

KOPLING ANTARA LAPISAN E DAN LAPISAN F IONOSFER

Dyah R. Martiningrum

Peneliti Bidang Ionosfer dan Telekomunikasi, LAPAN

e-mail: dyah_rm@bdg.lapan.go.id

RINGKASAN

Ada dua aspek yang perlu diperhatikan dalam memahami karakteristik lapisan ionosfer, yang pertama adalah berkaitan dengan regularitas (keteraturan) dan yang kedua berkaitan dengan irregularitas (ketidakteraturan). Regularitas lapisan ionosfer terkait dengan berbagai variasi yang terjadi di lapisan ionosfer meliputi variasi harian, musiman, jangka panjang, dan variasi akibat lokasi. Irregularitas lapisan ionosfer meliputi E sporadis (Es), berupa peningkatan kerapatan elektron di lapisan E dan spread F, berupa ketidakstabilan plasma di lapisan F. Pada makalah ini dibahas tentang mekanisme kopling antara lapisan Es dan F, terutama peranan ketidakstabilan Rayleigh-Taylor di wilayah ekuator dan ketidakstabilan Perkins di wilayah lintang tengah. Beberapa kasus peristiwa kopling E dan F di lintang tengah dan ekuator daerah lain juga dibahas, sehingga memberikan gambaran kemungkinan mekanisme tersebut di daerah ekuator Indonesia.

1 PENDAHULUAN

Ketidakstabilan lapisan ionosfer lintang tengah yang pertama ditemukan berupa terjadinya *turbulent upwelling* dan ketidakteraturan lapisan E dari pengolahan data radar *Mesosphere-Upper Atmosphere* (MU). Radar MU adalah salah satu alat yang digunakan untuk meneliti proses-proses fisis dan dinamik lapisan atmosfer tengah dan atmosfer atas (Fukao, S et al, 1991); (Yamamoto, M et al, 1991). Ketidak-teraturan lapisan E, yang kemudian dikenal sebagai E sporadis (Es) tersebut, mempunyai peranan penting dalam kopling antara lapisan E dan lapisan F di lintang tengah.

Yokoyama, T. et al, (2011), menemukan adanya suatu pola quasi periodik (QP) dari data *echo* radar yang diamati di lapisan E sporadis (Es). Pola quasi periodik (QP) tersebut berkaitan dengan terjadinya gangguan di lapisan F yang dikenal sebagai *Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances* (MSTID). Pola quasi periodik (QP) di lapisan E sporadis (Es) dan *Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances* (MSTID) di lapisan F lintang tengah sering terlihat berarah dari barat laut-

tenggara, kemudian menjalar ke arah barat daya di belahan bumi utara. Ketidakstabilan Perkins di lapisan F dan ketidakstabilan E sporadis (Es) di lapisan E dapat menyebabkan terjadinya struktur miring atau pembelokan. Namun yang penting diperhatikan, laju pertumbuhan ketidakstabilan Perkins sendiri tidak akan dapat menyebabkan gangguan di lapisan F. Faktor lain yang berperan penting untuk mempercepat pertumbuhan *Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances* (MSTID), yaitu terjadinya kopling elektrodinamika antara kedua ketidakstabilan di lapisan E dan lapisan F. Dari suatu simulasi atau pemodelan numerik ditemukan bahwa proses polarisasi di lapisan E, yang berperan penting dalam pertumbuhan *Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances* (MSTID), berupa gangguan berarah barat laut-tenggara di lapisan F lintang tengah. Beberapa kasus kajian kopling antara lapisan E dan F, baik di daerah lintang tengah maupun di daerah ekuator, mendukung hipotesa peranan ketidakstabilan lapisan E sporadis (Es) dalam menyebabkan terjadinya ketidakstabilan di lapisan F ionosfer. Pada sub-

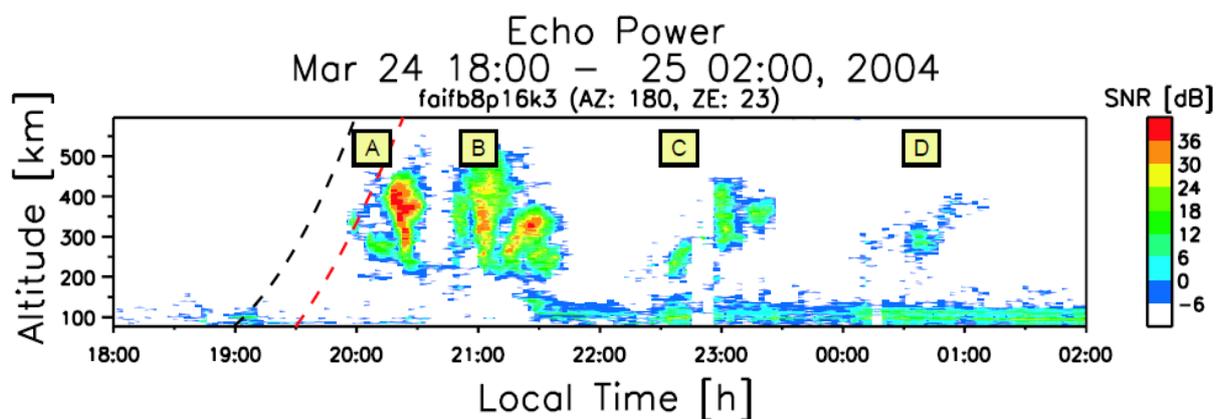
sub bahasan berikutnya akan dijelaskan tentang ketidakstabilan Rayleigh-Taylor dan ketidakstabilan Perkins di lapisan F, ketidakstabilan lapisan E berupa E sporadis (Es) dan perannya dalam pembentukan spread F.

2 KETIDAKSTABILAN RAYLEIGH-TAYLOR DALAM PEMBENTUKAN SPREAD F DI EKUATOR

Proses kopling antara lapisan E dan lapisan F ionosfer ekuator menyebabkan suatu fenomena ketidakstabilan lapisan F ionosfer yang dikenal dengan istilah Spread F (Equatorial Spread F). Gelombang gravitas atmosfer diduga menjadi pemicu terjadinya ketidakstabilan Rayleigh Taylor, yang berperan dalam pembentukan Spread F di daerah ekuator melalui kopling elektrodinamika lapisan ionosfer (Kelley, M.C et al, 1981); (Hysell, D et al, 1990); (Fukao, S et al, 2006).

Fenomena penting berkaitan dengan spread F di ekuator yaitu terjadinya peningkatan medan listrik ke arah timur pada waktu malam hari di lapisan F, yang akan meningkatkan aspek elektrodinamika dan aspek gravitasional dalam laju pertumbuhan ketidakstabilan Rayleigh-Taylor. Peningkatan medan listrik ini akan menaikkan ketinggian

lapisan F berupa fenomena yang dikenal dengan *Pre Reversal Enhancement* (PRE). Saat konduktivitas di lapisan E secara cepat menurun pada malam hari maka *Pre Reversal Enhancement* (PRE) akan terjadi. Walaupun pola variasi musiman *Pre Reversal Enhancement* (PRE) telah diketahui namun variasi hariannya belum dapat dijelaskan. Variasi harian ini perlu untuk membuat prediksi kejadian spread F di daerah ekuator. Adanya modulasi gelombang gravitas skala besar diyakini berperan dalam variasi harian tersebut (Fukao, S et al, 2006). Gambar 2-1 menunjukkan *echo power* luaran *Equatorial Atmosphere Radar* (EAR) Kototabang tanggal 24 Maret 2004 saat terjadi spread F. Analisis lebih lanjut dari data *echo power* EAR secara temporal dan dalam arah timur-barat menunjukkan bahwa perkembangan spread F terjadi mulai matahari terbenam dan berarah ke timur. Sementara peranan gelombang gravitas periode pendek yang menyebabkan gangguan kerapatan elektron di dasar lapisan F terlihat dari hasil-hasil analisis luaran radar MF Pameungpeuk tahun 2009 dan jejak ionogram pada titik pengamatan dan waktu yang sama (Abadi, P dkk, 2011).



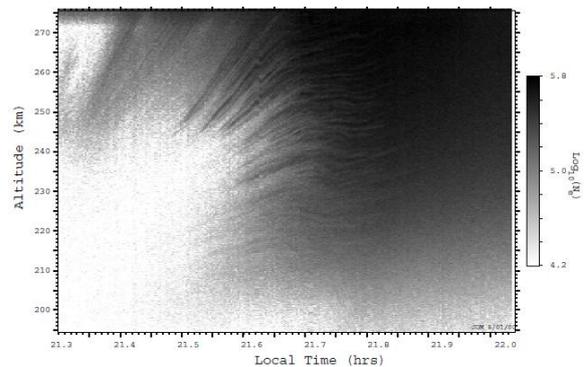
Gambar 2-1: Plot intensitas *echo power* EAR terhadap waktu dan ketinggian saat terjadi spread F. Huruf A, B, C, dan D berturut-turut menunjukkan daerah yang dianalisis (A), sebelum pukul 22:00 LT (B), sekitar pukul 23:00 (C), dan lewat tengah malam (D). (Fukao, S et al, 2006)

3 KETIDAKSTABILAN PERKINS DALAM PEMBENTUKAN SPREAD F DI LINTANG TENGAH

Fenomena spread F di wilayah ekuator sudah dapat dijelaskan mekanismenya yaitu melalui ketidakstabilan Rayleigh-Taylor yang disebabkan adanya modulasi skala besar gelombang gravitas atmosfer. Hal tersebut berbeda dengan spread F yang terjadi di lintang tengah yang belum dapat dijelaskan mekanismenya. Zhou, Q et al (2004), dalam thesis doktoralnya mencoba mengusulkan suatu mekanisme yang menyebabkan spread F di lintang tengah. Mekanisme tersebut melibatkan peran penting dari ketidakstabilan Perkins.

Menurut Perkins, ketidakstabilan akan terjadi bila dalam suatu medan listrik arah timur laut terbentuk gelombang dengan vektor gelombang berada di antara arah medan listrik dan arah timur, atau antara arah medan listrik minus dan arah barat. Gelombang-gelombang dalam arah lain akan diredam, sehingga gelombang dengan vektor gelombang sepanjang arah timur laut-barat daya akan lebih mudah diamati.

Analisis data *echo power* pengamatan radar MU menunjukkan saat *beam* tertentu dari radar berarah ke utara maka terjadi pola ketidakaturan yang bergerak ke atas dan menjauhi radar dengan kecepatan Doppler 100-200 m/dt. Pada moda multi *beam*, pola ketidakaturan bergerak dari timur ke barat dengan kecepatan 150 m/dt. Analisis lebih lanjut terhadap jarak, waktu, dan intensitas *echo power* menunjukkan terjadinya kemiringan ke arah bawah. Pola ini sekaligus menunjukkan bahwa ada suatu perpindahan dalam arah barat laut (Fukao, S. et al, 1991). Gambar 3-1 menunjukkan plot bagian bawah spread F pada 17 Februari 1998 dari radar MU Jepang. Pola lapisan yang terlihat miring adalah bukti terjadinya ketidakstabilan Perkins yang mengakibatkan kenaikan plasma di ketinggian lapisan F.



Gambar 3-1: Plot intensitas echo power radar MU Jepang 17 Februari 1998 (Zhou Q, et al, 2004)

4 KETIDAKSTABILAN LAPISAN E DAN PERANNYA DALAM PEMBENTUKAN SPREAD F

Kerapatan atmosfer netral berkurang terhadap ketinggian secara eksponensial karena pengaruh gaya gravitasi, akibatnya frekuensi tumbukan ion-netral (ν_{in}) di lapisan D menjadi besar, di lapisan E relatif besar, dan di lapisan F kecil. Tumbukan ion-netral (ν_{in}) yang kecil menyebabkan magnetisasi oleh medan magnet bumi (B) di lapisan F tinggi sehingga ion dan elektron dapat dengan mudah bergerak sepanjang medan B dan memotong garis medan B . Walaupun konduktivitas Pedersen kecil tapi akan dapat menyebabkan aliran arus memotong garis medan B , dan konduktivitas Hall diabaikan. Angin netral dan gaya gravitasi juga berperan dalam proses magnetisasi tersebut. Pada siang hari konduktivitas lapisan E tinggi, akibatnya aliran arus di lapisan F akan berkurang secara cepat. Sementara pada malam hari proses rekombinasi di lapisan E sangat kuat sehingga konduktivitas lapisan E menjadi rendah dan lapisan F akan bertahan untuk beberapa waktu.

E sporadis (Es) adalah kondisi ketidakstabilan di lapisan E ionosfer dimana di dalamnya terbentuk lapisan tipis dengan ionisasi yang lebih besar dibandingkan lapisan lainnya. Atau dengan kata lain densitas elektron pada lapisan tersebut lebih tinggi sehingga dapat mempengaruhi penjalaran gelombang.

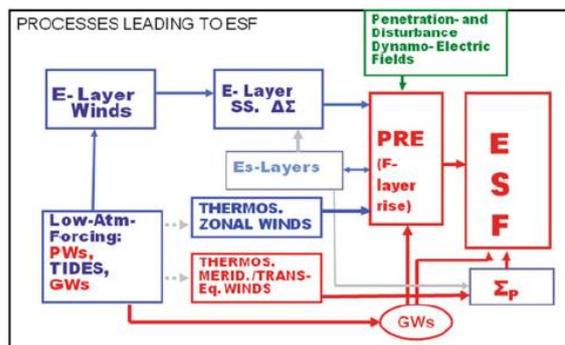
bang radio. E sporadis (Es) dapat terjadi siang ataupun malam hari dan bervariasi terhadap lintang. Penjelasan tentang mekanisme E sporadis (Es) sering dikaitkan dengan kejadian *thunderstorm*, *windshear*, hujan meteor, aktivitas matahari maupun aktivitas geomagnet. Whitehead, D et al (1989) dan Mathews, J.D et al (1998) mengemukakan bahwa formasi lapisan E sporadis (Es) berkaitan dengan adanya ion-ion logam yang terakumulasi dalam suatu *windshear* vertikal dari angin netral ketika angin dalam arah zonal (barat-timur) bernilai nol. Penelitian tentang kaitan E sporadis (Es) dengan variasi angin netral di Kototabang tahun 2009 menunjukkan hasil korelasi negatif, artinya kemungkinan yang berperan dalam proses pembentukan E sporadis pada saat itu bukanlah *windshear* yang dibangkitkan oleh gelombang gravitasi setempat (*insitu*) tapi dibangkitkan oleh gelombang gravitasi yang terbentuk di lapisan atmosfer bawah (troposfer) melalui proses-proses cuaca yang terjadi pada atmosfer bawah (Martiningrum, D.R dkk, 2011).

Gambar 4-1 menunjukkan bagaimana peran lapisan E sporadis dalam pembentukan spread F. Tampak pada Gambar 4-1, tiga komponen penting dalam pembentukan spread F yaitu:

- Adanya *drift* vertikal/medan listrik zonal pada malam hari yang terus meningkat dan dikendalikan oleh gradien konduktivitas lokal dan angin-angin zonal termosferik.
- Adanya angin-angin trans-ekuatorial/angin meridional termosferik yang mengontrol konduktivitas lapisan yang mulai tidak stabil.
- Adanya perubahan kerapatan dan *drift* vertikal/medan listrik zonal yang dapat menyebabkan ketidakstabilan di lapisan F.

Hal mendasar dalam proses pembentukan spread F adalah adanya *Pre Reversal Enhancement* (PRE) yang merupakan hasil proses elektrodinamika

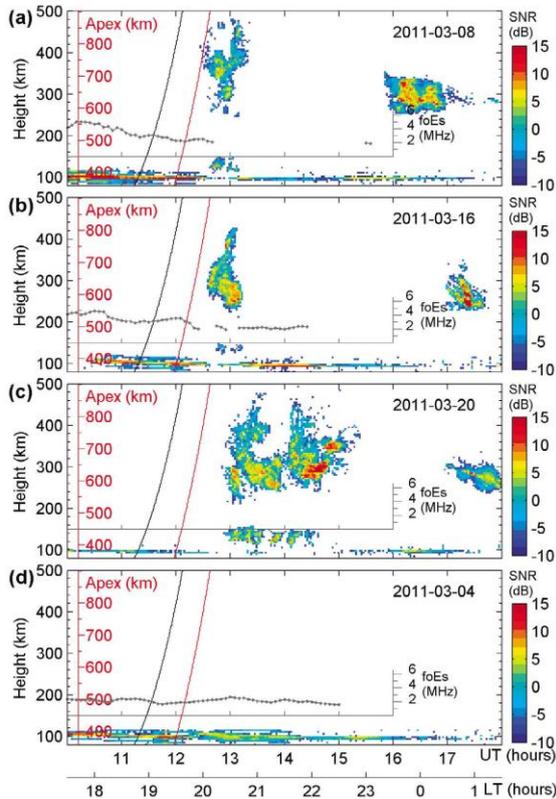
malam hari dari kombinasi antara pengaruh gradien konduktivitas lapisan E yang bervariasi terhadap bujur (SS. $\Delta\Sigma$) dan angin zonal termosferik (berarah ke timur pada malam hari). Terbentuknya E sporadis (Es) akan memodifikasi distribusi konduktivitas lapisan E sehingga *Pre Reversal Enhancement* (PRE) akan semakin intensif terjadi dan akan selalu dikontrol oleh formasi lapisan E sporadis (Es). Angin-angin di lapisan E berperan dalam mengontrol medan listrik yang dikendalikan oleh pasut (pasang surut) atmosfer dan dimodifikasi oleh penjalaran gelombang planeter ke atas, sehingga konduktivitas lapisan E juga akan dimodifikasi.



Gambar 4-1: Komponen-komponen yang berperan dalam pembentukan spread F (Abdu, M.A and Brum, C.G, 2009)

Penelitian lebih lanjut tentang peran E sporadis (Es) dalam pembentukan spread F (Guozhu Li et al, 2011) menunjukkan bahwa ketidakstabilan lapisan E (*E Region Irregularities/ERI*) lemah atau hilang selama terjadi *Equatorial Plasma Bubbles* (EPB) atau spread F pada bulan-bulan *equinox*. Sebagai gantinya akan muncul *Valley Region Irregularities* (VRI). Hasil tersebut menguatkan hipotesa bahwa polarisasi medan listrik *Polarization Electric Field* (PEF) berperan dalam evolusi ketidakstabilan lapisan E (*E Region Irregularities/ERI*) menjadi *Valley Region Irregularities* (VRI). Dari Gambar 4-2 terlihat bahwa ketika frekuensi kritis lapisan E sporadis (Es) atau foEs rendah atau malah menghilang maka plot intensitas *echo power* radar VHF terlihat

kuat dan sebaliknya saat frekuensi kritis lapisan E sporadis (Es) tinggi maka plot intensitas *echo power* radar VHF terlihat melemah. Hasil ini dapat diterapkan untuk data ekuator Indonesia sehingga dapat diketahui kemungkinan mekanisme tersebut juga berlaku untuk wilayah ekuator Indonesia.



Gambar 4-2: Plot Ketinggian-Waktu-Intensitas *echo power* radar VHF Sanya (Brazil) tanggal 4, 8, 16, dan 20 Maret 2011 dan frekuensi kritis lapisan E sporadis (Es) pada waktu yang sama (Guozhu Li, et al, 2011)

5 PENUTUP

Salah satu cara memahami karakteristik lapisan ionosfer adalah dengan mempelajari sifat irregularitasnya berupa ketidakstabilan baik di lapisan E (E sporadis/Es) maupun di lapisan F (spread F). Interaksi antara keduanya melalui mekanisme kopling sangat penting dipahami. Pembentukan spread F diawali dengan adanya kenaikan bagian bawah lapisan F setelah matahari terbenam yang dikenal dengan istilah *Pre Reversal Enhancement* (PRE), sehingga terjadi ketidakstabilan plasma

lapisan ionosfer akibat adanya modulasi dalam skala besar lapisan ionosfer oleh gelombang-gelombang atmosfer (pasut, gravitas, maupun planeter). Di wilayah ekuator ketidakstabilan plasma diperankan oleh ketidakstabilan Rayleigh-Taylor, sementara di lintang tengah diperankan oleh ketidakstabilan Perkins.

Ketidakstabilan Rayleigh-Taylor maupun ketidakstabilan Perkins tidak dapat mempengaruhi pembentukan spread F secara langsung tapi ada faktor lain berupa polarisasi medan listrik di lapisan E. Peran lapisan E sporadis (Es) dalam pembentukan spread F melalui kopling lapisan E sporadis (Es) dan lapisan F perlu dikaji lebih lanjut untuk wilayah ekuator Indonesia dengan memanfaatkan data luaran VHF radar, ionosonda, radar EAR, dan GPS/TEC. Hal tersebut terutama setelah ditemukan bahwa saat terjadi spread F, ternyata E sporadis (Es) melemah atau malah hilang digantikan oleh ketidakstabilan di daerah lembah *Valley Region Irregularities* (VRI). Evolusi ketidakstabilan lapisan E (*E Region Irregularities/ERI*) menjadi *Valley Region Irregularities* (VRI) terjadi akibat adanya polarisasi medan listrik di lapisan E.

DAFTAR RUJUKAN

- Abadi, P., Sri Ekawati, Nandang Dedi, 2011. *Observasi Kemunculan Spread F di atas Pameungpeuk dan Keterkaitannya Terhadap Gelombang dari Atmosfer Bawah dengan Menggunakan Radar MF dan HF*, Prosiding Seminar Radar Nasional 2011, PPET-LIPI, Hotel Bidakara Jakarta, ISSN: 1979-2921.
- Abdu, M.A., C.G.M. Brum, 2009. *Electrodynamics of the Vertical Coupling Processes in the Atmosphere-Ionosphere System of the Low Latitude Region*, Earth Planets Space, 61, 385-395.

- Fukao, S., M.C. Kelley, T. Shirakawa, T. Takami, M. Yamamoto, T. Tsuda, S. Kato, 1991. *Turbulent Upwelling of the Midlatitude Ionosphere, 1. Observational results by the MU Radar*. J Geophys Res., 96, 3725-3746.
- Fukao, S., T. Yokoyama, T. Tayama, 2006. *Eastward Traverse of Equatorial Plasma Plumes Observed with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia*, 2006. Ann Geophys, 24(5), 1411-1418.
- Guozhu Li, Baiqi Ning, A. K. Patra, Weixing Wan, Lianhuan Hu, 2011. *Investigation of Low-Latitude E and Valley Region Irregularities: Their Relationship to Equatorial Plasma Bubble Bifurcation*, J Geophys Res., 116.
- Hysell, D., M.C. Kelley, W.E. Swartz, R.F. Woodman, 1990. *Seeding and Layering of Equatorial Spread F by Gravity Waves*. J Geophys Res., 95, 3725-3746.
- Kelley, M.C., M.F. Larsen, C. La Hoz, 1981. *Gravity Wave Initiation of Equatorial Spread-F: a Case Study*. J Geophys Res 86: 9087-9100.
- Martiningrum, D. R., G. Wikanto, D. Marlia, 2011. *Ketidakstabilan Plasma di Lapisan E Ionosfer di atas Kototabang dan Pameungpeuk*, dalam proses publikasi di Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer dan Antariksa.
- Mathews, J D., *Sporadic E*, 1998. *Current View and Recent Progress*, Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 60 (4), 413-435.
- Whitehead D., 1989. *Recent Work on Mid Latitude and Equatorial Sporadic E*, Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 51, 401-424.
- Yamamoto, M., S. Fukao, R.F. Woodman, T. Ogawa, T. Tsuda, S. Kato, 1991. *Midlatitude E Region Field-Aligned Irregularities Observed with MU radar*, J Geophys Res 96: 15943-15949.
- Yokoyama, T., 2011. *Instabilities in the Midlatitude Ionosphere in Terms of E-F Coupling*, Aeronomy of the earth's atmosphere and ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series 2, Springer Science + Business Media B.V.
- Zhou, Q., 2004. *A Numerical Investigation of the Perkins Instability Equations by the Pseudo-Spectral Method*, Doctor of Philosophy Thesis in The Pennsylvania State University, http://allsky.ee.psu.edu/PerkinsPage/Thesis_Zhou_part1.pdf.