwal pengamatan radar EAR dan grafik kuat sinyal yang dihamburkan radar setiap saat. Data tersebut dikompilasi berdasarkan ketinggian lapisan ionosfer, yaitu lapisan E dan lapisan F serta tipe dari FAI (*post-sunset* atau *post-midnight*). Hasil kompilasi data FAI kemudian digambarkan dalam bentuk grafik frekuensi kejadian kedua tipe FAI tersebut.

Informasi tentang struktur gelombang skala besar (*Large Scale Wave Structure*) diperoleh dari analisis data *GNU Radio Beacon Receiver* (GRBR) dengan memanfaatkan perbedaan fase diferensial antara pemancaran sinyal 150 MHz dan 400 MHz. Waktu tunda fase diferensial berbanding lurus dengan jumlah elektron sepanjang penjarannya. Dengan analisis tersebut, diperoleh variasi longitudinal dari *Total Electron Content* (TEC) relatif (*slant TEC*). TEC relatif tersebut kemudian dikonversikan menjadi nilai TEC mutlak dengan pendekatan diferensial. Teknik perata-rataan diterapkan terhadap data residu TEC, sehingga diperoleh pola mirip gelombang yang dikenal dengan struktur gelombang skala besar (*Large Scale Wave Structure*). Pada makalah ini digunakan data GRBR dari 2 titik stasiun di Vietnam yaitu Bac Lieu (9,3°LU; 105,7°BT) dan Ho Chi Minh (10.8°LU, 106. 7°BT). Pemanfaatan dua titik stasiun GRBR di Vietnam untuk menganalisis ESF di atas Kototabang masih diperbolehkan karena secara longitudinal jarak kedua stasiun tersebut dengan stasiun EAR tidak melebihi 1000 km (Tsunoda et al., 2011).

Studi kasus dilakukan untuk identifikasi keterkaitan antara kejadian FAI dengan terbentuknya LSWS berdasarkan hasil pengolahan data FAI dan LSWS. Untuk melihat penjaran FAI dan meyakinkan bahwa penjarannya dipengaruhi oleh LSWS maka dibuat animasinya dengan memanfaatkan perangkat lunak *Interactive Data Language* (IDL), XnView, dan MakeAVI.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

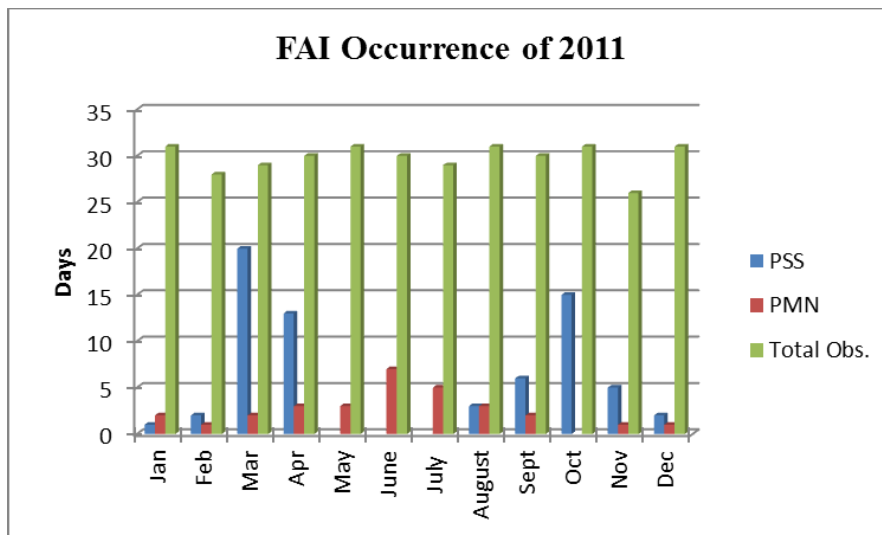
Hasil penelitian menunjukkan beberapa kejadian FAI terjadi sepanjang tahun 2011 baik di lapisan E maupun di lapisan F. Sebagian hasilnya dapat dilihat pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1: Plot *Field Aligned Irregularity* dari hamburan sinyal radar di lapisan E (panel kiri) dan lapisan F (panel kanan) ionosfer luaran EAR Kototabang

Kedua panel dalam Gambar 3-1 menunjukkan hamburan sinyal radar EAR Kototabang untuk lapisan E (panel kiri) dan lapisan F (panel kanan). Sumbu-x adalah waktu lokal (18:00 s.d. 06:00), sementara sumbu-y adalah ketinggian, 80-160 km (lapisan E) dan 100-500 km (lapisan F). Grafik hamburan sinyal radar menggambarkan dinamika lapisan ionosfer. Saat terjadi ketidakaturan lapisan ionosfer seperti E sporadik dan *spread F* maka akan terlihat jelas dari grafik hamburan sinyal radar tersebut. Ada 4 tipe FAI berdasar grafik hamburan sinyal radar, yaitu *bottom*, *bottom-side*, *plumes*, dan *post-midnight*. Dari keempatnya, FAI di lapisan E umumnya termasuk dalam tipe *bottom-side* atau hamburan sinyalnya terkonsentrasi di bagian bawah lapisan E, sementara FAI untuk lapisan F termasuk ke dalam tipe *plumes* dan *post-midnight*. Oleh karena itu dalam makalah ini FAI hanya diklasifikasikan menjadi tipe *post-sunset* (sebelum tengah malam) dan *post-midnight* (sesudah tengah malam). Kompilasi data kejadian *Field Aligned Irregularities* (FAI) selama 2011 dapat dilihat pada Gambar 3-2. Tampak pada gambar, bahwa FAI yang terjadi sebelum tengah malam (*post-sunset*) lebih dominan dibandingkan dengan FAI yang terjadi sesudah tengah malam (*post midnight*).

ESF tipe *post-sunset* biasanya berkaitan dengan *Pre Reversal Enhancements* (PRE) malam hari dari kecepatan pergeseran vertikal [Fejer et al., 1999]. *Pre Reversal Enhancements* (PRE) menyebabkan ionosfer secara cepat naik dan frekuensi tumbukan menjadi rendah, sehingga memicu pertumbuhan ketidakstabilan Rayleigh-Taylor. Sementara ESF tipe *post-midnight* terjadi karena adanya gelembung yang telah terbentuk sebelumnya di tempat lain (gelembung fossil) dan terbawa oleh penjaralan *drift* ke arah timur atau barat [MacDougall et al., 1998; Bhattacharyya et al., 2001], merupakan kelanjutan dari pembentukan dan dinamika dari ketidakaturan yang terjadi sesaat setelah matahari terbenam (ketidakstabilan plasma lokal).



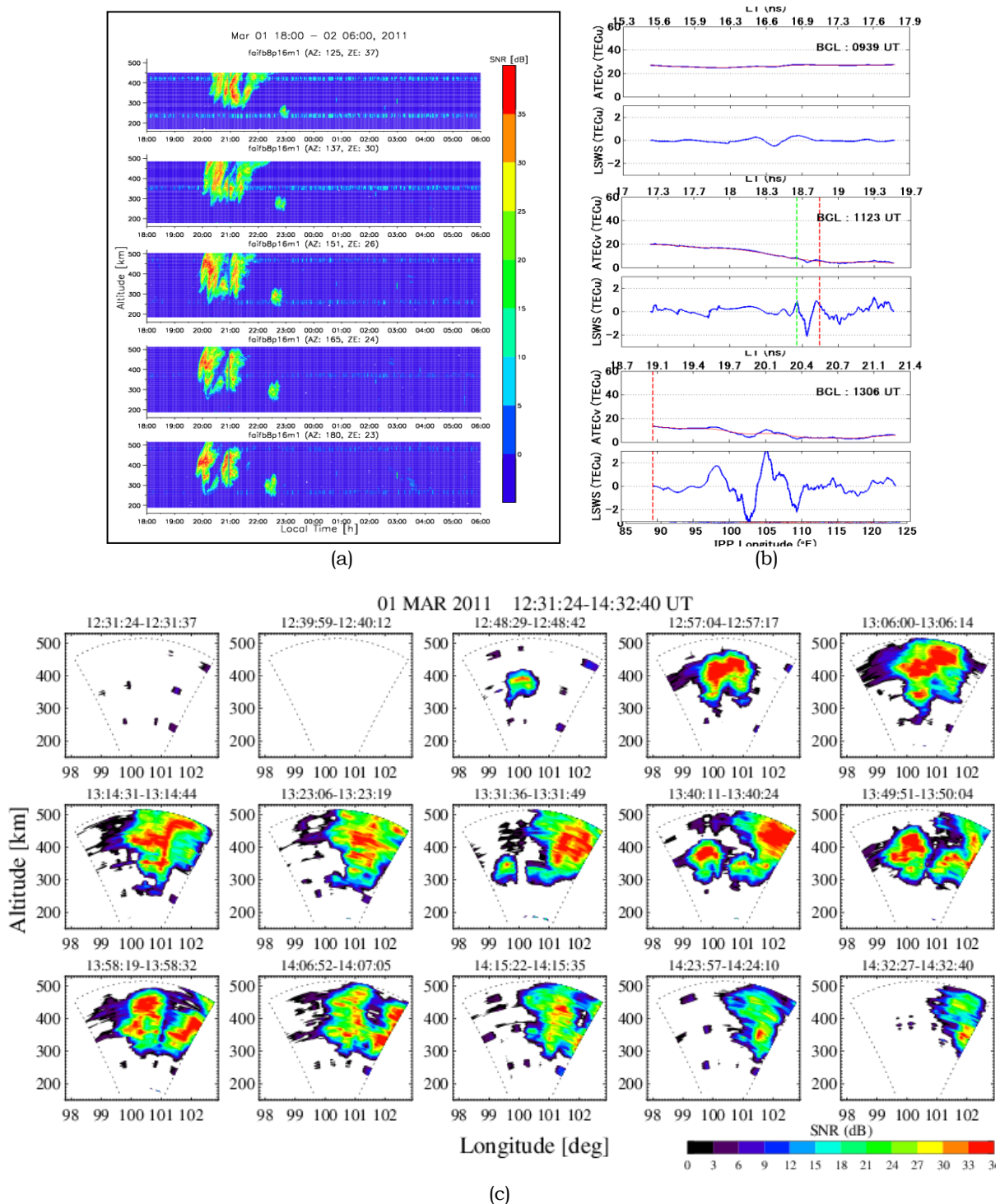
Gambar 3-2: Frekuensi kejadian FAI tipe *post-sunset* (PSS) atau sebelum tengah malam dan *post-midnight* (PMN) atau setelah tengah malam tahun 2011

Penelitian sebelumnya yang mengkaji tentang ESF telah memberikan gambaran tentang karakteristik ESF seperti variasi musiman dan variasi kejadiannya secara longitudinal [Maruyama et al., 1984; Aarons, 1993], variasi karena pengaruh aktivitas matahari [Yokoyama et al., 2011], variasi musiman karena angin meridional [Krall et al., 2009], dan variasi akibat deklinasi medan magnet bumi [Abdu & Kherani, 1992]. Namun variasi hariannya belum dapat dipahami secara baik. Dari hasil kompilasi data kejadian FAI sepanjang tahun 2011 juga terlihat adanya variasi musiman dimana pada bulan Maret dan Oktober terlihat adanya peningkatan kejadian FAI sebelum malam hari (*post-sunset*). Pada bulan tersebut wilayah ekuator mendapatkan radiasi matahari lebih besar dibandingkan dengan bulan lainnya sehingga kerapatan elektron residu di lapisan F ketika sore sampai malam hari juga lebih besar. Ketidakstabilan Rayleigh-Taylor yang terjadi di bagian bawah lapisan F menyebabkan lapisan dengan kerapatan elektron yang kecil berusaha menembus ke atas sehingga dari grafik hamburan sinyal radar tampak FAI dengan jenis *plumes* yang terjadi pada selang waktu tertentu (sebelum tengah malam) dan menjulang sampai ke ketinggian lebih dari 500 km.

Meskipun informasi terjadinya FAI telah diperoleh, namun evolusinya secara longitudinal juga diperlukan untuk menjelaskan mekanisme harian dari FAI, sehingga secara tidak langsung evolusi harian ESF dapat diketahui.

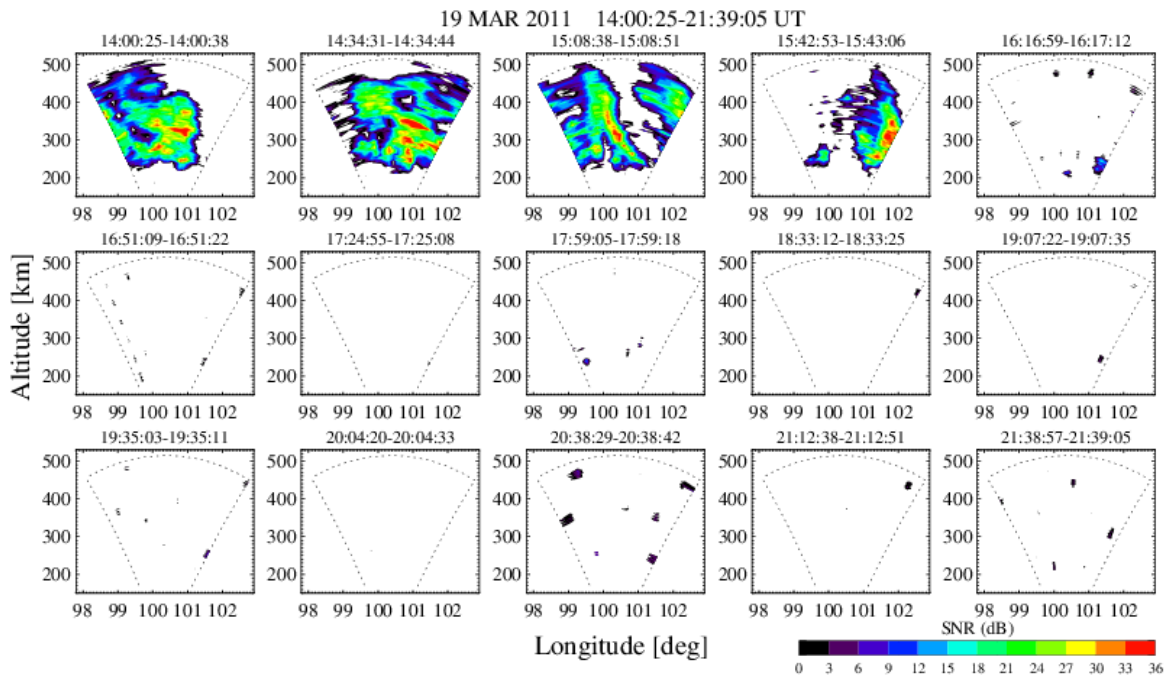
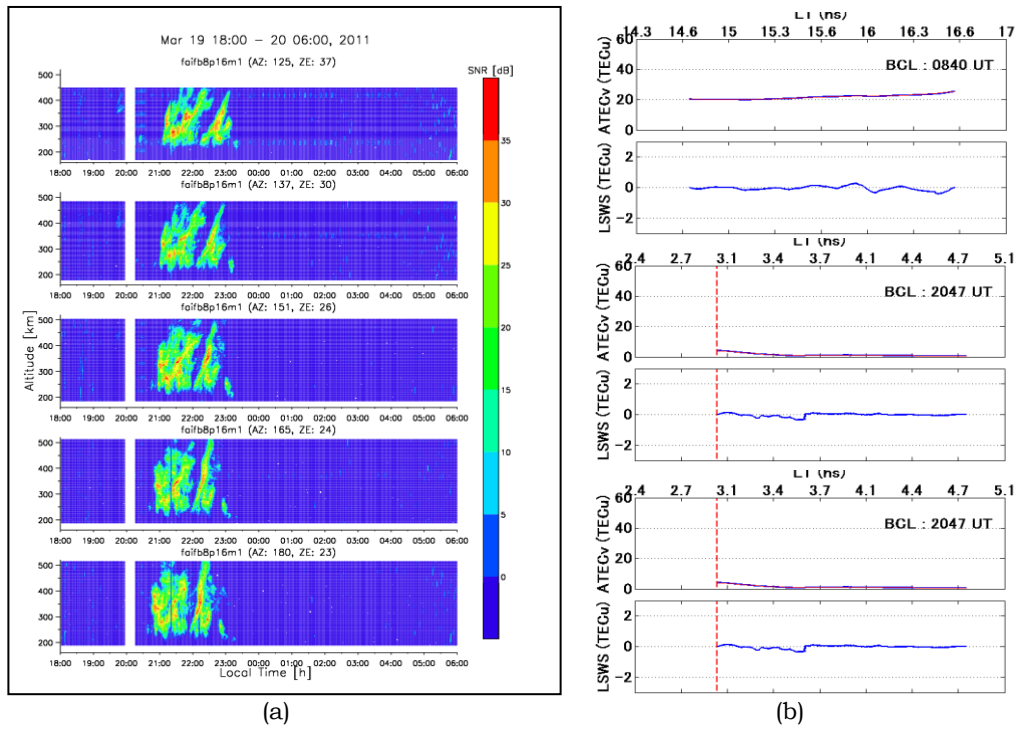
[Thampi & Yamamoto, 2012; Tsunoda, 2005] mengusulkan untuk memanfaatkan data berdasarkan suatu metode untuk menganalisis *Large Scale Wave Structure* (LSWS) dari pengukuran *GNU Radio Beacon Receiver* (GRBR). LSWS berperan dalam tahap upwelling (kenaikan plasma) pada kejadian *ESF*. Dengan memanfaatkan data FAI dari EAR dan analisis LSWS dari GRBR untuk bulan Maret sampai dengan Mei 2011 diperoleh gambaran hubungan antara kejadian FAI dan LSWS.

Tiga studi kasus telah dikaji yaitu, pertama saat FAI terjadi dan LSWS terjadi (Gambar 3-3). Kedua, saat FAI terjadi dan LSWS tidak dideteksi (Gambar 3-4), dan yang ketiga saat LSWS dideteksi, namun FAI tidak terjadi. Hasilnya menunjukkan 28 kejadian untuk kasus pertama, 5 kejadian untuk kasus kedua, dan 23 kejadian untuk kasus ketiga. Sebagai contoh kasus ditunjukkan oleh Gambar 3-3 dan Gambar 3-4. Gambar 3-3 menunjukkan konsistensi hasil penelitian sebelumnya bahwa LSWS berperan penting dalam perkembangan ESF. Dari data *fansector* terlihat evolusi FAI 1 Maret 2011 (Gambar 3-3 (c)). *Equatorial Plasma Bubble* (EPB) atau ESF muncul pada 12:48:29 UT (19:48:29 LT) dan ketinggian 300-400 km. EPB ini berkembang dan menjalar ke arah timur, kemudian pada 14:32:27 UT (21:32:27 LT) terlihat hampir menghilang. Ketinggian EPB mencapai 500 km.



Gambar 3-3: (a) Kejadian FAI dari EAR; (b) LSWS dari GRBR; dan (c) Plot *fansector* dari EAR untuk kasus 1 Maret 2011

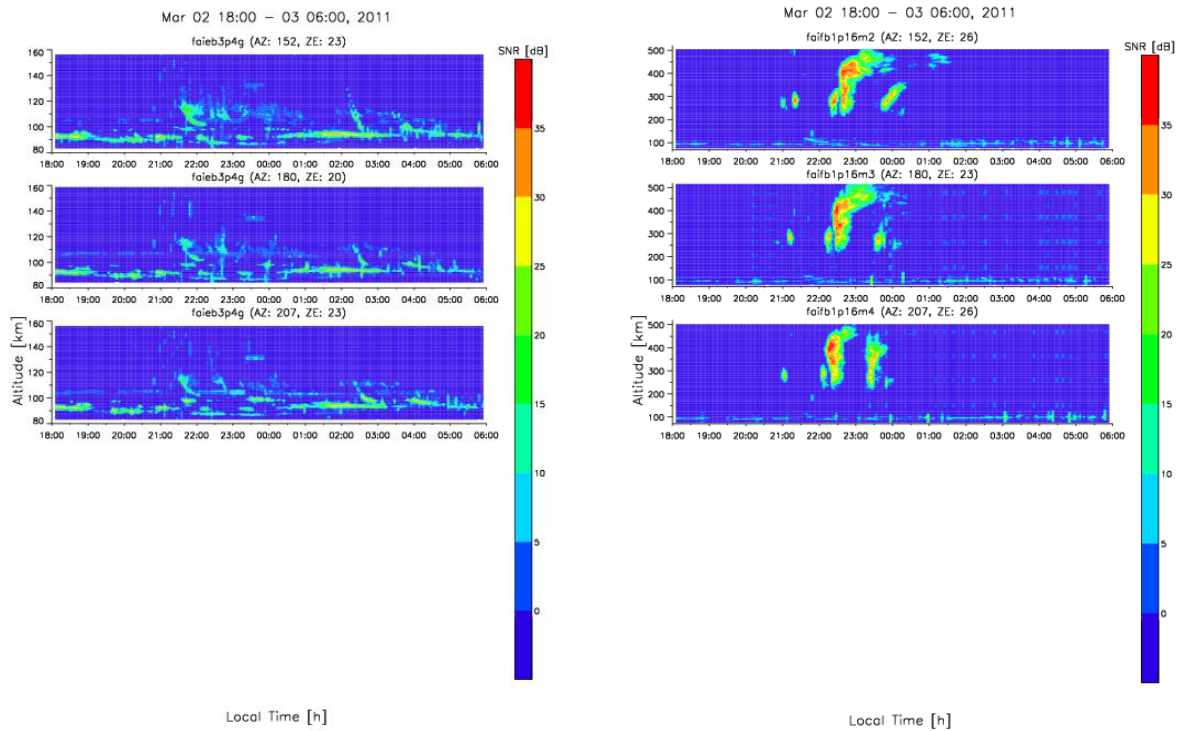
Hanya ada 5 kejadian FAI tidak diikuti oleh LSWS, Gambar 3-4 (a) dan 3-4 (b) menunjukkan contoh kasus tersebut. Dari plot *fansector* terlihat perkembangan EPB/ESF 19 Maret 2011 (Gambar 3-4 (c)). Serupa dengan kasus pertama, EPB/ESF muncul pada ketinggian 200-300 km di sebelah barat dari *fansector*, tetapi EPB/ESF kemudian tidak dapat naik ke ketinggian lebih tinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar EPB/ESF berkembang dan menjalar ke atas karena ada energi dari gelombang (LSWS). Untuk kasus ketiga diperlukan kajian tersendiri karena penelitian ini dilakukan untuk menegaskan hasil penelitian sebelumnya tentang peran LSWS dalam mekanisme terbentuknya ESF di lapisan ionosfer (Tsunoda et al., 2011).



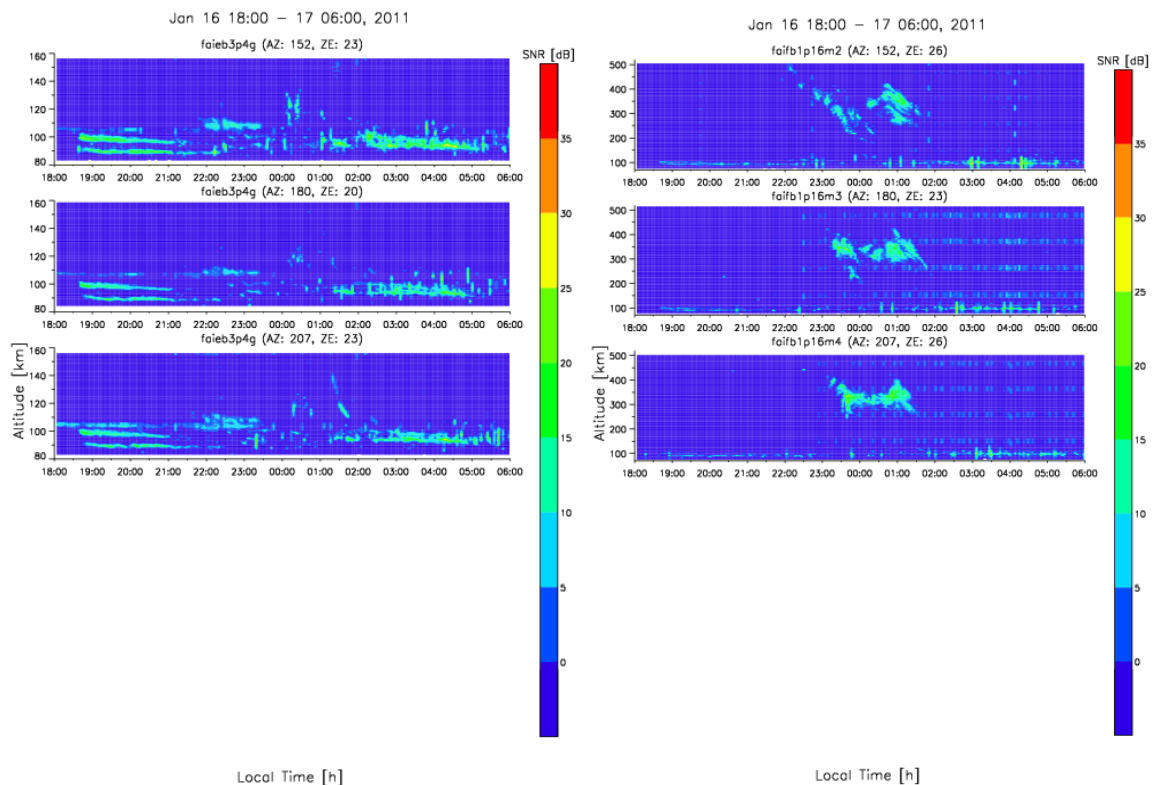
Gambar 3-4: (a) Kejadian FAI dari EAR; (b) LSWS dari GRBR; dan (c) Plot fansector dari EAR untuk kasus 19 Maret 2011

Analisis FAI keluaran radar EAR juga menunjukkan adanya 2 tipe kopling antara lapisan E dan F. Sebagai contoh kedua tipe tersebut diperlihatkan oleh Gambar 3-5 dan Gambar 3-6. Gambar 3-5 adalah plot hamburan sinyal radar EAR dari lapisan E (kiri) dan lapisan F (kanan) ionosfer untuk data 2-3 Maret 2011. Kedua panel tersebut menunjukkan bahwa hamburan sinyal radar pada lapisan E yang kuat diikuti oleh kejadian EPB/ESF di lapisan F (Tipe I). Demikian juga dengan Gambar 3-6, plot hamburan sinyal radar EAR dari lapisan E (kiri) dan lapisan F (kanan) ionosfer untuk data 16-17 Januari 2011. Gambar 3-6 menunjukkan tipe II kopling antara lapisan E dan lapisan F. Dari kedua panel tersebut terlihat bahwa EPB/ESF di lapisan F tidak didahului dengan hamburan sinyal radar yang kuat pada lapisan E. Kedua tipe

hamburan sinyal radar tersebut sering dijumpai pada analisis data EAR namun mekanisme yang menjelaskannya masih terus diteliti dan dikaji. Dengan pengamatan cepat (*quicklook*), tipe pertama lebih banyak ditemukan dibandingkan tipe kedua, artinya ketidakteraturan di lapisan E (*E sporadic*) mempengaruhi ketidakteraturan di lapisan F (*spread F*). Mekanisme yang mungkin untuk menjelaskan hal tersebut adalah melalui penjalaran gelombang atmosfer dari bawah, sebagaimana yang diusulkan oleh peneliti Brazil (Abdu et al., 2011).



Gambar 3-5: Kopling E dan F Tipe I



Gambar 3-6: Kopling E dan F Tipe II

4 KESIMPULAN

Hasil kajian teoritis dan analisis data pengamatan untuk melihat ketidakstabilan lapisan ionosfer dari interaksi antara lapisan E dan lapisan F, baik secara longitudinal maupun vertikal, menunjukkan pola umum yang sama yaitu ada keterkaitan antara ketidakteraturan yang terjadi di lapisan F dengan lapisan E. Diperoleh juga adanya pola musiman kejadian FAI. Saat matahari dekat dengan wilayah ekuator, FAI sebelum tengah malam lebih sering terjadi dibandingkan dengan FAI sesudah tengah malam.

Tinjauan secara longitudinal yang melibatkan 3 titik yang relatif berdekatan bujur geografinya (Kototabang, Bac Lieu, dan Ho Chi Minh) menunjukkan ketidakstabilan lapisan F seakan menjalar secara longitudinal. Hasil tersebut juga menguatkan teori bahwa ada peran penting struktur gelombang skala besar (*Large Scale Wave Structure*) dalam peristiwa *Equatorial Spread F* (ESF). LSWS berperan dalam membangkitkan kenaikan lapisan ionosfer (*upwelling*) sehingga menimbulkan ketidakstabilan plasma di lapisan F.

Tinjauan secara vertikal memberi informasi tentang mekanisme kopling antara lapisan E dan lapisan F. Berkaitan dengan kopling antara lapisan E dan F, ditemukan adanya dua macam proses kopling antara kedua lapisan tersebut yang berperan dalam ketidakteraturan/ketidastabilan plasma ionosfer. Pertama, ketidakteraturan di lapisan F (*spread F*) didahului oleh terjadinya E sporadik di lapisan E dan yang kedua, ketidakteraturan di lapisan F (*spread F*) tidak didahului oleh terjadinya E sporadik. Pada beberapa kasus FAI tahun 2011, pengamatan cepat menunjukkan bahwa tipe pertama yang mendominasi data FAI tahun 2011. Mekanisme yang mungkin untuk menjelaskan hal tersebut adalah melalui penjalaran gelombang atmosfer dari bawah (pasut, gravitas, dan planeter).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LAPAN serta Kementerian Riset dan Teknologi atas kesempatan yang diberikan untuk mengikuti program pemagangan riset di RISH, Kyoto University, Jepang. Terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Mamoru Yamamoto atas bimbingan dan arahan selama di Kyoto University, serta DR. Tatsuhiro Yokoyama yang banyak membantu dalam pengolahan data dan analisisnya. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada dewan penyunting Jurnal Sains Dirgantara LAPAN.

DAFTAR RUJUKAN

- Aarons, J., 1993. *The Longitudinal Morphology of Equatorial Spread-F-layer Irregularities Relevant to Their Occurrence*, Space. Sci. Rev., 63, 209±243.
- Abadi, P., Sri, E., dan Nandang, D., 2011. *Asimetri Ekuinoksial Iregularitas Nokturnal Ionosfer di Lintang Rendah: Bukti Peran Gelombang Gravitas*, Prosiding Seminar Nasional Fisika 2011, Pusat Penelitian Fisika-LIPI.
- Abdu, M.A. and Kherani, E.A., 2011. *Coupling Processes in the Equatorial Spread F/ Plasma Bubble Irregularity Development*, IAGA Special Sopron Book Series 2, DOI 10.1007/978-94-007-0326-1_16, © Springer Science+Business Media B.V.
- Bhattacharyya, A., Basu, S., Groves, K. M., Valladares, C. E., and Sheehan, R., 2001. *Dynamics of Equatorial F Region Irregularities from Spaced Receiver Scintillation Observations*, Geophys. Res. Lett., 28, 119–122.

- Chapman S. and Lindzen R.S., 1970. *Atmospheric Tides*, Reidel Press, Dordrecht, Holland.
- Fejer, B.G., Scherliess, L., 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 104 (A9), 19859–19869.
- Forbes J.M and Lindzen R.S., 1977. *Atmospheric Solar Tides and Their Electrodynamics Effects*, J. Atmos. Terr. Phys, 39, 1369-1377.
- Krall, J., J. D. Huba, G. Joyce, and S. T. Zalesak, 2009. *Three-Dimensional Simulation of Equatorial Spread-F with Meridional Wind Effects*, Ann. Geophys., 27, 1821–1830.
- MacDougall, J.W., Abdu, M. A., Jayachandran, P. T., Cecile, J. F., and Batista, I. S., 1998. *Pre sunrise spread-F at Fortaleza*, J. Geophys. Res., 97, 13 865–13 876.
- Martiningrum, D.R., Gatot, W. dan Dessi, M., 2011. *Ketidakstabilan Plasma di Lapisan E Ionosfer di atas Kototabang dan Pameungpeuk*, Prosiding Seminar Nasional Atmosfer dan Antariksa, 374-387.
- Maruyama, T. and Matuura, N., 1984. *Longitudinal Variability of Annual Changes in Activity of Equatorial Spread F and Plasma Bubbles*, J Geophys Res 89 (A12):10903–10912.
- Muslim, B. dan Septi, P., 2010. *Pengamatan Irregularitas E Sporadik Ionosfer Menggunakan Radar VHF dan Ionosonda HF di atas Kototabang*, Jurnal Elektronika, No. 2, Vol. 10, ISSN: 1411-8289.
- Rastogi, R.G., 1959. *The Diurnal Development of the Anomalous Equatorial Belt in the F2 Region of the Ionosphere*, Journal of Geophysical Research, Vol. 64, Issue 7, pages 727-732.
- Sundaesan S. and Nageswara Rao, 2010. *Mathematical Modeling of Plasma Drift Over Equatorial Low Latitude Regions*, Advances in Space Research, 46, 626-636.
- Thampi S.V. and M. Yamamoto, 2012. *Evolution of Plasma Bubbles Over Vietnam Region Observed using the CERTO Beacon on Board C/NOFS satellite*, Indian Journal of Radio & Space Physics, Vol. 41, pp 233-239.
- Tsunoda R.T., 2005. *On the Enigma of Day-to-Day Variability in Equatorial Spread F*, Geophysical Research Letter Vol. 32, 108103, 4 pp., doi:10.1029/2005g1022512.
- Tsunoda R.T., 2012. *On the Importance of Instrument Clusters For Equatorial Spread F Studies*, International Symposium on the 10th Anniversary of the Equatorial Atmosphere Radar (EAR), Jakarta, September 22-23, 2011, ISBN. 978-979-1458-52-8.
- Tsunoda R.T., M. Yamamoto, T. Tsugawa, T. L. Hoang, S. T. Ram, S.V. Thampi, H. D. Chau, and T. Nagatsuma, 2011. *On Seeding, Large-Scale Wave Structure, Equatorial Spread F, and Scintillations Over Vietnam*, Geophys. Res. Lett., 38, L20102, doi:10.1029/2011GL049173.
- Yokoyama T., M. Yamamoto, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Tsugawa, S. Watanabe, and R.F. Pfaff, 2011. *On post-midnight low latitude ionospheric irregularities during solar minimum: 1. Equatorial Atmosphere Radar and GPS-TEC observations in Indonesia*, Journal of Geophysical Research, Vol. 116, A11325, doi: 10. 1029/2011JA016797.