

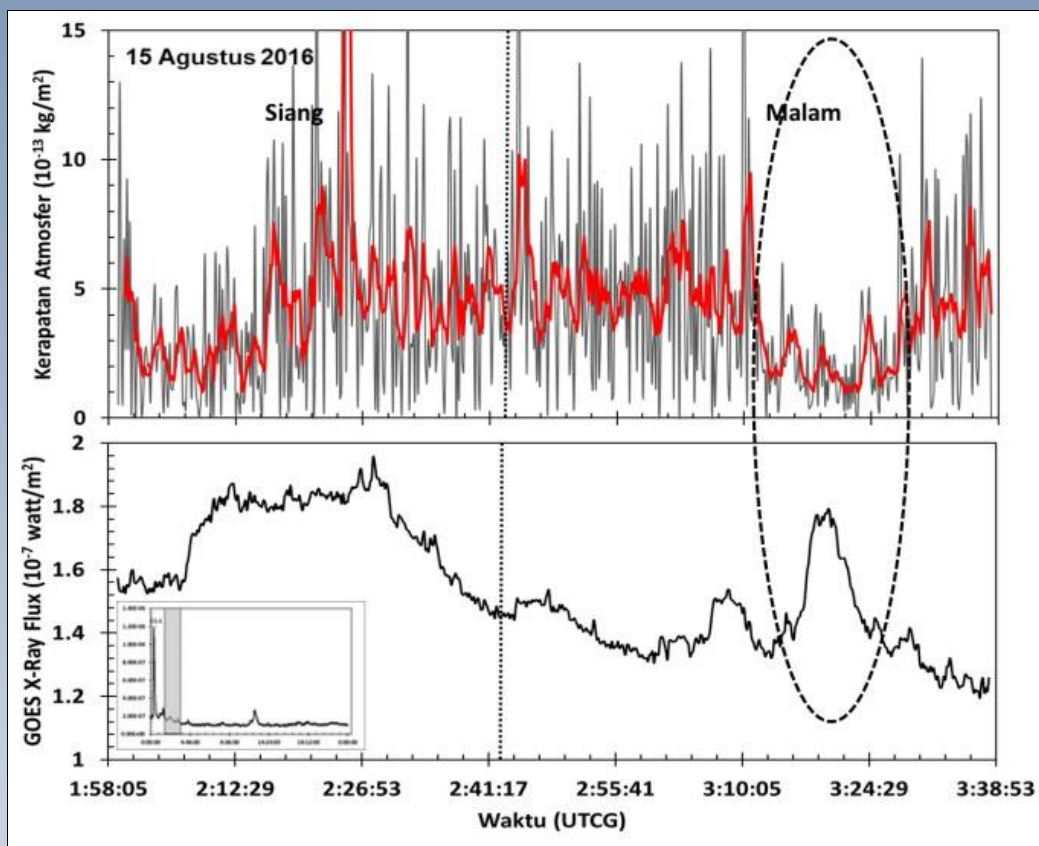
# Jurnal SAINS DIRGANTARA

## Journal of Aerospace Sciences

Vol. 14 No. 2 Juni 2017

P-ISSN 1412- 808X; E- ISSN 2597-7873

Nomor : 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015



Gambar: Plot kerapatan atmosfer dari data posisi GPS satelit LAPAN A2 (panel atas) disandingkan dengan *fluks* sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES.



Diterbitkan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)  
Jakarta – Indonesia

J. Si. Dirgant

VOL. 14

NO. 2

HAL.71 - 138

JAKARTA, JUNI 2017

ISSN 1412-808X

# **JURNAL** **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

Vol. 14 No. 2 Juni 2017

P-ISSN 1412- 808X; E- ISSN 2597-7873

Nomor : 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Jurnal Sains Dirgantara (JSD) berisi hasil penelitian, pengembangan, dan/atau pemikiran di bidang sains atmosfer dan antariksa. Jurnal ini terbit sejak tahun 2004 dan dipublikasikan dua kali dalam setahun (Juni dan Desember)

## **SUSUNAN DEWAN PENYUNTING JURNAL SAINS DIRGANTARA**

- Ketua Editor

Dr. Laras Tursilowati, M.Si. (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)/LAPAN

- Penyunting

Dr. Trismidianto (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)/LAPAN

Dr. Ina Juaeni (Meteorologi/Sains Kebumihan)/LAPAN

Dr. Buldan Muslim (Fisika Magnetosfer dan Ionosfer)/LAPAN

Drs. Jiyo, M.Si (Fisika Magnetosfer dan Ionosfer)/LAPAN

Dr. Dadang Subarna (Klimatologi dan Atmosfer Maritim )/LAPAN

Dr. Wiwiek Setyawati (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)/LAPAN

- Mitra Bestari

Prof. Dr. Thomas Djamaluddin (Astronomi dan Astrofisik)/LAPAN

Prof. Dr. The HouwLiong (Model Iklim, Prediksi Banjir, dan Sains Antariksa)/ITB

Dr. Hakim Luthfi Malasan M.Sc (Astrofisika Bintang dan Instrumentasi Astronomi)/ITB

Dr. Dhani Herdiwijaya (Cuaca Antariksa)/ITB

- Korektor Naskah

Dr. Wiwiek Setyawati (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)/LAPAN

## **SUSUNAN SEKRETARIAT REDAKSI JURNAL SAINS DIRGANTARA**

### **Pemimpin Umum**

Ir. Christianus Ratrias Dewanto, M.Eng

### **Pemimpin Redaksi Pelaksana**

Ir. Jasyanto, MM

### **Redaksi Pelaksana**

Mega Mardita, S.Sos.,M.Si

Yudho Dewanto, ST

Irianto, S.Kom

Dwi Haryanto, S.kom

Aulia Pradipta, S.S

### **Tata Letak**

M. Luthfi

Berdasarkan SK Kepala LIPI Nomor: 818/E/2015 ditetapkan  
Jurnal Sains Dirgantara sebagai Majalah Berkala Ilmiah Terakreditasi

### **Alamat Penerbit**

LAPAN Jl. Pemuda Persil No. 1, Rawamangun, Jakarta 13220

Telepon : (021) 4892802 Ext. 142/146 (Hunting), Fax. : (021) 47882726

Email : publikasi@lapan.go.id

Situs : <http://www.lapan.go.id>

<http://jurnal.lapan.go.id>

# **JURNAL**

# **SAINS DIRGANTARA**

## **Journal of Aerospace Sciences**

Vol. 14 No. 2 Juni 2017

P-ISSN 1412- 808X; E-ISSN 2597-7873

Nomor : 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

### DAFTAR ISI

	Halaman
DAMPAK HUJAN METEOR PADA KEMUNCULAN LAPISAN E-SPORADIS DI ATAS SUMEDANG (THE IMPACT OF METEOR SHOWERS ON THE OCCURRENCE OF E-SPORADIC LAYER OVER SUMEDANG) Rhorom Priyatikanto, Farahhati Mumtahana, dan Mumen Tarigan	71– 82
VARIASI TRACE GASES SELAMA 10 TAHUN DAN PENCAMPURAN DI SEKITAR LAPISAN TROPOPAUSE DI INDONESIA BERBASIS SATELIT (TRACE GASES VARIATION FOR 10 YEARS AND MIXING AROUND THE TROPOPAUSE LAYERS IN INDONESIA BASED ON SATELLITE) Novita Ambarsari, Ninong Komala, dan Fanny Aditya Putri	83 - 96
ANALISIS PENGARUH PENETRASI MEDAN LISTRIK LINTANG TINGGI KE LINTANG RENDAH TERHADAP IONOSFER SAAT BADAI GEOMAGNET (ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD PENETRATION EFFECT FROM HIGH TO LOW LATITUDES ON IONOSPHERE DURING GEOMAGNETIC STORM) Anwar Santoso, Dadang Nurmali, Mira Juangsih, Iyus Edi Rusnadi, Sri Ekawati, Anton Winarko, dan Siska Filawati	97 - 110
RESPON TEC IONOSFER DI ATAS BANDUNG DAN MANADO TERKAIT <i>FLARE</i> SINAR-X MATAHARI KELAS M5.1 DAN M7.9 TAHUN 2015 (IONOSPHERIC TEC RESPONSE OVER BANDUNG DAN MANADO ASSOCIATED WITH M5.1 AND M7.9 CLASSES OF SOLAR FLARE X-RAYS IN 2015) Sri Ekawati	111– 126
PENGARUH AKTIVITAS MATAHARI TERHADAP KERAPATAN ATMOSFER ATAS BERDASARKAN DATA POSISI GPS SATELIT LAPAN-A2 (SOLAR ACTIVITY INFLUENCE ON THE UPPER ATMOSPHERIC DENSITY DERIVED FROM GPS DATA ON LAPAN-A2 SATELLITE) Tiar Dani, Rhorom Priyatikanto, Slamet Supriadi, Abdul Rachman, dan Amrullah A. Qadir	127 – 138

# **JURNAL**

# **SAINS DIRGANTARA**

## **Journal of Aerospace Sciences**

Vol. 14 No. 2 Juni 2017

P-ISSN 1412- 808X; E- ISSN 2597-7873

Nomor : 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

### **Dari Redaksi**

Sidang Pembaca yang kami hormati,

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga Jurnal Sains Dirgantara Vol. 14, No. 2, Juni 2017, hadir ke hadapan sidang pembaca dengan menengahkan 5 (lima) artikel sebagai berikut:

"Dampak Hujan Meteor pada Kemunculan Lapisan E-Sporadis di Atas Sumedang (*The Impact of Meteor Showers on The Occurrence of E-Sporadic Layer Over Sumedang*)" ditulis oleh: Rhorom Priyatikanto, Farahhati Mumtahana, dan Mumen Tarigan; "Variasi Trace Gases Selama 10 Tahun dan Pencampuran di Sekitar Lapisan Tropopause di Indonesia Berbasis Satelit (*Trace Gases Variation for 10 Years and Mixing Around The Tropopause Layers in Indonesia Based on Satellite*)" ditulis oleh: Novita Ambarsari, Ninong Komala, dan Fanny Aditya Putri; "Analisis Pengaruh Penetrasi Medan Listrik Lintang Tinggi ke Lintang Rendah Terhadap Ionosfer Saat Badai Geomagnet (*Analysis of The Electric Filed Penetration Effect from High to Low Latitudes on Ionosphere During Geomagnetic Storm*)" ditulis oleh: Anwar Santoso, Dadang Nurmali, Mira Juangsih, Iyus Edi Rusnadi, Sri Ekawati, Anton Winarko, dan Siska Filawati; "Respon TEC Ionosfer di Atas Bandung dan Manado Terkait Flare Sinar-X Matahari Kelas M5.1 dan M7.9 Tahun 2015 (*Ionospheric TEC Response Over Bandung and Manado Associated With Solar Flare Xrays Class Of M5.1 and M7.9 In 2015*)" ditulis oleh: Sri Ekawati; Artikel terakhir "Pengaruh Aktivitas Matahari Terhadap Kerapatan Atmosfer Atas Berdasarkan Data Posisi GPS Satelit LAPAN-A2 (*Solar Activity Influence on The Upper Atmospheric Density Derived from GPS Data on LAPAN-A2 Satellite*)" ditulis oleh: Tiar Dani, Rhorom Priyatikanto, Slamet Supriadi, Abdul Rachman, dan Amrullah A. Qadir.

Kami mengundang sidang pembaca yang budiman untuk berpartisipasi aktif dengan mengirimkan karya tulis ilmiah yang sesuai dengan lingkup jurnal ini.

Demikian kami sampaikan, semoga sidang pembaca dapat mengambil manfaatnya.

Jakarta, Desember 2017

**JURNAL**  
**SAINS DIRGANTARA**  
*Journal of Aerospace Sciences*

P-ISSN 1412-808X

E-ISSN 2597-7873

No. 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Vol. 14 No. 1, Desember 2016

Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa ijin atau biaya

**ABSTRAK**

**PERBANDINGAN KARAKTERISTIK AKTIVITAS SINTILASI IONOSFER DI ATAS MANADO, PONTIANAK DAN BANDUNG BERDASARKAN DATA GISTM = CHARACTERISTICS COMPARISON OF IONOSPHERIC SCINTILLATION ACTIVITIES OVER MANADO, PONTIANAK AND BANDUNG BASED ON GISTM DATA / Sri Ekawati, Sefria Anggarani, dan Dessi Marlia**  
**J. SAINS, 14 (1) 2016 : 1-16**

Karakteristik aktivitas sintilasi ionosfer di atas suatu wilayah perlu diketahui karena kemunculannya dapat menurunkan kualitas sinyal dari sistem navigasi global berbasis satelit (GNSS) dan juga komunikasi satelit khususnya yang bekerja pada frekuensi Pita-L. Kemunculan sintilasi ionosfer bervariasi terhadap lokasi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui perbandingan karakteristik aktivitas sintilasi ionosfer di atas Manado, Pontianak dan Bandung berdasarkan data indeks amplitudo sintilasi S4. Data diperoleh dari pengamatan menggunakan GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) di Manado (1,48oLU;124,85oBT, lintang geomagnet 7,7o LS), Pontianak (0,03oLS;109,33oBT, lintang geomagnet 9,7o LS) dan Bandung (-6,90o LS; 107,60o BT, lintang geomagnet 16,54o LS). Pengamatan dilakukan dari bulan Juli 2014 hingga Juni 2015. Data harian diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu kondisi tenang, menengah dan kuat. Kemudian dihitung berapa persen kemunculan sintilasi kuat dari masing-masing stasiun pengamatan selama periode tersebut dan dilakukan pemetaan indeks S4 di atas Manado, Pontianak dan Bandung. Hasilnya menunjukkan jumlah kemunculan sintilasi kategori kuat ( $S4 > 0,5$ ) bulanan di atas Manado selalu lebih rendah dibandingkan dengan stasiun lainnya. Sintilasi kuat yang terdeteksi di suatu stasiun belum tentu terdeteksi di stasiun lainnya. Untuk peristiwa sintilasi yang sangat intensif, kemunculan sintilasi dapat terdeteksi oleh semua stasiun pengamatan tetapi durasinya berbeda-beda. Durasi sintilasi kuat di atas Bandung merupakan yang paling lama (mencapai 4 jam) dibandingkan dengan Pontianak (kurang dari 2 jam) dan Manado (kurang dari 1 jam). Berdasarkan peta kemunculan sintilasi kuat, gangguan lebih intensif terjadi di daerah di atas laut Jawa.

**Kata kunci:** sintilasi ionosfer, indeks S4, GNSS

**ESTIMASI BADAI GEOMAGNET BERDASARKAN KONDISI KOMPONEN ANGIN SURYA DAN MEDAN MAGNET ANTARPLANET = ESTIMATION OF GEOMAGNETIC STORM BASED ON SOLAR WIND COMPONENT'S AND INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD CONDITION / Anwar Santoso, Mamat Ruhimat, Rasdewita Kesumaningrum, Siska Fillawati**  
**J. SAINS, 14 (1) 2016 : 17-26**

Salah satu fenomena cuaca antariksa adalah badai geomagnet. Badai geomagnet terjadi akibat masuknya angin surya cepat karena lontaran massa korona bersamaan dengan Bz Interplanetary Magnetic Field (IMF) yang mengarah ke selatan. Kondisi komponen angin surya bersama arah selatan Bz IMF sebelum badai geomagnet dapat menentukan pembentukan badai geomagnet. Selain itu, melalui kondisi komponen angin surya dan Bz IMF sebelum badai geomagnet maka intensitas badai geomagnet dapat diestimasi melalui model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan kerapatan dan kecepatan angin surya. Untuk studi kasus digunakan data kejadian badai geomagnet pada 17 Maret 2013, 19 Februari 2014, 17 Maret 2015 dan 23 Juni 2015. Hasil studi diperoleh bahwa estimasi badai geomagnet (indeks Dst) berdasarkan kondisi komponen angin surya sebelum badai geomagnet dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya masih cukup baik. Namun demikian, estimasi badai geomagnet menggunakan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya dengan deviasi rata-rata 17,6 nT (12,8%) lebih baik daripada model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dengan deviasi rata-rata 37,3 nT (27,6%).

**Kata kunci:** parameter angin surya, medan magnet antarplanet, badai geomagnet

**JURNAL**  
**SAINS DIRGANTARA**  
*Journal of Aerospace Sciences*

P-ISSN 1412-808X

E-ISSN 2597-7873

No. 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Vol. 14 No. 1, Desember 2016

Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa ijin atau biaya

**ssABSTRAK**

**PENGARUH AEROSOL TERHADAP FLUKS RADIASI NETO DAN RADIATIVE FORCING DI PUNCAK ATMOSFER DAN DI PERMUKAAN BERDASAR DATA SATELIT = THE INFLUENCE OF AEROSOL ON THE NET RADIATION FLUX AND RADIATIVE FORCING AT THE TOP OF ATMOSPHERE AND SURFACE BASED ON SATELLITE DATA /**

**Rosida dan Indah Susanti**

**J. SAINS, 14 (1) 2016 : 27-42**

Efek langsung aerosol terhadap budget radiasi di Indonesia telah dianalisis berdasarkan data fluks radiasi yang diperoleh dari instrumen the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) dan data ketebalan optik aerosol (AOD) dari the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) - Terra. Neraca radiasi yang diperhitungkan termasuk radiasi gelombang pendek dan radiasi gelombang panjang. Data dengan periode waktu dari Maret 2000 sampai Februari 2010, diolah untuk dapat menganalisis pengaruh aerosol terhadap radiasi neto dan untuk memperoleh nilai aerosol radiative forcing. Nilai radiasi neto pada saat atmosfer tanpa aerosol, diestimasi dengan menggunakan metode slope. Hasil analisis menunjukkan adanya variasi temporal densitas aerosol yang tinggi di atmosfer dengan nilai  $AOD_{maks} > 2,5$ , yang pada umumnya menyebabkan penurunan fluks radiasi neto sehingga memberikan efek pendinginan. Pengaruh aerosol terhadap fluks radiasi neto dapat sangat jelas terlihat pada kasus kebakaran hutan. Kebakaran hutan yang terjadi pada 2002, 2004 dan 2006 telah meningkatkan nilai AOD lebih besar dari tiga. Peningkatan tersebut menunjukkan keterkaitan yang kuat terhadap penurunan fluks radiasi neto. Untuk rata-rata wilayah Indonesia penurunan fluks radiasi neto pada peristiwa tersebut adalah pada rentang -11,7 watt/m<sup>2</sup> sampai -13,6 watt/m<sup>2</sup>, dengan penurunan terbesar terjadi di permukaan. Dari hasil perhitungan Aerosol Radiative Forcing (ARF) untuk rata-rata wilayah Indonesia diperoleh nilai ARF untuk level puncak atmosfer sebesar -0,5 watt/m<sup>2</sup> (ARFTOA) dan untuk level permukaan sebesar -17,7 watt/m<sup>2</sup> (ARFsurf). ARF tersebut merupakan nilai yang dapat dijadikan sebagai indikasi dari potensi kondisi iklim di Indonesia pada masa mendatang.

**Kata kunci:** *AOD, aerosol radiative forcing, radiasi neto, puncak atmosfer, CERES, MODIS*

**ANALISIS PROPAGASI GELOMBANG RADIO MODE ANGKASA SAAT PERISTIWA GERHANA MATAHARI 9 MARET 2016 = SKYWAVE PROPAGATION ANALYSIS DURING SOLAR ECLIPSE ON 9 MARCH 2016 /**

**Varuliantor Dear dan Rohmat Yulianto**

**J. SAINS, 14 (1) 2016 : 43-56**

Makalah ini membahas tentang analisis propagasi gelombang radio mode angkasa saat terjadi peristiwa gerhana matahari pada 9 Maret 2016. Analisis dilakukan berdasarkan hasil pengamatan menggunakan waveform sistem Automatic Link Establishment (ALE). Frekuensi yang digunakan adalah 10,145 MHz dengan Biak dan Manado sebagai sirkuit radio komunikasi yang digunakan. Nilai frekuensi kerja ditentukan dari hasil perhitungan model kondisi ionosfer untuk sirkuit komunikasi Biak (01,16 °LU; 136,047 °BT) dan Manado (1,52 °LU; 124,856 °BT) pada saat gerhana matahari berlangsung serta berdasarkan alokasi frekuensi sistem ALE di Indonesia. Hasil pengamatan yang diperoleh menunjukkan terdapat perbedaan nilai indeks SN antara saat kejadian gerhana matahari dengan hari sebelum dan sesudahnya di waktu yang sama. Perbedaan tersebut meliputi variasi nilai indeks SN terhadap waktu dan distribusinya yang dapat dijelaskan sebagai akibat perubahan tingkat absorpsi lapisan D ionosfer yang berbeda. Perubahan tingkat absorpsi pada lapisan D saat peristiwa gerhana matahari cenderung konstan, sehingga menyebabkan nilai indeks SN memiliki tren yang juga konstan dengan nilai gradien persamaan linear sebesar 0,0004/detik. Tingkat absorpsi yang konstan tersebut juga terlihat dari distribusi nilai indeks SN yang memiliki nilai mean ( $\mu$ ) sebesar 5,2384 dengan standar deviasi ( $\sigma$ ) 0,74894. Sedangkan pada hari sebelum dan sesudahnya, yakni tanggal 8 dan 10 Maret 2016, nilai indeks SN memiliki tren menurun dengan nilai gradien persamaan linear sebesar -0,002/detik. Perbedaan tersebut juga terlihat dari distribusi indeks SN yang memiliki nilai  $\mu$  sebesar 4,8316 dan 4,6164 dengan  $\sigma$  sebesar 0,92123 dan 0,9096. Hasil ini menunjukkan bahwa terjadi perubahan pada perambatan gelombang radio di lapisan ionosfer saat peristiwa gerhana matahari total 9 Maret 2016.

**Kata Kunci:** *propagasi angkasa, gerhana matahari, absorps*

**JURNAL**  
**SAINS DIRGANTARA**  
***Journal of Aerospace Sciences***

P-ISSN 1412-808X

E-ISSN 2597-7873

No. 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Vol. 14 No. 1, Desember 2016

Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa ijin atau biaya

**ABSTRAK**

**KEMAMPUAN MODEL WRF DALAM  
MEMPREDIKSI CURAH HUJAN DIURNAL DI  
PULAU JAWA = PREDICTABILITY OF  
DIURNAL RAINFALL OVER JAVA ISLAND  
USING WRF / Suaydhi**  
**J. SAINS, 14 (1) 2016 : 57-70**

Wilayah Indonesia sering mengalami bencana hidrometeorologis seperti banjir dan tanah longsor. Untuk mengurangi kerugian yang diakibatkan oleh kejadian bencana meteorologi diperlukan suatu sistem peringatan dini. PSTA LAPAN sedang mengembangkan sebuah sistem peringatan dini yang diberi nama Satellite-based Disaster Early Warning System (SADEWA). Kinerja sistem peringatan dini seperti ini perlu dievaluasi agar tingkat kepercayaannya meningkat. Salah satu evaluasi kinerja hasil prediksi ini dilakukan dengan menganalisis siklus diurnal curah hujan di pulau Jawa dan sekitarnya pada data hasil prediksi WRF yang digunakan dalam SADEWA dan data GSMaP selama satu tahun (Maret 2014 – Februari 2015). Equitable Threat Score (ETS) dan Bias Score digunakan dalam evaluasi hasil prediksi WRF. Hasil analisis menunjukkan simulasi WRF untuk prediksi cuaca ini mempunyai waktu spin-off sekitar 5 jam. Siklus diurnal curah hujan yang kontras antara pulau Jawa dengan lautan sekitarnya mampu disimulasikan dengan baik oleh model WRF, baik dari jumlah maupun frekuensi curah hujannya. Namun fase diurnal dari hasil prediksi WRF mendahului fase data pengamatan sekitar dua jam dan mempunyai amplitudo lebih besar. Nilai ETS yang rendah mengindikasikan hasil prediksi WRF masih kurang memuaskan dan nilai bias yang tinggi berarti bahwa WRF sering overpredict. Hasil analisis juga menunjukkan hasil prediksi WRF belum mampu menyimulasikan pengaruh MJO (Madden-Julian Oscillation) pada siklus diurnal curah hujan di Jawa.

**Kata Kunci:** *curah hujan, siklus diurnal, WRF, Jawa, MJO*

**JURNAL**  
**SAINS DIRGANTARA**  
*Journal of Aerospace Sciences*

P-ISSN 1412-808X

E-ISSN 2597-7873

No. 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Vol. 14 No. 2, Juni 2017

Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa ijin atau biaya

**ABSTRAK**

**DAMPAK HUJAN METEOR PADA KEMUNCULAN LAPISAN E-SPORADIS DI ATAS SUMEDANG = (THE IMPACT OF METEOR SHOWERS ON THE OCCURRENCE OF E-SPORADIC LAYER OVER SUMEDANG)/** Rhorom Priyatikanto, Farahhati Mumtahana, dan Mumen Tarigan  
**J. SAINS, 14 (2) 2017 : 71-82**

Hujan meteor dengan fluks tinggi telah dipercaya sebagai salah satu sumber penting ion logam yang terkumpul pada ketinggian ~100 km dan memicu kemunculan lapisan E-Sporadis. Pada studi ini, katalog hujan meteor hasil pengamatan pada jendela visual dan radio digunakan untuk membangun model dan peta temporal hujan meteor tahunan yang diharapkan teramati di Sumedang, Jawa Barat. Peta tersebut dibandingkan dengan data pengamatan ionosfer di Sumedang sepanjang 2014-2015 untuk mengetahui keterkaitan antara hujan meteor dengan beragam fluks serta kemunculan lapisan E-Sporadis. Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa hujan meteor dengan kelajuan geosentris  $v_G < 50$  km/s memiliki indikasi berpengaruh pada kemunculan E-Sporadis, sementara hujan meteor dengan  $v_G > 50$  km/s tidak berdampak signifikan. Namun, variasi musiman dari persentasi kemunculan E-Sporadis jauh lebih dominan dibandingkan fluktuasinya saat hujan meteor.

**Kata kunci:** *hujan meteor, ionosfer, E-Sporadis*

**VARIASI TRACE GASES SELAMA 10 TAHUN DAN PENCAMPURAN DI SEKITAR LAPISAN TROPOPAUSE DI INDONESIA BERBASIS SATELIT = (TRACE GASES VARIATION FOR 10 YEARS AND MIXING AROUND THE TROPOPAUSE LAYERS IN INDONESIA BASED ON SATELLITE)/** Novita Ambarsari, Ninong Komala, dan Fanny Aditya Putri  
**J. SAINS, 14 (2) 2017 : 83-96**

Pengukuran *trace gases* (CO, O<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>) dan temperatur di sekitar lapisan troposfer atas/stratosfer bawah (UT/LS) atau tepatnya di sekitar *Tropical Tropopause Layer* (TTL) di Indonesia menggunakan instrumen *Microwave Limb Sounder* (MLS) pada Satelit AURA periode 2005-2014 menjadikan variasi gas-gas tersebut selama 10 tahun di sekitar TTL memungkinkan untuk dikaji lebih dalam. TTL menjadi jalur utama masuknya senyawa-senyawa kimia dan aerosol yang bersumber di troposfer ke stratosfer. Komposisi gas-gas minor di TTL sangat penting karena mempengaruhi *budget* radiasi global. Analisis profil vertikal gas-gas tersebut di TTL dilakukan untuk mengetahui kesesuaian konsep TTL yang dimulai dari lapisan troposfer atas hingga ke stratosfer bawah. Metode lainnya adalah dengan diagram *time series* terhadap ketinggian (*time series versus height cross section*) yang menunjukkan variasi tahunan maupun antar tahunan profil vertikal gas-gas tersebut di TTL serta kemungkinan adanya pengaruh dari proses dinamika atmosfer. Hasil penelitian menunjukkan korelasi gas-gas tersebut dengan ozon menunjukkan adanya sebagian udara di stratosfer yang mengalami pencampuran di wilayah TTL. Selain itu, perubahan nilai konsentrasi dan temperatur di TTL telah dihitung menggunakan *trend* masing-masing parameter dan diketahui bahwa parameter HCl, CH<sub>3</sub>Cl, dan temperatur menunjukkan penurunan masing-masing sebesar -0,036 ppmv, -0,024 ppmv, dan -0,456 K. Adapun parameter lain seperti ozon, CO, H<sub>2</sub>O, dan HNO<sub>3</sub> menunjukkan adanya peningkatan masing-masing sebesar 0,0036 ppmv, 0,0096 ppmv, 0,108 ppmv, dan 0,06 ppmv.

**Kata kunci:** *gas minor, tropopause, TTL, MLS, AURA*



**JURNAL**  
**SAINS DIRGANTARA**  
*Journal of Aerospace Sciences*

P-ISSN 1412-808X

E-ISSN 2597-7873

No. 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Vol. 14 No. 2, Juni 2017

Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa ijin atau biaya

**ABSTRAK**

**ANALISIS PENGARUH PENETRASI MEDAN LISTRIK LINTANG TINGGI KE LINTANG RENDAH TERHADAP IONOSFER SAAT BADAI GEOMAGNET = (ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD PENETRATION EFFECT FROM HIGH TO LOW LATITUDES ON IONOSPHERE DURING GEOMAGNETIC STORM)/Anwar Santoso, Dadang Nurmali, Mira Juangsih, Iyus Edi Rusnadi, Sri Ekawati, Anton Winarko, dan Siska Filawati**  
**J. SAINS, 14 (2) 2017 : 97-110**

Pengaruh badai geomagnet terhadap ionosfer di ekuator dan lintang rendah berupa naiknya nilai foF2 atau turunnya nilai foF2 dengan waktu tunda respon berbeda-beda. Perbedaan respon tersebut salah satunya diduga dipengaruhi oleh modifikasi *Equatorial electrojet* (EEJ) yang dihasilkan oleh penetrasi medan listrik lintang tinggi sampai daerah lintang rendah dan ekuator. Oleh karena itu, dalam makalah ini dilakukan analisis pengaruh penetrasi arus listrik lintang tinggi ke lintang rendah terhadap ionosfer saat badai geomagnet menggunakan data foF2 dari Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) Sumedang (SMD; 6,91° LS; 106,83° BT koordinat geografis atau 16,55° LS; 179,95° BT koordinat magnet) dan data medan geomagnet dari stasiun Biak (BIK; 1,08° LS; 136,05° BT koordinat geografis atau 9,73° LS; 207,39° BT koordinat magnet) tahun 2000-2001. Hasilnya diperoleh bahwa penetrasi medan listrik dari lintang tinggi ke lintang lebih rendah Indonesia menyebabkan foF2 BPAA Sumedang mulai terjadi bertepatan dengan EEJ(HBIK-HDRW) mencapai titik minimumnya dengan jeda waktu antara 0 sampai 4 jam sebelum dan sesudah indeks Dst mencapai minimum. Untuk beda waktu 0 sampai 4 jam sesudah indeks Dst mencapai minimum, hasilnya bersesuaian dengan hasil penelitian peneliti sebelumnya. Namun, untuk beda waktu 0 sampai 4 jam sebelum indeks Dst mencapai minimum, hasilnya merupakan temuan berbeda dari hasil mereka.

**Kata Kunci:** badai geomagnet, ionosfer ekuator, elektrojet ekuator

**RESPON TEC IONOSFER DI ATAS BANDUNG DAN MANADO TERKAIT FLARE SINAR-X MATAHARI KELAS M5.1 DAN M7.9 TAHUN 2015 = (IONOSPHERIC TEC RESPONSE OVER BANDUNG AND MANADO ASSOCIATED WITH SOLAR FLARE X-RAYS CLASS OF M5.1 AND M7.9 IN 2015) /Sri Ekawati**  
**J. SAINS, 14 (2) 2017 : 111/124**

*Flare* matahari berpotensi meningkatkan kerapatan elektron ionosfer secara mendadak, khususnya di lapisan D, yang dikenal sebagai *Sudden Ionospheric Disturbances* (SID). Peningkatan kerapatan elektron tersebut terjadi tidak hanya di lapisan D, tetapi juga di lapisan E dan F ionosfer. *Total Electron Content* (TEC) dari GPS merupakan jumlah banyaknya elektron total dari lapisan D sampai lapisan F. Penelitian ini bertujuan mengetahui efek *flare*, yang lebih besar dari kelas M5 tahun 2015, terhadap TEC ionosfer di atas Bandung dan Manado. Makalah ini merupakan hasil awal dari respon TEC ionosfer terhadap fenomena *flare* di atas Indonesia. Data TEC ionosfer diperoleh dari penerima *GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor* (GISTM) di Bandung (-6.90° S; 107.60° E lintang geomagnet 16.54° LS) dan Manado (1,48°LU;124,85°BT lintang geomagnet 7,7° LS) dikaitkan dengan kejadian *flare* kelas M5.1 pada tanggal 10 Maret 2015 dan kelas M7.9 pada tanggal 25 Juni 2015. Nilai Slant TEC (STEC) dihitung untuk memperoleh nilai Vertical TEC (VTEC), kemudian nilai differensial VTEC (DVTEC) per PRN satelit diperoleh untuk analisis selanjutnya. Hasil menunjukkan segera setelah terjadi *flare*, terjadi peningkatan VTEC dan DVTEC (di atas Bandung dan Manado) secara mendadak pada waktu yang sama. Waktu tunda dari respon TEC ionosfer setelah terjadi *flare* M5.1 adalah sekitar 2 menit, kemudian VTEC meningkat sebesar 0,5 TECU dan DVTEC meningkat secara tajam sebesar 0.5 – 0.6 TECU/menit. Sedangkan, waktu tunda setelah terjadi *flare* M7.9 adalah 11 menit, kemudian VTEC meningkat sebesar 1 TECU dan DVTEC meningkat secara tajam sebesar 0.6 – 0.9 TECU/menit.

**Kata kunci:** Ionosfer, TEC, Flare, GPS, SID

**JURNAL**  
**SAINS DIRGANTARA**  
***Journal of Aerospace Sciences***

P-ISSN 1412-808X

E-ISSN 2597-7873

No. 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Vol. 14 No. 2, Juni 2017

Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa ijin atau biaya

**ABSTRAK**

**PENGARUH AKTIVITAS MATAHARI TERHADAP KERAPATAN ATMOSFER ATAS BERDASARKAN DATA POSISI GPS SATELIT LAPAN-A2 = (SOLAR ACTIVITY INFLUENCE ON THE UPPER ATMOSPHERIC DENSITY DERIVED FROM GPS DATA ON LAPAN-A2 SATELLITE)/Tiar Dani, Rhorom Priyatikanto, Slamet Supriadi, Abdul Rachman, dan Amrullah A. Qadir**  
**J. SAINS, 14 (2) 2017 : 125-136**

Studi kerapatan atmosfer atas sangat penting untuk memperoleh faktor koreksi dari suatu model kerapatan atmosfer. Peningkatan akurasi dari model atmosfer yang telah ada (CIRA, JASCHIA, NRLMSISE) sangat penting dalam penerapannya untuk prediksi *re-entry*, penjejakan satelit dan prakiraan kemungkinan terjadinya tabrakan antara satelit aktif dengan sampah antariksa. Peralatan GPS yang terpasang di satelit LAPAN-A2 secara tidak langsung dapat melakukan pengukuran *in-situ* perubahan kerapatan atmosfer atas dari orbit yang dilaluinya, meskipun tingkat resolusi temporalnya masih lebih rendah dibandingkan menggunakan instrumen akselerometer tetapi masih jauh lebih baik dibandingkan menggunakan data *Two-Line Element* (TLE). Studi ini telah berhasil memperoleh variasi kerapatan atmosfer atas dengan resolusi 10 detik menggunakan data posisi GPS LAPAN-A2. Selain itu, diperoleh pula tingkat kesalahan dalam koordinat satelit (*Radial Intrack Crosstrack* - RIC) data TLE terhadap data posisi GPS LAPAN-A2 sebesar  $\pm 2$  km. Selain itu terlihat pula pengaruh aktivitas matahari terhadap perubahan kerapatan atmosfer atas yang diperoleh dari data posisi GPS LAPAN-A2

**Kata kunci:** *kerapatan atmosfer atas, GPS LAPAN-A2, aktivitas matahari, Two-Line Element (TLE)*

# **DAMPAK HUJAN METEOR PADA KEMUNCULAN LAPISAN E-SPORADIS DI ATAS SUMEDANG (THE IMPACT OF METEOR SHOWERS ON THE OCCURRENCE OF E-SPORADIC LAYER OVER SUMEDANG)**

**Rhorom Priyatikanto<sup>1</sup>, Farahhati Mumtahana, dan Mumen Tarigan**

**Pusat Sains Antariksa**

**Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional**

**Jl. Dr. Djundjunan 133 Bandung 40173 Indonesia**

**<sup>1</sup>e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id.**

**Diterima 24 Januari 2017; Direvisi 15 September 2017; Disetujui 18 September 2017**

## **ABSTRACT**

Meteor showers have been believed as one important source of metallic ion which is accumulated at ~100 km altitude and triggering the emergence of E-Sporadic layer. In this study, meteor showers catalogue derived from the observations in visual and radio windows were used to establish a model and temporal map of annual meteor showers expected to be observed in Sumedang, West Java. The map was compared to ionospheric observation data acquired in Sumedang throughout 2014-2015 in order to understand the relation between the showers of various fluxes to the occurrence of E-Sporadic layer. The analysis revealed that several meteor showers with geocentric speed of  $v_G < 50$  km/s possibly influence the occurrence of E-Sporadic layer, while the showers with  $v_G > 50$  km/s impact insignificantly. However, the seasonal variation of the percentage of E-Sporadic occurrence is far more dominant compared to its fluctuation during meteor showers.

Keyword: *meteor shower, ionosphere, E-sporadic*

## ABSTRAK

Hujan meteor dengan fluks tinggi telah dipercaya sebagai salah satu sumber penting ion logam yang terkumpul pada ketinggian ~100 km dan memicu kemunculan lapisan E-Sporadis. Pada studi ini, katalog hujan meteor hasil pengamatan pada jendela visual dan radio digunakan untuk membangun model dan peta temporal hujan meteor tahunan yang diharapkan teramati di Sumedang, Jawa Barat. Peta tersebut dibandingkan dengan data pengamatan ionosfer di Sumedang sepanjang 2014-2015 untuk mengetahui keterkaitan antara hujan meteor dengan beragam fluks serta kemunculan lapisan E-Sporadis. Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa hujan meteor dengan kelajuan geosentris  $v_G < 50$  km/s memiliki indikasi berpengaruh pada kemunculan E-Sporadis, sementara hujan meteor dengan  $v_G > 50$  km/s tidak berdampak signifikan. Namun, variasi musiman dari persentasi kemunculan E-Sporadis jauh lebih dominan dibandingkan fluktuasinya saat hujan meteor.

Kata kunci: *hujan meteor, ionosfer, E-Sporadis*

### 1 PENDAHULUAN

Bumi mengitari bintang induknya pada lintasan yang tidak sepenuhnya kosong. Sembari bergerak, Bumi menembus kerumunan kerikil dan debu Tata Surya yang berasal dari serpihan komet atau asteroid. Berdasarkan fungsi massa yang dikonstruksi oleh Ceplecha *et al.* (1998), Correira *et al.* (2010) memperkirakan fluks tahunan dari meteor sporadis, yakni sebesar  $1,3 \times 10^8$  kg untuk rentang massa  $10^{-21}$  hingga  $10^{15}$  kg. Massa total meteor yang memasuki atmosfer Bumi tidaklah sebesar itu karena meteor bermassa besar ( $> 2 \times 10^6$  kg) amat sangat jarang sementara meteor dengan massa terlalu kecil ( $< 10^{-11}$  kg) memiliki efek yang tidak signifikan karena tidak mengalami ablasi di atmosfer. Menggunakan batasan yang lebih realistis, Correira *et al.* (2010) memperoleh fluks meteor sporadis sebesar  $1 \times 10^7$  kg per tahun. Angka tersebut belum menyertakan kontribusi hujan meteor yang memiliki fluks maksimum (*zenithal hourly rate*, ZHR) hingga ratusan kali lipat dari fluks meteor sporadis.

Fluks meteor yang tidak kecil tersebut tentu mempengaruhi kondisi lingkungan dan cuaca antariksa di Bumi. Terdapat setidaknya dua aspek yang menjadi perhatian, yakni pengaruh meteor terhadap keselamatan wahana antariksa dan terhadap peningkatan kandungan ion logam di atmosfer yang

dapat berimbas pada komunikasi radio di permukaan Bumi (Ma *et al.*, 2008; Jenniskens, 2006). Aspek kedua yang akan menjadi pokok bahasan dalam studi ini.

Masuknya meteor ke atmosfer Bumi, terutama saat hujan meteor dapat meningkatkan kelimpahan ion logam di atmosfer pada ketinggian sekitar 100 km. Peningkatan ion dapat memicu terbentuknya lapisan E-Sporadis yang kemunculannya dapat mempengaruhi komunikasi radio frekuensi tinggi. Hujan meteor sebenarnya bukan merupakan mekanisme utama yang melatarbelakangi kemunculan lapisan E-Sporadis. *Wind shear* atau angin geser dianggap sebagai penyebab kemunculan lapisan tipis E-Sporadis (Mathews, 1998). Menurut teori ini, gesekan antara dua lapisan udara meningkatkan konsentrasi ion pada ketinggian 70 hingga 125 km di atas permukaan Bumi. Untuk menghasilkan lapisan E-Sporadis, kumpulan ion tersebut harus memiliki kala hidup yang cukup sebelum mengalami rekombinasi.

Terbentuknya lapisan E-Sporadis saat hujan meteor dimodelkan oleh McNeil *et al.* (2001). Meteor yang mengandung logam akan mengalami ablasi ketika bergesekan dengan atmosfer Bumi. Sebagian komponen meteor, terutama magnesium dan besi mengalami evaporasi pada temperatur yang amat tinggi dan menghamburkan

ion Fe<sup>+</sup> dan Mg<sup>+</sup> pada ketinggian sekitar 100 km. Lapisan ion yang dihasilkan diperkirakan memiliki kerapatan dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan angka normal serta memiliki kala hidup dalam orde hari. Model ini memberikan prediksi yang cukup baik ketika dibandingkan dengan kasus hujan meteor Perseid dan Ursid yang menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi ion di lapisan E sebagaimana diukur secara *in-situ*. Hasil pengamatan lain yang dirangkum oleh Ma *et al.* (2008) juga menunjukkan adanya gangguan pada lapisan E-Sporadis di atas daratan Tiongkok saat hujan meteor Leonid, Perseid, dan Draconid 1998 hingga 2002.

Di lain pihak, Correira *et al.* (2010) tidak mendapatkan korelasi yang nyata antara peningkatan fluks meteor dan kerapatan Mg dan Mg<sup>+</sup> yang teramati oleh satelit *Global Ozone Measuring Experiment* (GOME) sepanjang 1996 hingga 2001 (Correira *et al.*, 2008). Mereka berkesimpulan bahwa hujan meteor, khususnya Geminid dan Quadrantid, tidak memberikan cukup massa untuk menyebabkan peningkatan konsentrasi ion logam skala besar dalam waktu yang lama. Kesimpulan ini tidak semerta-merta mematahkan model McNeil *et al.* (2001) karena data GOME tidak dapat digunakan untuk menelaah perubahan konsentrasi ion yang berlangsung singkat dan bersifat lokal.

Dampak hujan meteor terhadap ionosfer, khususnya terhadap kemunculan lapisan E-Sporadis, merupakan fokus dari studi kali ini. Studi sejenis pernah dilakukan oleh Rusnadi *et al.* (2002), tetapi hanya berfokus pada satu peristiwa tertentu, sementara tujuan dari studi kali ini adalah: (1) mengidentifikasi dan memetakan kejadian hujan meteor yang berpotensi mempengaruhi ionosfer regional, dan (2) memahami dampak kejadian hujan meteor terhadap kemunculan lapisan E-Sporadis di Indonesia yang telah dipetakan oleh Priyatikanto *et al.* (2016). Untuk

menjawab tujuan pertama, digunakan katalog hujan meteor yang telah dipublikasikan (Jenniskens, 1994; Brown *et al.*, 2008; Jenniskens *et al.*, 2016). Untuk menjawab tujuan kedua, digunakan data frekuensi kritis lapisan E-Sporadis (*foEs*) hasil pengukuran ionosonda di Balai Pengamatan Atmosfer dan Antariksa LAPAN di Sumedang, Jawa Barat. Analisis komparatif dilakukan terhadap kedua jenis data untuk mengetahui keterkaitan keduanya.

## 2 DATA

### 2.1 Katalog Hujan Meteor

Terdapat sejumlah katalog hujan meteor yang telah dipublikasikan, di antaranya katalog Jenniskens (1994) yang disusun berdasarkan data pengamatan visual pengamat meteor di Belanda dan Australia sepanjang 1981 hingga 1991. Dalam katalog tersebut, terdapat 50 hujan meteor tahunan dengan beberapa parameter penting, di antaranya waktu puncak, koordinat arah pancaran (*radiant*), parameter orbit sumber meteor, hingga perkiraan massa total meteor. Katalog yang lebih baru dikompilasi oleh Brown *et al.* (2008) yang dibangun dari data pengamatan radar dan Jenniskens *et al.* (2016) yang dibangun dari data pengamatan video pada jendela optik. Katalog Brown *et al.* (2008) terdiri dari 45 hujan meteor dengan beragam tingkat aktivitas yang diperoleh berdasarkan data *Canadian Meteor Orbit Radar* sejak tahun 2002, sementara katalog Jenniskens *et al.* (2016) berisikan 70 dari 95 hujan meteor yang dianggap *established* oleh *International Astronomical Union* (IAU). Katalog kedua dibangun dari hasil pengamatan meteor sejak 21 Oktober 2010 hingga 31 Maret 2013 menggunakan *Cameras for Allsky Meteor Surveillance* (CAMS, Jenniskens *et al.*, 2011).

Jenniskens *et al.* (2016) menggunakan data yang lebih baru serta merangkum lebih banyak aliran meteor

(meteor stream), tetapi mereka belum memberikan nilai *Zenithal Hourly Rate* (ZHR) yang amat penting untuk memperkirakan tingkat aktivitas dari suatu hujan meteor. Karena itu, studi ini menggunakan kombinasi katalog Brown *et al.* (2008) dan Jenniskens *et al.*

(2016) ketimbang menggunakan satu katalog saja. Kedua katalog memiliki korelasi yang amat baik, terutama bila dilihat dari hasil penentuan arah pancaran meteor (*radiant point*). Terdapat 42 aliran meteor yang disebutkan dalam kedua katalog.

Tabel 2-1: DAFTAR HUJAN METEOR YANG DIANALISIS DALAM STUDI INI. KEPANJANGAN DARI S DAN N PADA KOLOM NAMA ADALAH *SOUTHERN* DAN *NORTHERN*. PARAMETER AKTIVITAS ( $F_{max}$ ), BUJUR EKLIPTIKA MATAHARI SAAT MAKSIMUM, AWAL, DAN AKHIR HUJAN METEOR ( $\lambda_{max}$ ;  $\lambda_{sta}$ ;  $\lambda_{end}$ ) DIPEROLEH DARI Brown *et al.* (2008), SEMENTARA KOORDINAT ARAH PANCARAN ( $\alpha$ ,  $\delta$ ), PERGERAKAN HARIANNYA ( $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\delta$ ), DAN KECEPATAN GEOSENTRIS RATA-RATA ( $v_G$ ) DIPEROLEH DARI Jenniskens *et al.* (2016)

Nama	Kode	$F_{max}$	$\lambda_{max}$ °	$\lambda_{sta}$ °	$\lambda_{end}$ °	$\alpha$ °	$\delta$ °	$\Delta\alpha$ °/hari	$\Delta\delta$ °/hari	$v_G$ km/s
April Lyrids	LYR	36	32,5	30,0	34,0	272,0	33,4	0,66	0,02	46,7
Daytime April Piscids	APS	26	32,5	30,0	36,0	4,9	5,5	0,94	0,42	29,2
$\eta$ Aquariids	ETA	277	44,5	33,0	64,0	338,1	-0,8	0,92	0,37	65,7
N Daytime $\omega$ Cetids	NOC	29	47,5	30,0	59,0	9,0	17,3	0,95	0,36	36,8
S Daytime May Arietids	SMA	30	47,5	30,0	61,0	28,4	7,7	0,92	0,32	28,3
S Daytime $\omega$ Cetids	OCE	32	49,5	34,0	59,0	20,5	-6,1	0,93	0,44	36,9
Daytime Arietids	ARI	255	76,5	65,0	93,0	43,9	24,4	1,05	0,28	41,1
S June Aquilids	SZC	28	80,5	78,0	81,0	319,3	-27,6	1,05	0,30	39,2
Daytime $\zeta$ Perseids	ZPE	41	83,5	47,0	95,0	67,4	23,4	1,00	0,20	26,4
$\epsilon$ Perseids	EPR	24	95,5	92,0	107,0	53,8	37,8	1,17	0,23	43,8
Daytime $\beta$ Taurids	BTA	45	96,5	92,0	103,0	82,0	20,0	0,89	0,04	27,4
$\beta$ Equuleids	BEQ	20	108,5	104,0	113,0	305,1	1,1	0,91	0,23	33,2
N June Aquilids	NZC	29	108,5	85,0	114,0	309,7	-5,3	0,95	0,26	38,3
$\alpha$ Lacertids	ALA	25	110,5	100,0	113,0	349,4	54,4	0,82	0,39	37,4
$\varphi$ Cassiopeiids	PCA	27	116,5	112,0	120,0	36,8	72,2	1,68	0,32	42,0
$\alpha$ Capricornids	CAP	36	124,5	102,0	130,0	306,5	-9,2	0,97	0,24	23,0
Piscis Austrinids	PAU	26	125,5	121,0	138,0	352,5	-20,5	0,94	0,40	43,8
S $\delta$ Aquariids	SDA	356	125,5	115,0	155,0	341,3	-15,7	0,95	0,38	41,3
S $\iota$ Aquariids	SIA	22	129,5	125,0	149,0	332,9	-14,7	0,36	-0,14	30,5
Daytime $\chi$ Orionids	XRI	19	131,5	116,0	138,0	102,9	16,6	0,90	-0,40	45,4
N $\delta$ Aquariids	NDA	22	137,5	131,0	159,0	347,6	2,1	0,91	0,39	38,4
Perseids	PER	103	139,5	123,0	142,0	48,2	58,1	1,40	0,26	59,1
N $\iota$ Aquariids	NIA	33	167,5	113,0	182,0	346,7	-1,2	0,92	0,39	31,3
Daytime $\kappa$ Leonids	KLE	40	178,5	164,0	189,0	162,3	14,9	0,62	-0,30	43,3
Daytime Sextantids	DSX	83	187,5	180,0	193,0	156,6	-2,4	0,91	-0,37	32,9
S Taurids	STA	56	191,5	166,0	236,0	47,9	12,8	0,99	0,26	26,6
October Draconids	DRA	20	195,5	195,0	196,0	262,9	55,7	0,34	-0,05	20,7
Orionids	ORI	132	209,5	196,0	222,0	95,9	15,7	1,03	-0,05	66,3
N Taurids	NTA	31	223,5	201,0	236,0	48,9	20,7	1,03	0,26	28,0
Leonids	LEO	82	236,5	230,0	238,0	153,8	21,8	0,99	-0,36	70,2
November Orionids	NOO	78	247,5	226,0	256,0	90,6	15,2	1,03	-0,01	42,5
Geminids	GEM	817	260,5	243,0	269,0	113,5	32,3	1,15	-0,16	33,8
December Monocerotids	MON	21	262,5	253,0	266,0	102,9	7,8	0,97	-0,09	41,4
Ursids	URS	29	270,5	270,0	271,0	219,9	75,4	0,05	-0,31	32,9
$\sigma$ Serpentids	SSE	18	275,5	271,0	282,0	245,4	-4,8	0,95	-0,16	45,5
January Leonids	JLE	42	280,5	278,0	284,0	147,7	24,1	1,01	-0,34	51,4
$\omega$ Serpentids	OSE	25	280,5	270,0	281,0	252,3	-5,8	0,76	0,11	45,0
Quadrantids	QUA	238	283,5	281,0	286,0	230,2	49,5	0,56	-0,25	40,7
$\lambda$ Bootids	LBO	27	295,5	283,0	299,0	221,5	42,4	1,04	-0,76	40,7
$\chi$ CoronaeBorealids	XCB	18	295,5	291,0	303,0	250,9	29,7	0,70	-0,13	45,1
$\theta$ CoronaeBorealids	TCB	24	296,5	294,0	300,0	233,6	34,4	0,30	0,16	37,7
$\alpha$ Antiliids	AAN	24	313,5	308,0	321,0	157,2	-9,5	0,89	-0,37	45,0

Data dari aliran tersebut dirangkum dalam Tabel 2-1. Satu hal yang perlu dicatat adalah bahwa Brown *et al.* (2008) menyertakan parameter aktivitas relatif yang ditentukan berdasarkan data pengamatan satu stasiun ( $F'_{\max}$ ). Karena itu, perlu dilakukan koreksi berdasarkan posisi stasiun relatif terhadap arah pancaran meteor:

$$F_{\max} = \frac{F'_{\max}}{\cos(\delta - \varphi)}, \quad (2-1)$$

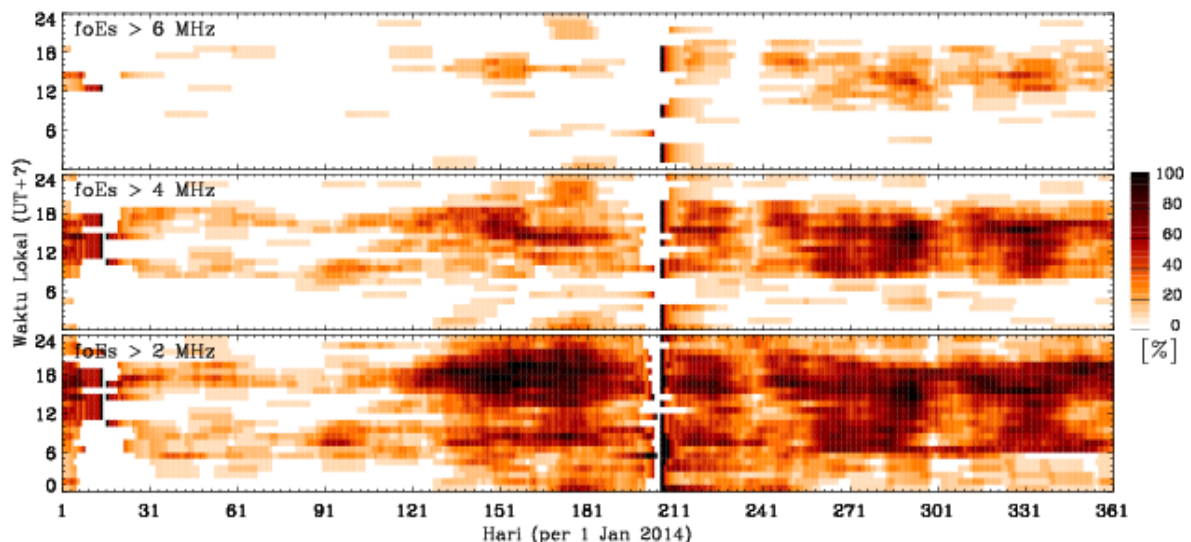
dengan  $\delta$  dan  $\varphi$  menyatakan deklinasi arah pancaran dan lintang geografis stasiun.

## 2.2 Persentase Kemunculan Lapisan E-Sporadis

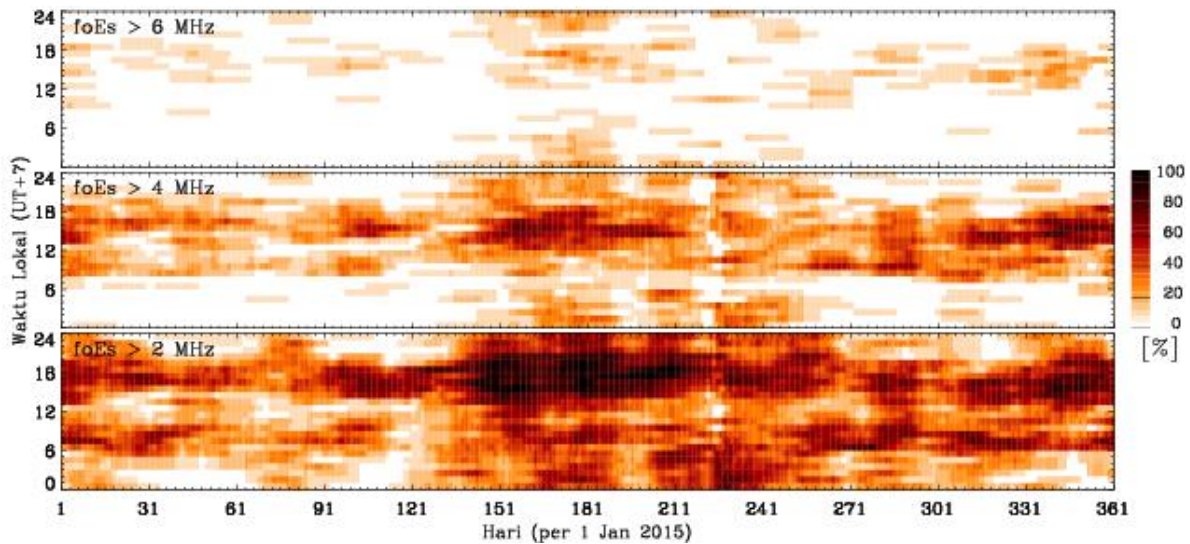
Data kedua yang digunakan dalam studi adalah peta temporal persentase kemunculan lapisan E-Sporadis di atas Sumedang yang tahun 2014-2015 yang sebagian telah dipublikasikan sebelumnya oleh Priyatikanto *et al.* (2016). Peta tersebut (Gambar 2-1 dan 2-2) dibangun berdasarkan data pengamatan ionosfer menggunakan ionosonda IPS71 di Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer

LAPAN Sumedang (6,913° LS; 107,838° BT) sepanjang 2014-2015. Persentase kemunculan ( $P$ ) lapisan E-Sporadis didefinisikan sebagai jumlah kemunculan lapisan E-Sporadis pada waktu tertentu dibagi dengan jumlah pengukuran yang ada. Baik jumlah kemunculan maupun jumlah pengukuran dihitung menggunakan metode *k-th nearest neighbor* (Silvermann, 1996) dengan  $k = 7$  hari. Nilai  $P$  dihitung untuk setiap jam serta dihitung dengan mempertimbangkan frekuensi ambang  $f_r$  sebesar 2, 4, dan 6 MHz.

Kemunculan lapisan E-Sporadis pada siang hari terjadi karena akumulasi ion pada ketinggian 90–120 km sebagai dampak dari dinamika mesofer dan termosfer bawah, misalnya pergeseran vertikal (*vertical drift*). Di sisi lain, pengendapan ion logam dari hujan meteor dapat berkontribusi dalam pembentukan lapisan E-Sporadis pada malam hari. Karena itu, analisis lebih dalam akan dilakukan terhadap kemunculan lapisan E-Sporadis di atas Sumedang pada malam hari (18.00 hingga 06.00 waktu lokal).



Gambar 2-1: Persentase kemunculan lapisan E-Sporadis ( $P$ ) di atas Sumedang tahun 2014 dengan frekuensi kritis lebih dari 2 MHz (bawah), 4 MHz (tengah), dan 6 MHz (atas). Kemunculan E-Sporadis pada malam hari dianalisis dalam studi ini



Gambar 2-2: Persentase kemunculan lapisan E-Sporadis di atas Sumedang tahun 2015 (Priyatikanto *et al.*, 2016)

### 3 PEMODELAN FLUKS HUJAN METEOR

Pendekatan yang digunakan untuk memahami pengaruh kejadian hujan meteor terhadap ionosfer regional adalah analisis kemunculan lapisan E-Sporadis dengan beragam frekuensi kritis saat terjadi peningkatan aktivitas hujan meteor. Untuk keperluan tersebut, pemetaan aktivitas hujan meteor pada domain ruang dan waktu perlu dilakukan.

Aktivitas hujan meteor diparameterisasi oleh fluks meteor yang mengalami variasi mengikuti persamaan (Jenniskens, 1994):

$$F = F_{\max} \times 10^{-B(\lambda_{\text{Sun}} - \lambda_{\max})}, \quad (3-1)$$

Dengan  $F_{\max}$  menyatakan fluks maksimum hujan meteor yang terjadi ketika bujur ekliptika Matahari ( $\lambda_{\text{Sun}}$ ) bernilai  $\lambda_{\max}$ . Konstanta  $B$  menyatakan laju peningkatan dan penurunan aktivitas hujan meteor. Beberapa hujan meteor memiliki laju peningkatan yang tidak simetris dengan laju penurunannya sehingga didefinisikan dua konstanta yang berbeda, misalnya  $B_+$  saat  $\lambda_{\text{Sun}} < \lambda_{\max}$  dan  $B_-$  saat  $\lambda_{\text{Sun}} > \lambda_{\max}$ .

Konstanta  $B$  tidak secara eksplisit diberikan oleh Brown *et al.* (2008) sehingga dihitung berdasarkan waktu awal dan akhir hujan meteor yang direpresentasikan oleh  $\lambda_{\text{sta}}$  dan  $\lambda_{\text{end}}$ .

Pada  $\lambda_{\text{Sun}} = \lambda_{\text{sta}}$  dan  $\lambda_{\text{Sun}} = \lambda_{\text{end}}$ , fluks meteor dianggap bernilai 1 sehingga berlaku persamaan:

$$B_+ = \frac{\log F_{\max}}{|\lambda_{\text{sta}} - \lambda_{\text{Sun}}|}, \quad (3-2)$$

$$B_- = \frac{\log F_{\max}}{|\lambda_{\text{end}} - \lambda_{\text{Sun}}|}, \quad (3-3)$$

Setelah  $B_+$  dan  $B_-$  ditentukan, fluks hujan meteor sepanjang tahun dapat dimodelkan dengan menggunakan Persamaan 3-1. Fluks tersebut merupakan fluks meteor yang teramati ketika arah pancaran berada di zenit pengamat. Bila arah pancaran berada pada jarak zenit ( $\zeta$ ) tertentu, maka fluks yang teramati adalah:

$$F_{\text{obs}} = F \cos \zeta \quad (3-4)$$

Dalam hal ini,  $\zeta$  berubah sepanjang waktu mengikuti rotasi dan revolusi Bumi dan pergeseran arah pancaran meteor sesuai dengan besarnya  $\Delta \alpha$  dan  $\Delta \delta$  (Tabel 2-1).

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

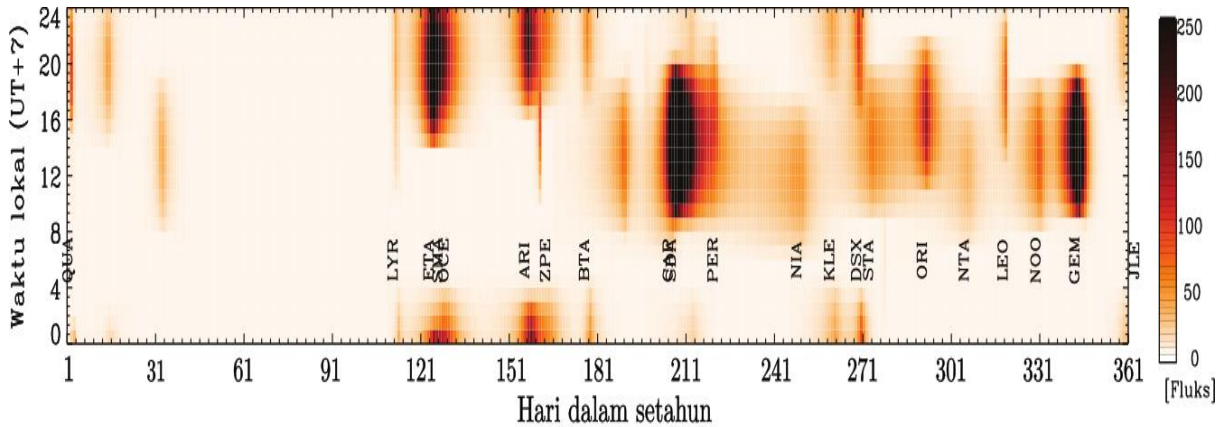
### 4.1 Model Fluks Hujan Meteor

Gambar 4-1 menunjukkan peta temporal hasil pemodelan fluks hujan meteor sepanjang tahun berdasarkan

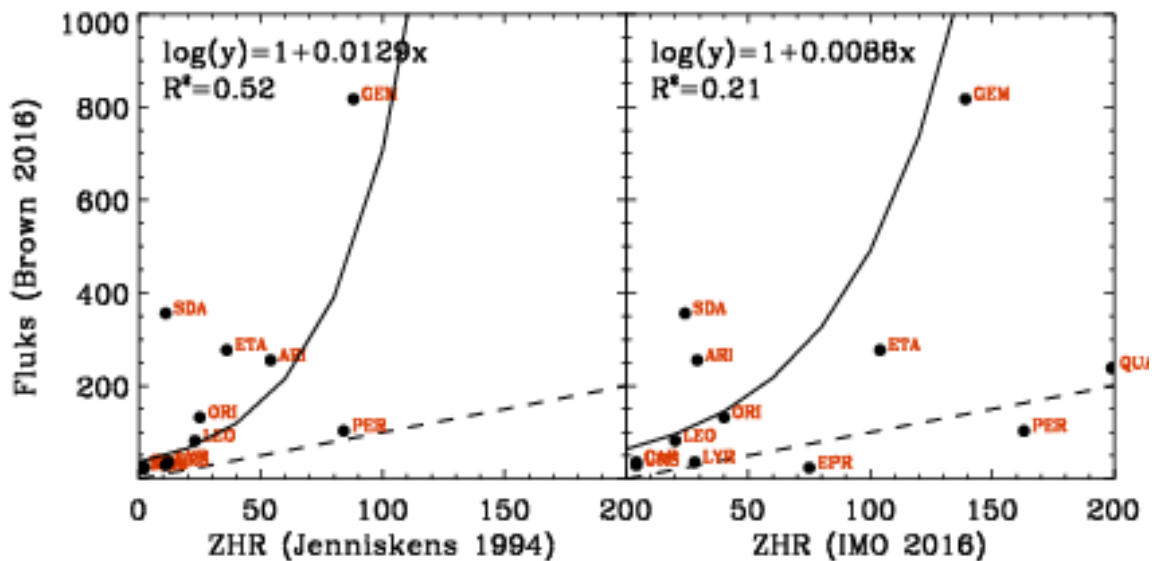


data yang dirangkum dalam Tabel 2-1. Waktu kejadian serta perkiraan intensitas dari hujan meteor dapat dibaca dari peta tersebut. Untuk mengetahui validitasnya, fluks puncak dari peta tersebut dibandingkan dengan intensitas meteor (ZHR) dari katalog Jenniskens (1994) serta hasil pengamatan *International Meteor Organization (IMO) Video Meteor Network* (Molau et al., 2013, 2014 a,b,e,d,g,c,f,h). Gambar 4-2 menunjukkan perbandingan tersebut. Tampak bahwa fluks meteor dalam katalog Brown et al. (2008) cenderung lebih tinggi dari ZHR dari pengamatan visual (Jenniskens,

1994) dan video (IMO-VMN). *Geminids (GEM)*,  $\eta$  *Aquariids (ETA)*, *Southern  $\delta$  Aquariids (SDA)*, *Daytime Arietids (ARI)*, dan *Orionids (ORI)* adalah hujan meteor dengan fluks radio jauh melebihi ZHR pada jendela visual. Hujan meteor *Geminids (GEM)* adalah kasus yang paling mencolok karena fluks radio sekitar delapan kali lipat ZHR visual atau sekitar lima kali lipat ZHR video. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti perbedaan sensitivitas pengamatan, variasi tahunan dari fluks hujan meteor, serta perlunya transformasi dari fluks meteor menjadi ZHR.



Gambar 4-1: Hasil pemodelan fluks relatif hujan meteor tahunan berdasarkan fluks relatif dari katalog Brown et al. (2008)



Gambar 4-2: Fluks relatif hujan meteor dalam katalog Brown et al. (2008) dibandingkan dengan ZHR dari katalog Jenniskens (1994) dan hasil pengamatan *International Meteor Organization Video Meteor Network*. Garis putus-putus menandai korespondensi satu-satu ( $y = x$ ), sedangkan garis tegas merupakan hasil *least-square fitting*

Pada Gambar 4-2, fungsi logaritmik dicocokkan dengan data. Hasilnya adalah:

$$\log F = 1 + 0,0129 \times ZHR_1, \quad (4-1)$$

$$\log F = 1 + 0,0088 \times ZHR_2, \quad (4-2)$$

dengan  $F$  menyatakan fluks meteor pada katalog Brown *et al.* (2008), sedangkan  $ZHR_1$  dan  $ZHR_2$  berturut-turut menyatakan ZHR dari Jenniskens (1994) dan IMO-VMN. Bila diperhatikan, korelasi fluks tidak terlalu baik karena hanya memiliki koefisien determinasi berturut-turut sebesar  $R^2 = 0,52$  dan  $R^2 = 0,21$ . Terlepas dari perbedaan fluks tersebut, waktu kejadian hujan meteor telah diketahui dengan baik. Dengan demikian peta temporal dapat digunakan sebagai acuan dalam analisis lebih lanjut, sementara tingkat aktivitas hujan meteor perlu memperhatikan mode pengamatan yang digunakan.

#### 4.2 Hujan Meteor dan Kemunculan Lapisan E-Sporadis

Langkah sederhana yang diambil untuk mengetahui pengaruh hujan meteor terhadap ionosfer adalah dengan menyandingkan presentase kemunculan E-Sporadis ( $P$ ) dengan fluks hujan meteor yang berubah sepanjang waktu. Dengan mengasumsikan bahwa deposit ion dari meteor bertahan dalam waktu yang cukup lama ( $>1$  jam), maka presentase kemunculan E-Sporadis direpresentasikan oleh nilai rerata  $P$  dalam satu malam.

Gambar 4-3 dan Gambar 4-4 menunjukkan plot  $P$  dengan frekuensi ambang tertentu disandingkan dengan fluks relatif hujan meteor sepanjang tahun. Presentase kemunculan E-Sporadis memiliki pola musiman yang tampak jelas (Priyatikanto *et al.*, 2016). Pada pertengahan tahun (Mei hingga September), nilai  $P$  lebih tinggi dari waktu lain. Pola semacam ini juga terjadi pada ionosfer di lintang menengah dan dikenal sebagai *summer maximum*

(Pietrella and Bianchi, 2009; Haldoupis *et al.*, 2007). Peningkatan nilai  $P$  juga terjadi pada Desember-Januari dan April sebagaimana telah dikemukakan sebelumnya. Hal ini terjadi, baik untuk  $foEs > 2$  MHz,  $foEs > 4$  MHz, maupun untuk  $foEs > 6$  MHz. Namun, puncak dari  $P$  menurun dengan bertambahnya frekuensi ambang.

Variasi musiman dari kemunculan E-Sporadis dan juga frekuensi kritis dari lapisan ini telah menjadi bahasan oleh sejumlah peneliti karena fenomena ini tidak dapat dijelaskan dengan mekanisme *wind shear* dalam pembentukan lapisan E-Sporadis (Mathews, 1998). Shalimov *et al.* (1999) mengaitkan pola musiman lapisan E-Sporadis dengan *planetary wave* yang mengalami variasi periodik setiap 2 hari (*quasi 2 day planetary wave*). Amplitudo rerata dari gelombang ini juga mengalami peningkatan pada musim panas. Akan tetapi, mekanisme ini dinilai tidak berkontribusi secara signifikan dalam pembentukan lapisan E-Sporadis (Haldoupis *et al.*, 2007). Variasi musiman dari fluks meteor yang masuk ke atmosfer Bumi dianggap lebih berpengaruh dalam peningkatan kemunculan dan frekuensi kritis lapisan E-Sporadis pada saat musim panas. Haldoupis *et al.* (2007) secara meyakinkan menunjukkan adanya korelasi yang baik antara frekuensi kritis lapisan E-Sporadis di lintang menengah dan fluks harian meteor yang teramati dengan radar SKYIMET 33 MHz pada rentang waktu November 1991 hingga Agustus 2001.

Untuk kasus dinamika ionosfer di atas Sumedang, fluks hujan meteor tidak secara langsung berkorelasi dengan persentase kemunculan lapisan E-Sporadis. Akan tetapi, terdapat kecocokan antara waktu kejadian hujan meteor dan peningkatan nilai  $P$  sebagaimana dapat diamati pada Gambar 4-3 dan 4-4. Kesesuaian ini tampak paling jelas untuk E-Sporadis dengan frekuensi kritis  $foEs > 6$  MHz. Di antara sejumlah hujan meteor tahunan yang telah dimodelkan,

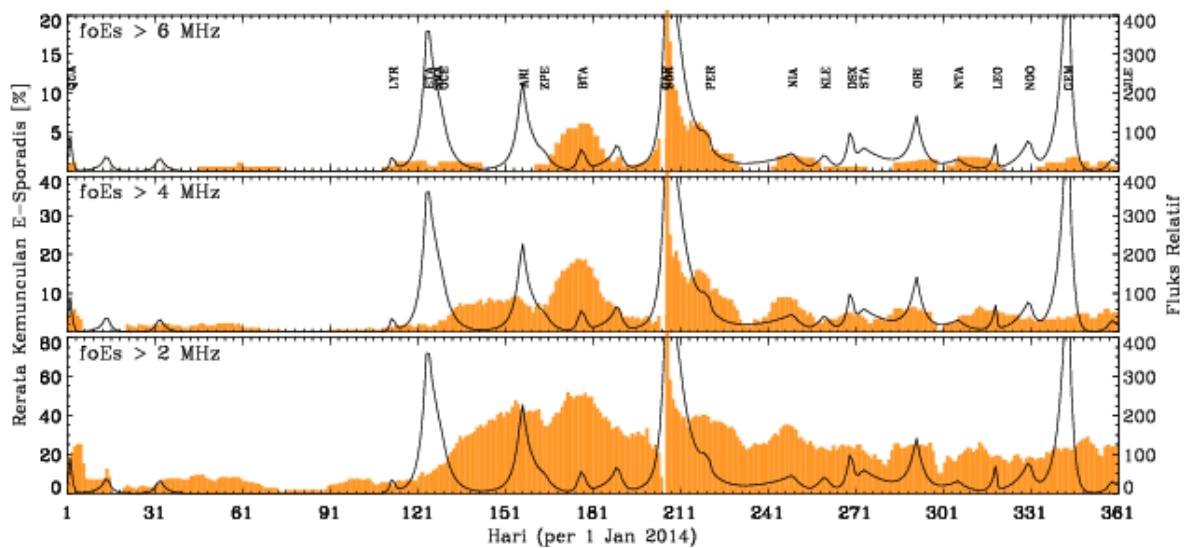
BTA, SDA, PER, dan NIA merupakan kejadian hujan meteor yang berimpit dengan peningkatan persentase kemunculan E-Sporadis (maksimum lokal). Di sisi lain, ETA, ORI, dan LEO merupakan hujan meteor tahunan dengan fluks tinggi, tetapi kejadiannya tidak diikuti dengan peningkatan nilai  $P$ . Kelompok pertama dapat dikatakan berdampak pada ionosfer di atas Sumedang.

Gambar 4-5 dan 4-6 menunjukkan analisis lebih detail yang dilakukan pada beberapa hujan meteor dalam kaitannya

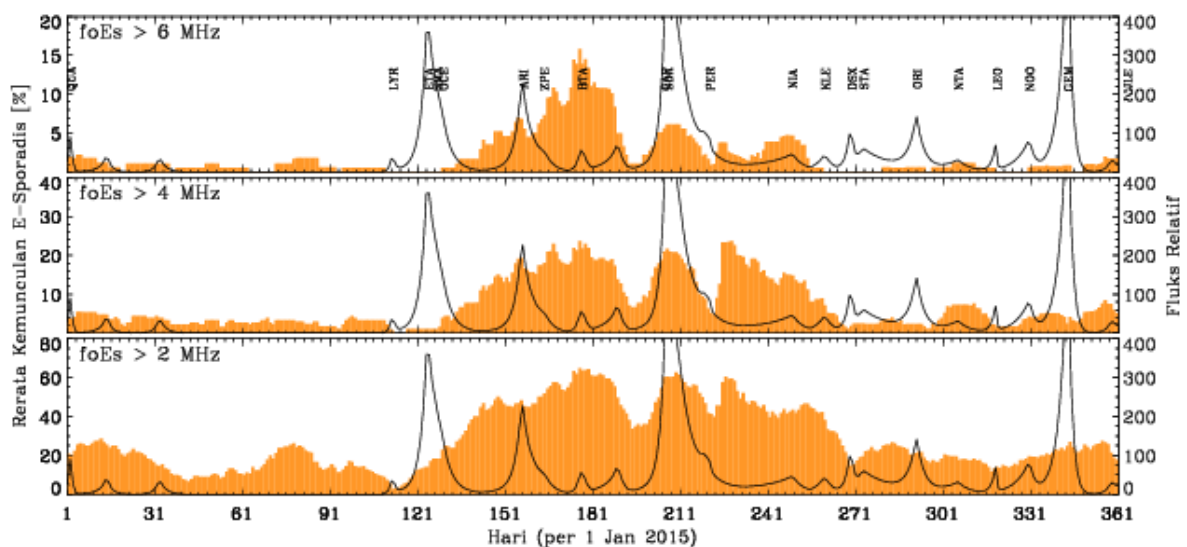
dengan peningkatan nilai  $P$  rata-rata. Regresi linier dilakukan dengan mengasumsikan adanya hubungan antara fluks hujan meteor ( $F$ ) dan nilai  $P$  sesuai dengan persamaan:

$$P = a + bF, \tag{4-3}$$

dengan  $a$  dan  $b$  menyatakan koefisien korelasi antara  $F$  dan  $P$ . Koefisien determinasi ( $R^2$ ) juga dihitung untuk menilai baik atau tidaknya korelasi tersebut.



Gambar 4-3: Presentase rata-rata kemunculan lapisan E-Sporadis pada malam hari tahun 2014 (area berwarna jingga). Fluks relatif hujan meteor tahunan juga digambarkan sebagai garis berwarna merah

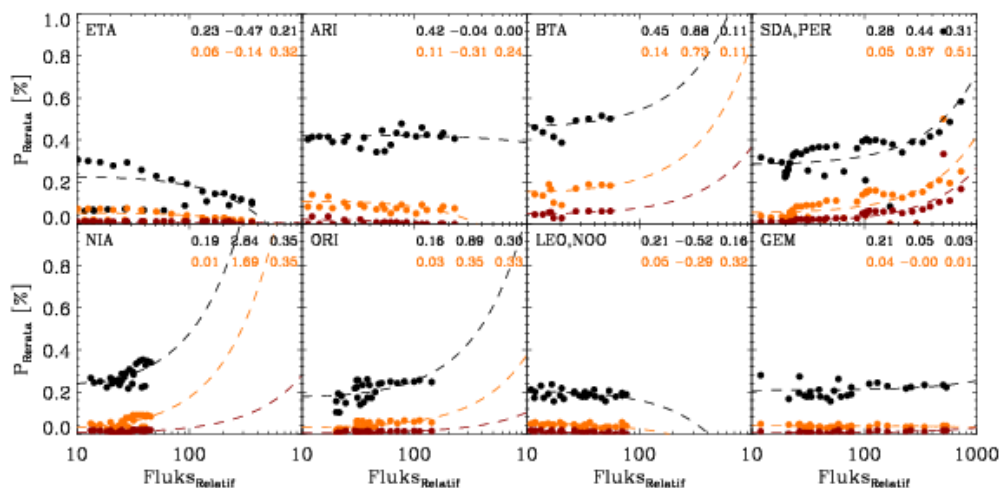


Gambar 4-4: Sama seperti Gambar 4-3, tetapi untuk data E-Sporadis tahun 2015

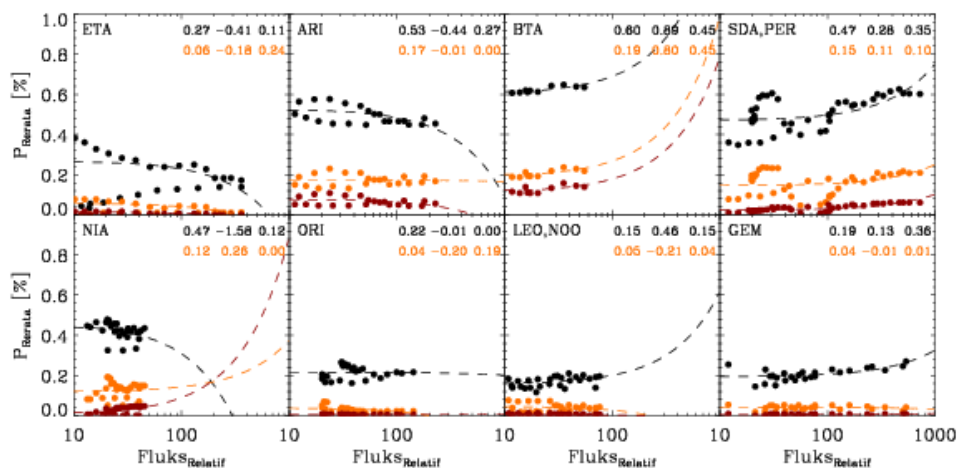
Sebagaimana diduga sebelumnya, fluks hujan meteor seperti ETA, ARI, ORI, dan LEO memiliki korelasi hampir nol atau bahkan negatif. Hal ini menunjukkan bahwa hujan meteor tersebut tidak menyebabkan peningkatan persentase kemunculan E-Sporadis. Sebaliknya, fluks hujan meteor BTA, SDA, PER, NIA, dan GEM memiliki korelasi positif terhadap  $P$ . Nilai koefisien korelasi dan koefisien determinasi juga bervariasi terhadap frekuensi ambang yang digunakan.

Bila mengacu pada parameter hujan meteor yang terangkum dalam Tabel 2-1, kelompok yang berkorelasi positif memiliki kecepatan geosentris relatif rendah ( $v_G < 50$  km/s). Sebaliknya,

kelompok yang berkorelasi negatif cenderung memiliki kecepatan geosentris lebih tinggi ( $v_G > 50$  km/s). Sebagaimana dimodelkan oleh Vondrak *et al.* (2008) dan juga didiskusikan dalam Pellinen-Wannberg *et al.* (2014), ketinggian ablasi serta laju produksi ion dari meteor bergantung pada massa, kerapatan, kecepatan, dan sudut datang dari meteor. Karena itu, besarnya deposit ion logam di lapisan E bergantung pada faktor tersebut. Meteor yang masuk ke atmosfer Bumi dengan kecepatan tinggi cenderung mengalami ablasi pada ketinggian lebih rendah. Meteor dengan kerapatan tinggi juga mengalami ablasi pada ketinggian rendah.



Gambar 4-5: Hubungan antara fluks relatif beberapa hujan dan persentase rata-rata kemunculan E-Sporadis ( $P$ ) tahun 2014 dengan  $foEs < 2$  MHz (hitam),  $foEs < 4$  MHz (jingga), dan  $foEs < 6$  MHz (merah bata). Kode hujan meteor dituliskan di sebelah kiri atas panel. Garis putus-putus merupakan hasil regresi dengan koefisien  $\alpha$ ,  $1000b$ , dan  $R^2$  (Persamaan 4-3)



Gambar 4-6: Sama seperti Gambar 4-5, tetapi untuk data E-Sporadis tahun 2015

## 5 KESIMPULAN

Dalam studi ini, telah dibuat peta temporal kejadian hujan meteor tahunan berdasarkan hasil pengamatan visual dan radio yang telah dirangkum dalam katalog. Di antara 42 hujan meteor utama, terdapat beberapa hujan meteor yang memiliki indikasi berdampak pada kemunculan lapisan E-Sporadis di atas Sumedang, Jawa Barat. Hujan meteor tersebut di antaranya adalah BTA, SDA, PER, NIA, dan GEM. Di sisi lain, terdapat beberapa hujan meteor dengan fluks tinggi, tetapi tidak secara jelas menimbulkan dampak berupa peningkatan persentase kemunculan lapisan E-Sporadis. Kecepatan geosentris hujan meteor yang relatif tinggi diperkirakan memicu ablasi tidak pada ketinggian lapisan E.

Meski demikian, pengamatan ionosfer di atas Sumedang menunjukkan bahwa variasi musiman lebih dominan dibandingkan fluktuasi persentase kemunculan lapisan E-Sporadis yang berasosiasi dengan hujan meteor. Persentase kemunculan E-Sporadis mencapai maksimum pada pertengahan tahun sebagaimana *summer maximum* yang terjadi di daerah lintang menengah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada penelaah yang telah memberikan masukan perbaikan terhadap artikel ini.

## DAFTAR RUJUKAN

- Brown, P., R. J., Weryk, D. K., Wong, and J. Jones, 2008. *The Canadian Meteor Orbit Radar meteor stream catalog*. Earth Moon Planet, 102, 209-219.
- Cepelcha, Z., J., Borovicka, W. G., Elford, D. O., Revelle, R. L., Hawkes, V., Porubcan, and M. Simek, 1998. *Meteor phenomena and bodies*. Space Science Review, 84, 327.
- Correira, J., A. C., Aikin, J. M., Grebowsky, and J. P., Burrows, 2010. *Metal Concentrations in the Upper Atmosphere During Meteor Showers*. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 909-917.
- Correira, J., A. C., Aikin, J. M., Grebowsky, W., D., Pesnell, and J. P., Burrows, 2008. *Seasonal Variations of Magnesium Atoms in the Mesosphere-Thermosphere*. Geophysical Research Letters, 35, L06103.
- Haldoupis, C., D., Pancheva, W., Singer, C., Meek, and J., MacDougall, 2007. *An Explanation for the Seasonal Dependence of Midlatitude Sporadic E Layers*. Journal of Geophysical Research, 112, A06315.
- Jenniskens, P., 1994. *Meteor Stream Activity. I. The Annual Streams*. Astronomy and Astrophysics, 287, 990-1013.
- Jenniskens, P., 2006. *Meteor Showers and Their Parent Comets*. Cambridge University Press.
- Jenniskens, P., P., Gural, L., Dynneson, B., Grigsby, K., Newman, M., Borden, M., Koop, and D., Holman, 2011. *CAMS, Cameras for Allsky Meteor Surveillance to Establish Minor Meteor Showers*. Icarus, 216, 40-61.
- Jenniskens, P., Q., N'enon, J., Albers, P., Gural, B., Haberman, D., Holman, R. M., A. B., Grigsby, D., Samuels, and C., Johannink, 2016. *The established meteor showers as observed by CAMS*. Icarus, 266, 331-354.
- Ma, Y., Y., He, P., Xu, and H., Zhao, 2008. *Observation and Research on Strong Meteor Showers and their Catastrophic Space Weather Events*. Chinese Astronomy and Astrophysics, 32, 186-196.
- Mathews, J. D., 1998. *Sporadic E., Current Views and Recent Progress*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 60, 413-435.
- McNeil, W. J., R. A., Dressler, and E., Murad, 2001. *Impact of a Major Meteor Storm on Earths Ionosphere, A Modeling Study*. Journal of Geophysical Research, 106, 10447.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, 2013. *Results of the IMO Video Meteor Network - September 2013*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 41, 207.

- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, 2014a. *Results of the IMO Video Meteor Network - November 2013*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 25.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, 2014b. *Results of the IMO Video Meteor Network - October 2013*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 20.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, and A., Igaz, 2014c. *Results of the IMO Video Meteor Network - April 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 145.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, and A., Igaz, 2014d. *Results of the IMO Video Meteor Network - December 2013*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 76.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, and A., Igaz, 2014e. *Results of the IMO Video Meteor Network-January 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 83.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, and R., Goncalves, and A., Igaz, 2014f. *Results of the IMO Video Meteor Network - June 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 201.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, R., Goncalves, and A., Igaz, 2014g. *Results of the IMO Video Meteor Network-May 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 150.
- Molau, S., J., Kac, S., Crivello, E., Stomeo, G., Barentsen, R., Goncalves, A., Igaz, C., Saraiva, M., Maciewski, and M., Maslov, 2014h. *Results of the IMO Video Meteor Network-August 2014*. WGN, Journal of the International Meteor Organization, 42, 239.
- Pellinen-Wannberg, A., K., I., Haggstrom, J.,D., C., Sanchez, J., M., C., Plane, and A., Westman, 2014. *Strong E Region Ionization Caused by the 1767 Trail During the 2002 Leonids*. Journal of Geophysical Research, Space Physics, 119, 7880.
- Pietrella, M., and C., Bianchi, 2009. *Occurrence of Sporadic-e Layer Over the Ionospheric Station of Rome, Analysis of Data for Thirty-two Years*. Advances in Space Research, 44, 72.
- Priyatikanto, R., F., Mumtahana, and M., Tarigan, 2016. *Variasi Diurnal dan Musiman Kemunculan Lapisan E-Sporadis di atas Sumedang tahun 2015*. Jurnal Sains Dirgantara, 13, 113-122.
- Rusnadi, I. E., N., Ristanti, and T., Djamaluddin, 2002. *Pola Frekuensi Kritis dan Ketinggian Lapisan E-Sporadis di atas Biak pada saat Terjadi Hujan Meteor*. Warta LAPAN, 2, 159.
- Shalimov, S., C., Haldoupis, M., Voiculescu, and K., Schlegel, 1999. *Mid-latitude E Region Plasma Accumulation Driven by Planetary Wave Horizontal Wind Shears*. Journal of Geophysical Research, 104, 28207.
- Silvermann, B., 1996. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall.
- Vondrak, T., J. M. C.m Plane, S.m Broadley, and D., Janches, 2008. *A Chemical Model of Meteoric Ablation*. Journal of Atmospheric Chemistry and Physics, 8, 7015.

# **VARIASI TRACE GASES SELAMA 10 TAHUN DAN PENCAMPURAN DI SEKITAR LAPISAN TROPOPAUSE DI INDONESIA BERBASIS SATELIT (TRACE GASES VARIATION FOR 10 YEARS AND MIXING AROUND THE TROPOPAUSE LAYERS IN INDONESIA BASED ON SATELLITE)**

**Novita Ambarsari<sup>1</sup>, Ninong Komala, Fanny Aditya Putri**

**Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer**

**Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional**

**Jl. Dr. Djunjunan 133 Bandung 40173 Indonesia**

**<sup>1</sup>e-mail: novitaambar@yahoo.com, novita.ambarsari@lapan.go.id**

## **ABSTRACT**

Measurement of trace gases (CO, O<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, H<sub>2</sub>O, and HNO<sub>3</sub>) and temperatures around upper troposphere/lower stratosphere (UT/LS) or rather around Tropical Tropopause Layer (TTL) in Indonesia by using Microwave Limb Sounder (MLS) instrument board on Satellite AURA for 2005-2014 period to make variations of these gases over the 10 years around TTL allows to be studied more deeply. TTL becomes the main route entry of chemical compounds and aerosols originating in the troposphere into the stratosphere. The composition of minor gases in the TTL is very important because it affects the global radiation budget. Analysis of vertical profiles of these gases in the TTL was done to determine the suitability of the concept of TTL which starts from the upper troposphere to the lower stratosphere. Other method are the time series diagram of the altitude (height versus time series cross section) which shows the annual and interannual variations in vertical profiles of these gases in the TTL and the possible influence of the dynamics of the atmosphere. The results showed correlation of these gases with ozone showed most of the air in the stratosphere is experiencing mixing in the TTL. In addition, changes in concentration and temperature values in the TTL have been calculated using the trends of each parameter and it is known that the parameters of HCl, CH<sub>3</sub>Cl, and temperature show respective decreases of -0.036 ppmv, -0.024 ppmv, and -0.456 K. As for other parameters such as ozone, CO, H<sub>2</sub>O, and HNO<sub>3</sub> showed an increase of respectively 0.0036 ppmv, 0.0096 ppmv, 0.108 ppmv, and 0.06 ppmv.

Keywords: *trace gases, tropopause, TTL, MLS, AURA*

## ABSTRAK

Pengukuran *trace gases* (CO, O<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>) dan temperatur di sekitar lapisan troposfer atas/stratosfer bawah (UT/LS) atau tepatnya di sekitar *Tropical Tropopause Layer* (TTL) di Indonesia menggunakan instrumen *Microwave Limb Sounder* (MLS) pada Satelit AURA periode 2005-2014 menjadikan variasi gas-gas tersebut selama 10 tahun di sekitar TTL memungkinkan untuk dikaji lebih dalam. TTL menjadi jalur utama masuknya senyawa-senyawa kimia dan aerosol yang bersumber di troposfer ke stratosfer. Komposisi gas-gas minor di TTL sangat penting karena mempengaruhi *budget* radiasi global. Analisis profil vertikal gas-gas tersebut di TTL dilakukan untuk mengetahui kesesuaian konsep TTL yang dimulai dari lapisan troposfer atas hingga ke stratosfer bawah. Metode lainnya adalah dengan diagram *time series* terhadap ketinggian (*time series versus height cross section*) yang menunjukkan variasi tahunan maupun antar tahunan profil vertikal gas-gas tersebut di TTL serta kemungkinan adanya pengaruh dari proses dinamika atmosfer. Hasil penelitian menunjukkan korelasi gas-gas tersebut dengan ozon menunjukkan adanya sebagian udara di stratosfer yang mengalami pencampuran di wilayah TTL. Selain itu, perubahan nilai konsentrasi dan temperatur di TTL telah dihitung menggunakan *trend* masing-masing parameter dan diketahui bahwa parameter HCl, CH<sub>3</sub>Cl, dan temperatur menunjukkan penurunan masing-masing sebesar -0,036 ppmv, -0,024 ppmv, dan -0,456 K. Adapun parameter lain seperti ozon, CO, H<sub>2</sub>O, dan HNO<sub>3</sub> menunjukkan adanya peningkatan masing-masing sebesar 0,0036 ppmv, 0,0096 ppmv, 0,108 ppmv, dan 0,06 ppmv.

Kata kunci: *gas minor, tropopause, TTL, MLS, AURA*

### 1 PENDAHULUAN

Lapisan tropopause di wilayah tropis telah digambarkan sebagai lapisan transisi antara troposfer dan stratosfer di daerah tropis. Lapisan ini lebih sedikit terhubung ke *Planetary Boundary Layer* (PBL) dibandingkan dengan daerah troposfer bawah tetapi tidak dominan dipengaruhi oleh radiasi matahari seperti halnya di stratosfer. Batas wilayah *Tropical Tropopause Layer* (TTL) telah ditentukan dari beberapa aspek diantaranya proses konveksi dan struktur termal atmosfer. Daerah dengan fenomena konveksi *overshoot* pada ketinggian 17-19 km menjadi nilai batas atas lapisan TTL dan wilayah dengan *buoyancy* netral (14 km) menjadi batas bawahnya (Marcy et al., 2007). Kriteria lainnya adalah batas atas TTL berada pada ketinggian 17-19 km saat terjadi *Cold Point Temperature* (CPT) atau saat temperatur mencapai titik terendah dan batas bawahnya adalah level dimana terjadinya *lapse rate minimum* (10-12 km) (Marcy et al., 2007).

TTL sebagai lapisan batas antara troposfer dan stratosfer diketahui memiliki karakteristik kedua lapisan yaitu troposfer atas dan stratosfer bawah (*Upper Troposphere/Lower Stratosphere*). TTL juga diketahui dikontrol oleh berbagai proses diantaranya interaksi transpor konveksi, gelombang konvektif, radiasi, mikrofisika awan, dan sirkulasi stratosfer skala luas (*large scale*) (Henz, 2010). TTL juga menjadi jalur utama masuknya senyawa-senyawa kimia dan aerosol yang bersumber di troposfer ke stratosfer. Konveksi tinggi menjadi kunci utama proses yang mempengaruhi komposisi kimia di troposfer dan stratosfer di wilayah tropis karena dapat membawa emisi dari troposfer di PBL. Karakteristik TTL juga sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis dan musim. Variabilitas ini mungkin berhubungan dengan sampel massa udara (bersih atau terpolusi), proses yang terjadi hingga massa udara tersebut mencapai TTL, konveksi tinggi, transpor radiatif, dan proses kimia yang



melibatkan massa udara tersebut (Marecal et al., 2011).

Rasio campuran (*mixing ratio*) beberapa gas minor (*trace gases*) di TTL menunjukkan variasi yang unik (Konopka et al., 2010; Fueglistaler et al., 2009; Ploeger et al., 2012). Komposisi gas-gas minor di TTL sangat penting karena mempengaruhi *budget* radiasi global. Pengaruh gas-gas minor terhadap temperatur menjadikan rasio campuran gas-gas minor di TTL juga berpengaruh terhadap uap air di stratosfer serta proses kimia yang menyertainya dengan implikasinya terhadap radiasi global. Oleh karena itu, untuk memahami perubahan sistem iklim, penting untuk mempelajari proses yang mengontrol komposisi gas-gas minor di TTL (Ploeger et al., 2012).

Pemahaman mengenai proses yang mempengaruhi komposisi kimia, mikrofisika, dan transpor di troposfer atas-stratosfer bawah di wilayah tropis (TTL) penting untuk menentukan proses transpor dan pencampuran gas-gas minor masuk ke stratosfer yang akan mempengaruhi ozon dan uap air di stratosfer. Oleh karena itu, penelitian mengenai komposisi gas minor di TTL penting dilakukan karena masuknya gas minor ke stratosfer ditentukan oleh jumlah gas minor yang mampu melewati TTL, waktu hidup gas-gas minor di TTL sebelum mengalami transpor *upward* serta proses lainnya yang berpotensi mengubah konsentrasi gas-gas tersebut (proses kimia, mikrofisika, dan pencampuran dari lokasi lain). Selain itu, penelitian mengenai komposisi kimia di TTL juga penting karena beberapa gas minor seperti H<sub>2</sub>O, ozon, dan CO<sub>2</sub> berkontribusi terhadap perubahan radiasi dan iklim, juga komposisi kimia di TTL berperan sebagai sumber pembentukan partikel yang berpengaruh terhadap aerosol di stratosfer (Abalos et al., 2013).

Penelitian mengenai komposisi gas minor di TTL telah banyak dilakukan peneliti-peneliti internasional selama lebih dari satu dekade terakhir diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Marcy et al. (2007) dan Marecal et al. (2011). Kedua penelitian tersebut membuktikan bahwa profil vertikal gas minor sesuai dengan konsep TTL yang menunjukkan perbedaan di troposfer atas hingga stratosfer bawah serta kombinasi dari profil vertikal dan korelasi dengan ozon (kurva "L") menunjukkan adanya sejumlah gas dari stratosfer dan troposfer yang mengalami pencampuran di TTL. Penelitian mengenai gas-gas minor di TTL Indonesia khususnya ozon dan karbon monoksida (CO) sebelumnya juga telah dilakukan oleh Ambarsari dan Komala (2014) yang menganalisis profil vertikal ozon dan CO di sekitar TTL di Indonesia. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya lapisan transisi yang ditunjukkan dengan menurunnya konsentrasi ozon dan CO pada ketinggian sekitar TTL serta adanya pencampuran udara stratosfer dan troposfer di TTL yang tampak pada hasil *scatter plot* CO dan ozon di troposfer atas, TTL, dan stratosfer bawah.

Penelitian ini bertujuan untuk melengkapi penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan mengkaji variasi gas-gas minor lainnya di TTL yaitu asam klorida (HCl), ozon (O<sub>3</sub>), asam nitrat (HNO<sub>3</sub>), metil klorida (CH<sub>3</sub>Cl), karbon monoksida (CO), uap air (H<sub>2</sub>O) serta parameter fisik yaitu temperatur. Data komposisi gas-gas minor dan temperatur tersebut diperoleh dari hasil observasi sensor *Microwave Limb Sounders* (MLS) pada satelit AURA. Periode penelitian ini adalah selama 10 tahun yaitu tahun 2005 hingga 2014 dengan wilayah kajian meliputi Indonesia (94° – 146° BT, 12° LS – 12° LU).

## 2 DATA DAN METODE

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data harian profil vertikal dalam *Volume Mixing Ratio* (VMR) gas-gas minor meliputi CO, O<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, HCl dan temperatur hasil pengukuran sensor MLS satelit AURA tahun 2005-2014 untuk wilayah Indonesia ([www.mirador.gsfc.nasa.gov](http://www.mirador.gsfc.nasa.gov)). MLS mengamati radiasi termal pada gelombang mikro yang dipancarkan Bumi dan merekam data dari permukaan hingga ketinggian 90 km. MLS mengukur emisi termal dari pita spektrum yang luas pada frekuensi 118, 190, 240, 640, dan 2250 GHz yang diukur secara kontinyu menggunakan 7 penerima gelombang mikro. Resolusi data MLS adalah sebesar 3 km untuk resolusi vertikal dan 200 km untuk resolusi horizontal (<http://mls.jpl.nasa.gov/eos/instrument.php>). Resolusi horisontal ini menghasilkan cakupan wilayah observasi MLS meliputi 82 °LS hingga 82 °LU. MLS mengukur profil vertikal pada 3500 lokasi di dunia setiap 24 jam (Ahmad et al., 2006).

Instrumen MLS dilengkapi dengan empat jenis radiometer yang dioperasikan pada temperatur ambien pada lima daerah spektrum yang mampu mendeteksi spektrum O<sub>2</sub> termasuk mengukur temperatur dan tekanan, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub> di troposfer atas, CO, HCl, ClO, BrO, HO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, dan OH (Waters et al., 2006). Validasi data hasil pengukuran MLS AURA telah banyak dilakukan di antaranya penelitian yang dilakukan oleh Yan et al. (2016) yang melakukan validasi data ozon, uap air, dan temperatur dari MLS AURA dengan data *ozonesonde* di wilayah Tibet. Hasil analisis statistik menunjukkan korelasi yang cukup baik antara MLS dengan *ozonesonde* untuk data ozon, uap air, dan temperatur di sekitar lapisan tropopause dengan koefisien korelasi >0.5 (Yan et al., 2016). Selain itu Komala et al. (2013) juga telah melakukan

validasi data profil vertikal ozon dan temperatur dari MLS dengan data dari instrumen *ozonesonde* di Kototabang tahun 2007 dan 2008 yang memberikan nilai korelasi yang sangat baik dengan  $r=0,9999$  (Komala et al., 2013). Validasi konsentrasi uap air dari MLS AURA dengan data hasil pengukuran *Cryogenic Frost point Hygrometer* (CFH) di Biak Indonesia juga telah dilakukan oleh Vomel et al. (2007), yang menunjukkan perbedaan nilai sebesar 5-25 % dengan koefisien korelasi bervariasi antara 0,7 hingga 0,85 tergantung level tekanan atau ketinggian. Validasi untuk *trace gases* lainnya hasil pengukuran MLS AURA dan pengukuran insitu di Indonesia belum pernah dilakukan karena keterbatasan instrumen pengukuran insitu yang mengukur senyawa CO, HCl, CH<sub>3</sub>Cl, dan HNO<sub>3</sub>.

Adapun tahapan pengolahan data yang dilakukan pada penelitian ini diawali dengan ekstraksi data profil vertikal komposisi kimia dari MLS AURA dalam format *Hierarchical Data Format-5* (HDF-5) untuk memperoleh nilai VMR masing-masing komponen kimia, lintang, bujur, dan tekanan (hPa) yang kemudian dikonversi menjadi ketinggian (km). Proses konversi tekanan (hPa) menjadi ketinggian (km) dilakukan dengan menggunakan nilai *Geopotential Height* (GPH) dari data MLS AURA yang memuat data tekanan atmosfer (hPa) untuk setiap level ketinggian. Lapisan tropopause pada tekanan 100 hPa menunjukkan nilai rata-rata GPH diantara 16-17 km untuk wilayah Indonesia.

Tahapan berikutnya adalah melakukan perata-rataan data untuk wilayah Indonesia (*area average*) untuk memperoleh satu nilai profil vertikal rata-rata Indonesia untuk masing-masing gas setiap harinya. Perata-rataan ini merupakan metode yang banyak dilakukan untuk menganalisis profil vertikal atmosfer di suatu wilayah yang luas, seperti pada penelitian Ploeger et

al. (2011) yang menganalisis profil vertikal ozon dan uap air di TTL khususnya profil vertikal rata-rata di wilayah tropis pada lintang  $20^{\circ}$  LU –  $20^{\circ}$  LS. Selain itu, penelitian oleh Fujiwara et al. (2010) juga mengenai profil vertikal uap air rata-rata di wilayah tropis di sekitar stratosfer bawah dengan area penelitian mencakup  $15^{\circ}$  LS –  $30^{\circ}$  LU dan  $90^{\circ}$  BT –  $90^{\circ}$  BB. Penelitian mengenai profil vertikal komposisi kimia dengan meratakan untuk wilayah tertentu juga dilakukan diantaranya oleh (Qian et al., 2014), (Liu et al., 2010), dan (Abalos et al., 2013).

Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, profil vertikal ozon, CO, H<sub>2</sub>O, dan temperatur di beberapa wilayah di Indonesia ternyata tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan hanya sekitar 1 % hingga 10 % untuk masing-masing senyawa tergantung level tekanan atau ketinggian, dan perbedaan yang jauh lebih kecil terjadi di lapisan tropopause hingga troposfer (Ambarsari dan Komala, 2010). Penelitian untuk variasi *trace gases* lainnya di Indonesia belum dilakukan secara menyeluruh sehingga metode perataan area (*area average*) ini dipilih untuk dapat memberikan gambaran secara umum profil vertikal *trace gases* di tropopause Indonesia.

Selanjutnya adalah pemilihan data pada ketinggian sekitar TTL. Pada penelitian ini analisis difokuskan pada ketinggian 13 - 22 km yaitu dari lapisan troposfer atas hingga stratosfer bawah yang dapat mencakup kondisi di lapisan tropopause serta profil vertikal yang menggambarkan adanya transpor senyawa kimia melewati TTL. Kemudian dilakukan perataan bulanan, musiman, analisis diagram *time series-ketinggian*, analisis variasi *trace gases* pada level ketinggian TTL dan *scatter plot* antara gas-gas tersebut dengan ozon sebagai senyawa penanda stratosfer (*stratospheric tracer*). Data yang digunakan

untuk membuat *scatter plot* ini adalah data profil vertikal *trace gases* dan ozon pada ketinggian 10-20 km yang mewakili lapisan troposfer atas, tropopause, dan stratosfer bawah yang dapat menunjukkan profil pencampuran udara secara vertikal senyawa *trace gases* di troposfer atas dengan senyawa di stratosfer bawah di sekitar lapisan TTL (Marcy et al., 2007; Marecal et al., 2011). Untuk mengetahui perubahan konsentrasi *trace gases* dan temperatur di TTL Indonesia dibuat *trend* selama 10 tahun pengukuran kemudian dihitung berdasarkan persamaan garis (*trend line*) nilai perubahan konsentrasi yang terjadi.

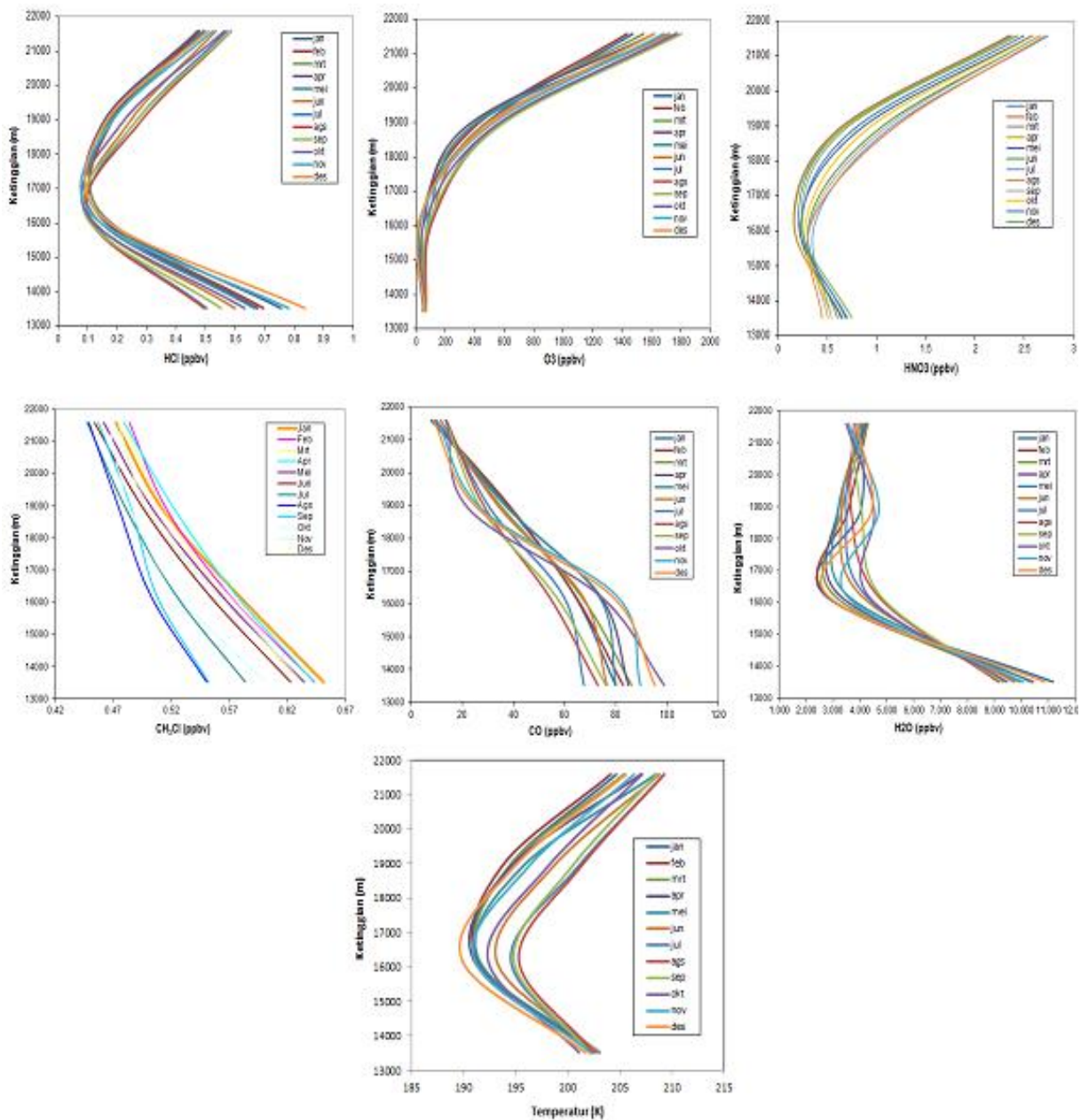
### 3 HASIL DAN ANALISIS

Profil vertikal HCl, O<sub>3</sub>, dan HNO<sub>3</sub> menunjukkan dengan jelas adanya lapisan transisi pada ketinggian sekitar 16-17 km atau tekanan 100 hPa yang diperkirakan sebagai lapisan TTL di Indonesia seperti diperlihatkan pada Gambar 3-1. Hal ini ditunjukkan dengan konsentrasi ketiga senyawa tersebut mencapai nilai terendah (minimum) pada ketinggian 16-17 km. Penentuan ketinggian pada 16-17 km untuk lapisan tropopause telah dijelaskan pada bagian metodologi.

HCl, O<sub>3</sub>, dan HNO<sub>3</sub> merupakan *stratospheric tracer* atau senyawa yang dominan ada di stratosfer ditunjukkan dengan profil vertikal ketiga senyawa tersebut yang mengalami peningkatan konsentrasi di atas TTL (Gambar 3-1). Sumber antropogenik HCl di permukaan yang dapat terbawa hingga ke TTL sangat sedikit hampir dapat diabaikan karena sebagian besar HCl di troposfer mengalami pembersihan melalui proses deposisi basah. Keberadaan HCl di TTL berasal dari stratosfer (Marcy et al., 2007; Kim et al., 2008). Hal ini berbeda dengan profil vertikal HCl di sekitar TTL di Indonesia seperti pada Gambar 3-1. Konsentrasi HCl di troposfer atas di Indonesia pada ketinggian 13 km cukup

tinggi sekitar 0,5 hingga 0,9 ppbv, kemudian menurun hingga di lapisan TTL pada ketinggian sekitar 16,5 km dengan konsentrasi HCl hanya sekitar 0,1 ppbv. Di atas TTL hingga stratosfer bawah pada ketinggian 22 km, konsentrasi HCl meningkat kembali mencapai 0,5 hingga 0,6 ppbv. Konsentrasi HCl di troposfer atas di Indonesia cukup tinggi diperkirakan karena sumber HCl di troposfer terutama dari proses deklorinasi aerosol garam laut dengan

senyawa asam seperti HNO<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Kim et al., 2008). Wilayah Indonesia yang dikelilingi lautan diperkirakan menjadi alasan konsentrasi HCl di troposfer atas di Indonesia cukup tinggi. Peningkatan konsentrasi HCl di atas TTL hingga ke stratosfer bawah diperkirakan karena adanya pencampuran udara stratosfer di TTL (Konopka et al., 2010; Marcy et al., 2007) yang ditunjukkan juga oleh peningkatan konsentrasi ozon mencapai 1800 ppbv di stratosfer



Gambar 3-1: Profil vertikal rata-rata bulan *trace gases* di sekitar lapisan tropopause tropis atau TTL di Indonesia Tahun 2005-2014

bawah (Mebarki et al., 2010). Konsentrasi ozon di troposfer atas hingga sekitar TTL (ketinggian 13-17 km) sangat kecil sekitar 40-70 ppbv. Konsentrasi ozon meningkat setelah lapisan TTL pada 16-17 km hingga stratosfer bawah pada ketinggian 22 km konsentrasi ozon mencapai maksimum yaitu antara 1400-1800 ppbv. Hal ini menunjukkan terjadinya pencampuran udara stratosfer dimana konsentrasi ozon sangat tinggi dengan udara troposfer di lapisan TTL (Konopka et al., 2010; Tuck et al., 2008). Sumber ozon di troposfer yang berasal dari aktivitas antropogenik lebih kecil dibandingkan dengan produksi ozon di stratosfer yang berasal dari reaksi fotokimia. Sumber  $O_3$  di TTL sebagian berasal dari sumber di troposfer, dari proses produksi ozon, maupun dari transport udara stratosfer (Marcy et al., 2007).

Profil vertikal  $HNO_3$  menunjukkan pola yang hampir sama dengan profil vertikal ozon, yaitu pada ketinggian lebih rendah di daerah troposfer atas, konsentrasi  $HNO_3$  lebih kecil sekitar 0,5 ppbv kemudian menurun hingga di lapisan TTL. Di atas TTL konsentrasi  $HNO_3$  meningkat hingga ke stratosfer bawah atau ketinggian 22 km, yang konsisten dengan peningkatan konsentrasi  $O_3$  dan  $HCl$ . Konsentrasi  $HNO_3$  di stratosfer bawah mencapai 2,5 ppbv. Sumber  $HNO_3$  di troposfer berasal dari sumber lokal maupun regional seperti dari pembentukan petir.  $HNO_3$  yang dihasilkan di troposfer yang salah satu sumbernya adalah dari peristiwa kilat lebih kecil dibandingkan proses fotokimia di stratosfer yang menghasilkan  $HNO_3$ .  $HNO_3$  di TTL dipengaruhi dari sumber yang berasal dari atas TTL maupun dari bawah TTL (Marcy et al., 2007).

Berbeda dengan  $HCl$ ,  $O_3$ , dan  $HNO_3$  yang bersifat sebagai *stratospheric tracer*,  $CH_3Cl$ ,  $CO$ , dan  $H_2O$  bersifat sebagai *tropospheric tracer* yaitu senyawa yang dominan berasal dari sumber di

troposfer. Hal ini terlihat dari profil vertikal senyawa-senyawa tersebut pada Gambar 3-1 yang mengalami penurunan konsentrasi dari troposfer atas hingga ke stratosfer bawah (Marcy et al., 2007). Ketiga senyawa tersebut menunjukkan pola yang mengalami penurunan konsentrasi dari troposfer hingga ke stratosfer bawah dengan perubahan pola yang sangat kecil terjadi pada ketinggian 16-17 km. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan semakin berkurangnya pengaruh dari sumber di troposfer dengan semakin meningkatnya ketinggian.

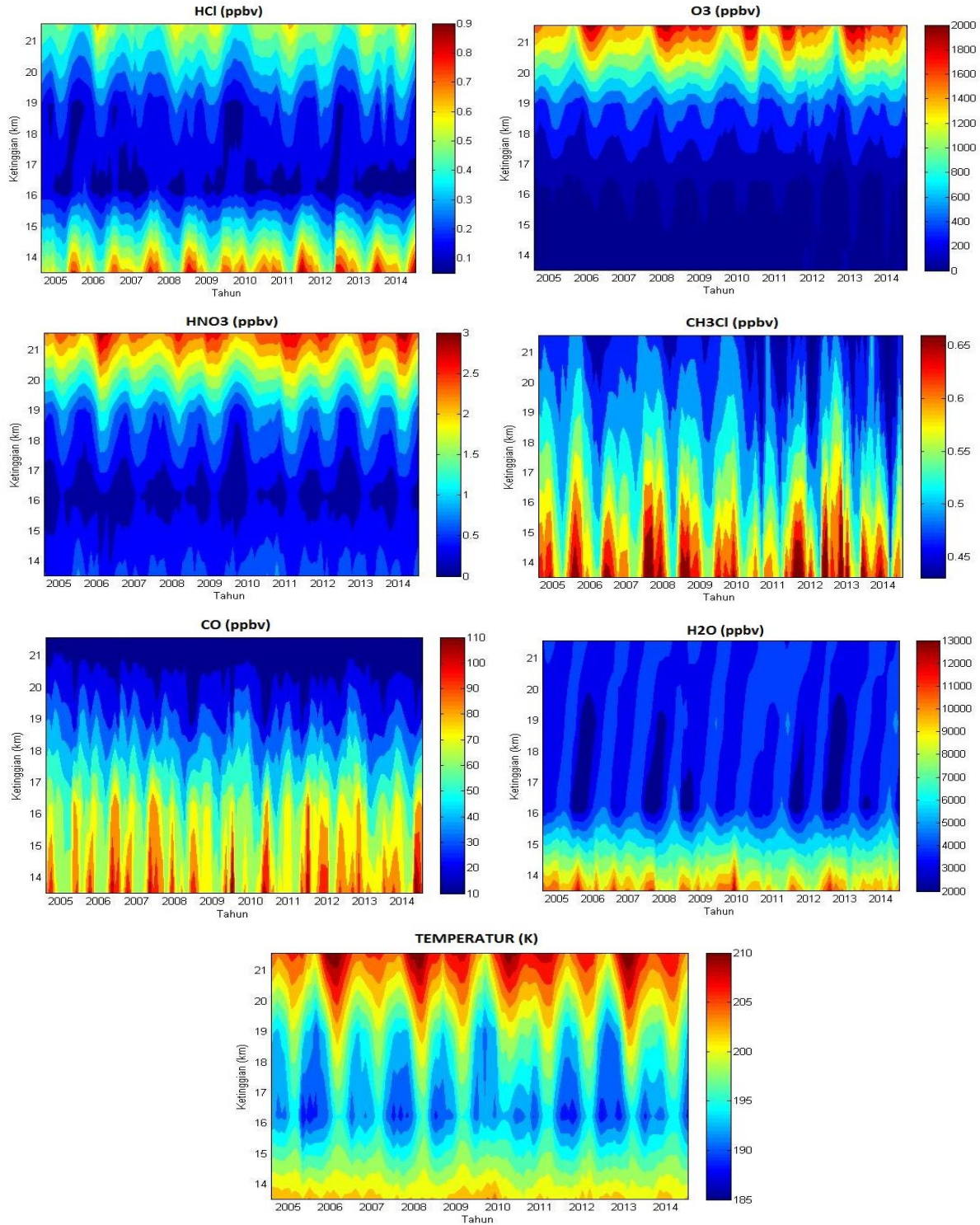
$CH_3Cl$ ,  $CO$ , dan  $H_2O$  sebagai *tropospheric tracer* dimana sumber di troposfer yang menghasilkan senyawa tersebut lebih dominan dibandingkan reaksi fotokimia yang terjadi di stratosfer bawah, sedangkan di TTL sebagai lapisan transisi sehingga variasi senyawa-senyawa tersebut dipengaruhi oleh konsentrasi di troposfer dan stratosfer.  $CO$  dan  $CH_3Cl$  di sekitar tropopause dikendalikan oleh beberapa proses di antaranya interaksi yang kompleks antara emisi di permukaan, konveksi, serta transport horizontal jarak jauh. Kedua senyawa ini merupakan penanda (*marker*) untuk kejadian polusi udara dari pembakaran biomassa yang dapat terangkat hingga ke lapisan troposfer atas-stratosfer bawah dengan cepat melalui proses konveksi atau proses lainnya (Santee et al., 2013).

Profil vertikal  $H_2O$  menunjukkan penurunan konsentrasi dari troposfer atas dan terlihat juga penurunan konsentrasi yang lebih besar terjadi di lapisan TTL pada ketinggian 16 km (Gambar 3-1). Penurunan jumlah  $H_2O$  di TTL disebabkan oleh mekanisme dehidrasi fisik. Saat udara troposfer yang membawa uap air mencapai TTL, terjadi proses dehidrasi akibat penurunan temperatur yang ekstrim di TTL (CPT) (Marcy et al., 2007; Koishi and Shiotani, 2012).

Plot *time series* terhadap ketinggian untuk *trace gases* di Indonesia di sekitar lapisan tropopause selama 10 tahun

pengamatan ditunjukkan pada Gambar 3-2. Seperti pola yang ditunjukkan pada Gambar 3-1 yaitu adanya lapisan transisi yang terlihat jelas pada ketinggian 16-17 km untuk senyawa HCl, O<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O,

dan temperatur sedangkan untuk senyawa CH<sub>3</sub>Cl dan CO adanya penurunan konsentrasi yang sangat kecil yaitu sekitar 0,1 ppbv untuk CH<sub>3</sub>Cl dan 20 ppbv untuk CO terjadi pada ketinggian 16 km.

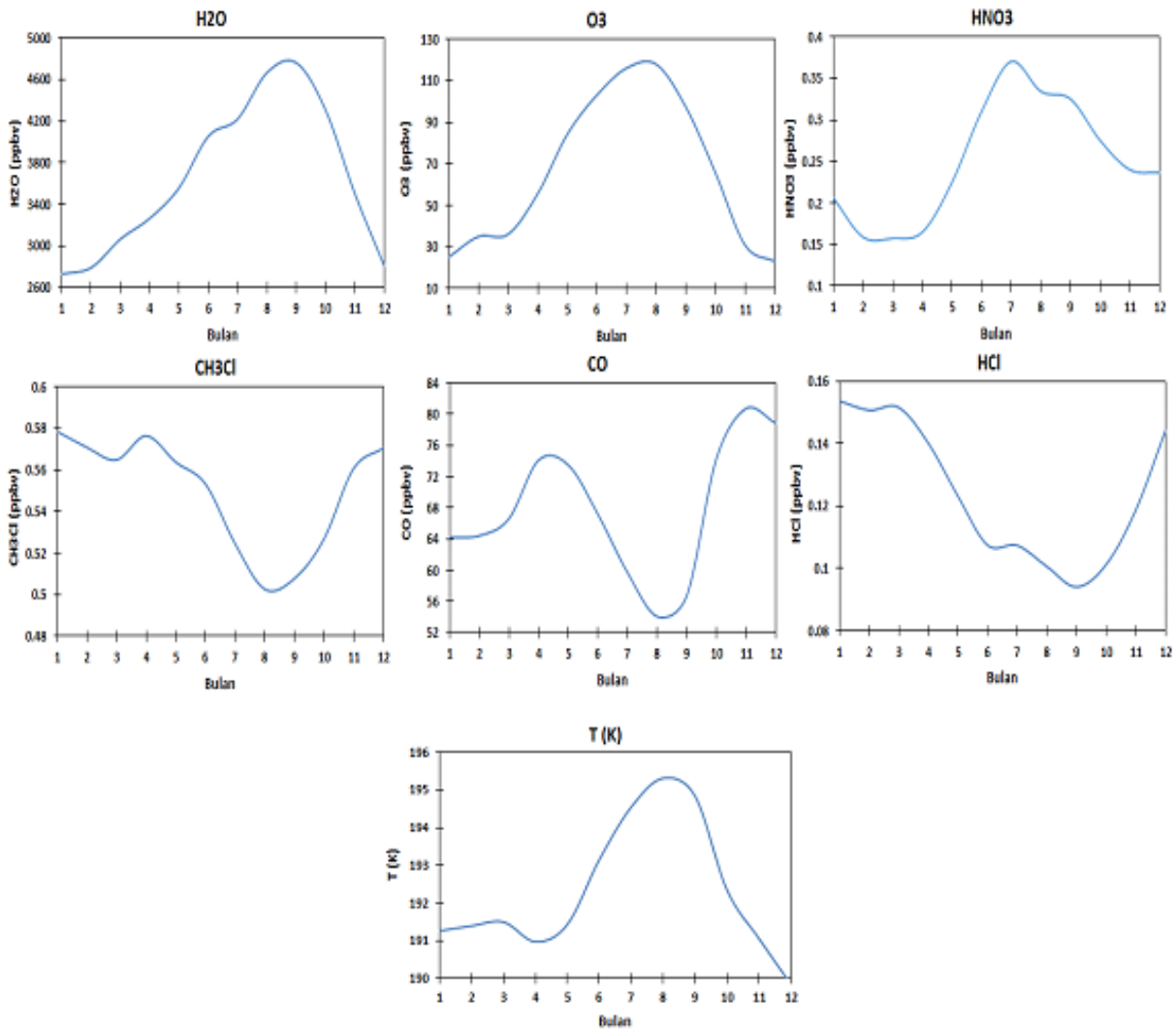


Gambar 3-2: Plot time series-ketinggian trace gases di lapisan Upper Toposphere Lower Stratosphere (UTLS) atau sekitar TTL di Indonesia tahun 2005-2014

Dari Gambar 3-2 juga dapat terlihat adanya variasi antar tahunan untuk senyawa-senyawa tersebut. Kehadiran senyawa-senyawa ini di TTL sangat dipengaruhi oleh transport dari sumber antropogenik di troposfer melalui proses konveksi serta adanya pencampuran dengan udara dari stratosfer (Livesey et al., 2008). *Time series* H<sub>2</sub>O menunjukkan adanya anomali penurunan konsentrasi H<sub>2</sub>O pada ketinggian sekitar 16 km atau pada lapisan TTL pada akhir tahun 2005, 2007, 2008, 2011, dan 2012 yang sejalan dengan pola penurunan temperatur pada ketinggian dan waktu yang sama.

Hal ini diperkirakan karena temperatur yang dingin pada lapisan TTL sehingga jumlah uap air yang dapat mencapai TTL menurun atau disebut juga dengan istilah dehidrasi di TTL seperti yang telah dijelaskan sebelumnya (Koishi and Shiotani, 2012).

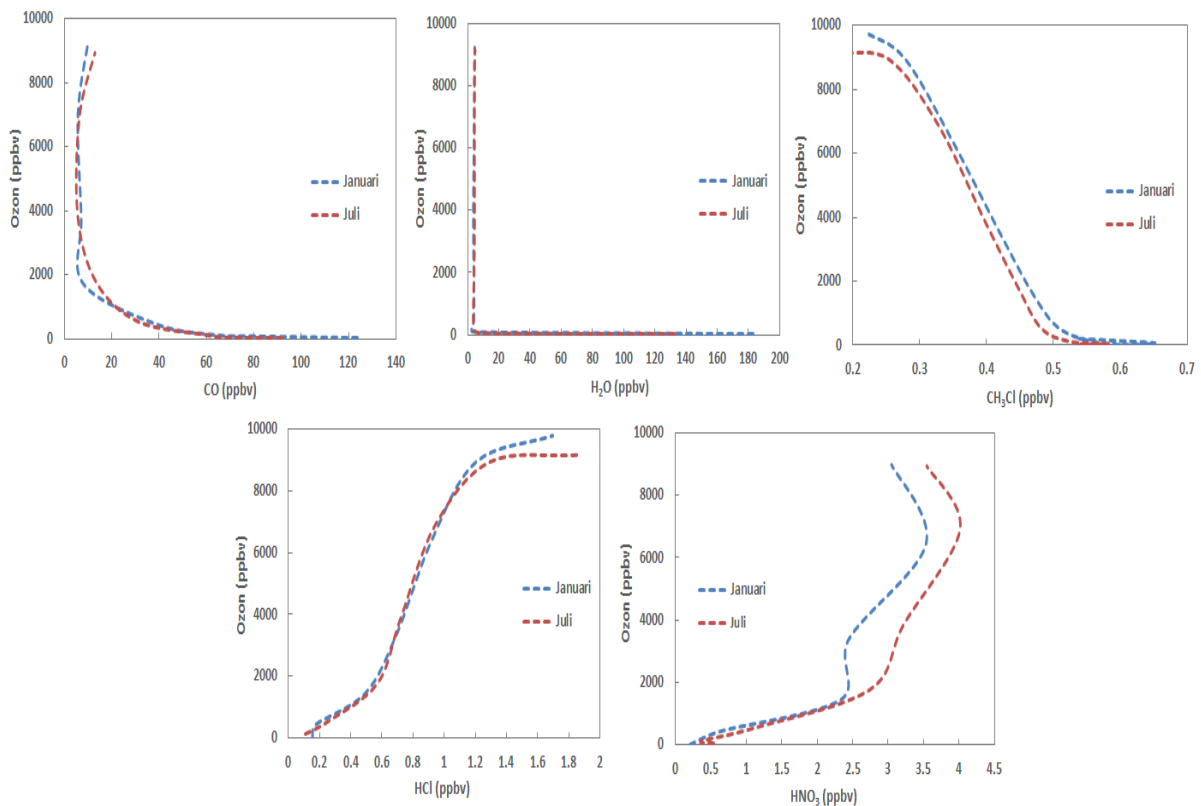
Variasi rata-rata bulanan *trace gases* di lapisan tropopause Indonesia (ketinggian 17 km atau pada tekanan 100 hPa) di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 3-3. Variasi bulanan masing-masing senyawa di lapisan TTL menunjukkan karakter yang berbeda.



Gambar 3-3: Variasi bulanan rata-rata *trace gases* dan temperatur di lapisan TTL pada tekanan 100 hPa di Indonesia tahun 2005-2014

Tampak pada Gambar 3-3 untuk ozon, H<sub>2</sub>O, dan HNO<sub>3</sub> di lapisan TTL menunjukkan pola tahunan yang sama yaitu mencapai maksimum pada sekitar bulan Juli-Agustus. Begitu juga dengan temperatur. Hal yang berlawanan terjadi pada senyawa CH<sub>3</sub>Cl, CO, dan HCl. Ketiga senyawa tersebut justru mencapai minimum pada sekitar bulan Agustus-September dan mengalami dua nilai maksimum yaitu pada sekitar bulan Maret-April dan Oktober-November-Desember. Perbedaan pola ini diperkirakan dipengaruhi oleh banyak faktor di antaranya adalah variasi temperatur di tropopause, sumber senyawa-senyawa tersebut di troposfer, proses *upwelling* dan sirkulasi Brewer-Dobson, kopling antara sirkulasi vertikal dan aliran konvektif, dan pencampuran udara antara stratosfer-troposfer (Ploeger et al., 2012; Stolarski et al., 2014).

*Scatter plot* antara *trace gases* dengan ozon sebagai *stratospheric tracer* karena sifatnya yang dominan berada di lapisan stratosfer, pada ketinggian troposfer atas (UT)-stratosfer bawah (LS) yaitu pada ketinggian sekitar 10 km hingga 20 km ditunjukkan pada Gambar 3-4 untuk Januari dan Juli. *Scatter plot* ini dibuat untuk mengetahui terjadinya pencampuran udara di sekitar UT/LS. *Plot tracer-tracer* umum digunakan untuk mempelajari adanya transisi karakter senyawa kimia dari troposfer ke stratosfer salah satunya dengan plot *tracer-tracer* di stratosfer seperti yang dilakukan Jurkat et al. (2014). Beberapa studi menggunakan CO sebagai penanda (*tracer*) di troposfer dan ozon sebagai penanda di stratosfer (Marcy et al., 2007). Pada penelitian ini dibuat plot *tracer-tracer* di troposfer-stratosfer seperti CO-O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O-O<sub>3</sub>, dan CH<sub>3</sub>Cl-O<sub>3</sub> juga *tracer-tracer* stratosfer seperti HCl-O<sub>3</sub> dan HNO<sub>3</sub>-O<sub>3</sub>.



Gambar 3-4: *Scatter plot trace gases* (CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, dan HNO<sub>3</sub>) terhadap ozon pada ketinggian di troposfer atas (10 km) hingga stratosfer bawah (20 km) untuk bulan Januari dan Juli 2005-2014



Pendekatan *plot* korelasi ini menunjukkan adanya pencampuran udara troposfer-stratosfer di TTL, bila *plot* membentuk suatu *smooth line* atau huruf “L” yang tidak tegas dan sebaliknya. *Scatter plot* tersebut dapat juga dilihat sebagai profil vertikal konsentrasi *tracer* troposfer-stratosfer dari ketinggian 10 km hingga 20 km yang mencakup tropopause. *Scatter plot* berbentuk huruf “L” yang tegas menunjukkan perubahan nilai konsentrasi *trace gases* yang signifikan dari troposfer atas ke stratosfer bawah yang juga menunjukkan tidak adanya pencampuran udara dari troposfer-stratosfer. *Tracer* yang ada di troposfer tidak mengalami transport ke stratosfer sehingga huruf “L” yang tegas menggambarkan karakter *tracer* troposfer tetap di troposfer dan karakter *tracer* di stratosfer sebagai *tracer* yang memang dihasilkan di stratosfer. *Scatter plot tropospheric tracer-stratospheric tracer* ini dapat menggambarkan adanya pencampuran udara vertikal dan perubahan karakteristik senyawa kimia di troposfer yang mengalami transport ke stratosfer melalui lapisan TTL sehingga memiliki karakteristik senyawa stratosfer setelah senyawa tersebut berada di stratosfer (Marcy et al., 2007; Marecal et al., 2011). Hal ini tampak jelas pada *plot* CO-O<sub>3</sub> di TTL Indonesia seperti yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Ambarsari dan Komala, 2014). Hal yang

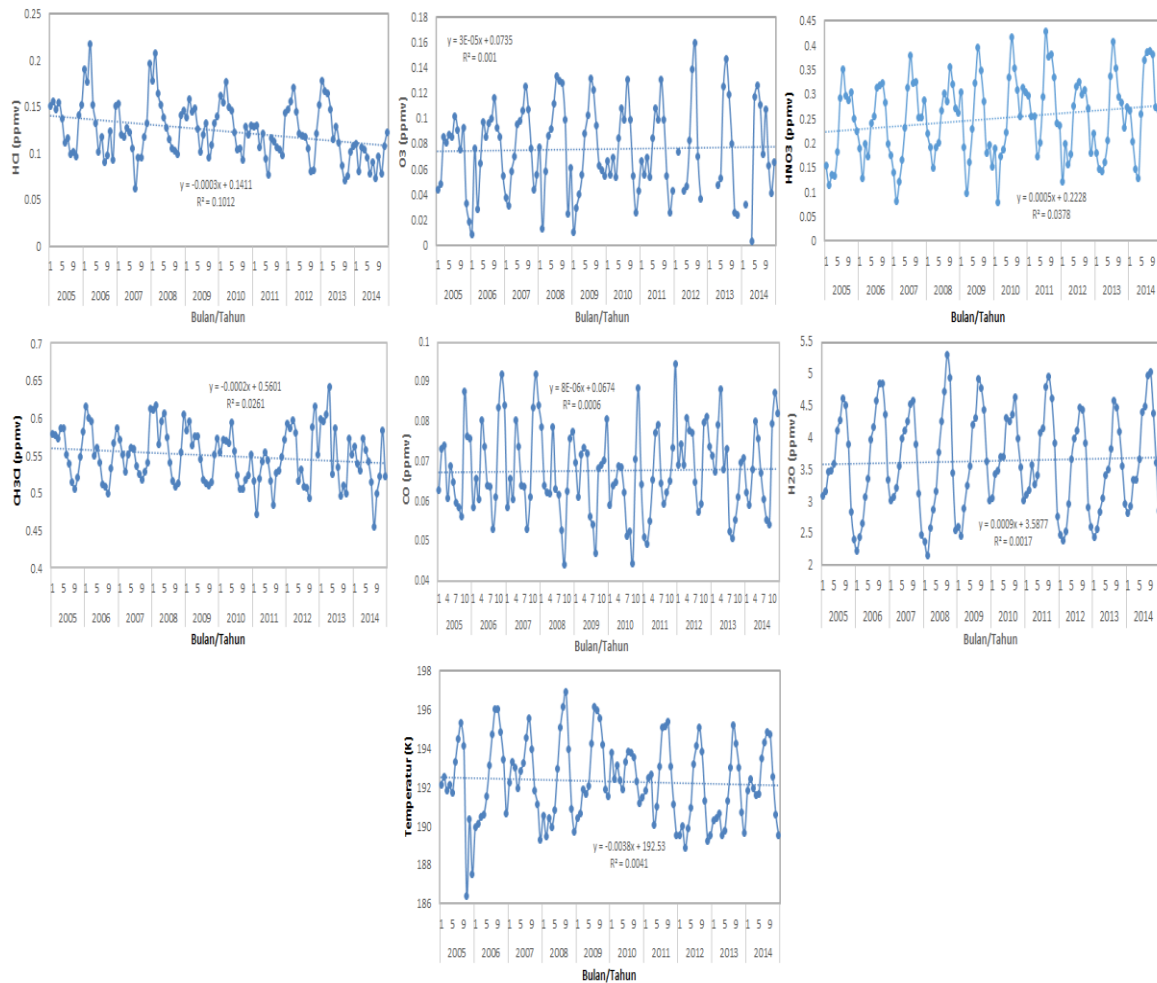
mirip tampak pada *plot* CH<sub>3</sub>Cl-O<sub>3</sub>, HCl-O<sub>3</sub> dan HNO<sub>3</sub>-O<sub>3</sub> (kecuali H<sub>2</sub>O-O<sub>3</sub>, tampak grafik berbentuk huruf “L” tegas) yang menunjukkan adanya pencampuran udara troposfer-stratosfer juga stratosfer-troposfer di lapisan UT/LS di Indonesia.

Walaupun lapisan-lapisan lain di atmosfer memungkinkan untuk terjadi pencampuran senyawa kimia, tetapi karena TTL menjadi jalur utama masuknya senyawa-senyawa kimia dan aerosol yang bersumber sangat besar di troposfer ke stratosfer melalui proses konveksi, maka pencampuran di lapisan TTL menentukan variasi komposisi kimia di lapisan atmosfer lainnya yang lebih tinggi (Marecal et al., 2011).

Perubahan konsentrasi *trace gases* di TTL Indonesia pada tekanan 100 hPa ditunjukkan melalui *trend* masing-masing *trace gases* dan temperatur pada Gambar 3-5. Beberapa parameter menunjukkan penurunan konsentrasi di TTL seperti HCl, CH<sub>3</sub>Cl, dan temperatur. Sedangkan parameter lainnya seperti ozon, CO, H<sub>2</sub>O, dan HNO<sub>3</sub> menunjukkan adanya *trend* peningkatan konsentrasi selama rentang pengukuran. Perubahan konsentrasi *trace gases* dan temperatur di TTL sangat kecil selama 10 tahun pengukuran yang ditampilkan pada Tabel 3-1. H<sub>2</sub>O menunjukkan peningkatan terbesar di TTL yaitu 0,108 ppmv sedangkan temperatur di tropopause mengalami penurunan cukup signifikan yaitu mencapai -0,456 K.

Tabel 3-1: PERUBAHAN KONSENTRASI TRACE GASES (CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, dan HNO<sub>3</sub>) DI LAPISAN TTL PADA TEKANAN 100 hPa DI INDONESIA TAHUN 2005-2014

Parameter	Persamaan garis	Perubahan konsentrasi (ppmv)/10 tahun
ozon	$y = 3E-05x + 0.0735$	0.0036
CO	$y = 8E-06x + 0.0674$	0.00096
CH <sub>3</sub> Cl	$y = -0.0002x + 0.5601$	-0.024
HCl	$y = -0.0003x + 0.1411$	-0.036
HNO <sub>3</sub>	$y = 0.0005x + 0.2228$	0.06
H <sub>2</sub> O	$y = 0.0009x + 3.5877$	0.108
T	$y = -0.0038x + 192.53$	-0.456



Gambar 3-5: *Trend trace gases (CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, dan HNO<sub>3</sub>) di lapisan TTL pada tekanan 100 hPa di Indonesia tahun 2005-2014*

**KESIMPULAN**

Variasi *trace gases* di sekitar *tropopause* tropis di Indonesia menunjukkan dengan jelas adanya lapisan transisi dari pola profil vertikal bulanan rata-rata selama 10 tahun pada ketinggian sekitar 16-17 km yang diidentifikasi sebagai lapisan *tropopause* di Indonesia. HCl, O<sub>3</sub>, dan HNO<sub>3</sub> yang bersifat sebagai *stratospheric tracer* menunjukkan peningkatan konsentrasi di atas TTL, sedangkan CH<sub>3</sub>Cl, CO, dan H<sub>2</sub>O yang bersifat sebagai *tropospheric tracer* menunjukkan penurunan konsentrasi di atas TTL. Profil vertikal-*time series* selama 10 tahun juga menunjukkan adanya pola tahunan dan antar tahunan yang spesifik untuk masing-masing senyawa di lapisan TTL.

Perbedaan pola variasi bulanan di lapisan TTL menunjukkan karakteristik yang berlawanan antara *tropospheric tracer* dan *stratospheric tracer*. *Scatter plot* hubungan gas dengan sifat *tropospheric tracer-stratospheric tracer* di lapisan troposfer, TTL, dan stratosfer menunjukkan adanya pencampuran udara dari stratosfer bawah dan troposfer atas di sekitar lapisan *tropopause* tropis di Indonesia. Perubahan konsentrasi *trace gases* di TTL Indonesia selama 10 tahun sangat kecil. Beberapa parameter menunjukkan peningkatan konsentrasi seperti H<sub>2</sub>O yang meningkat paling signifikan yaitu sebesar 0,108 ppmv, sedangkan temperatur menunjukkan penurunan yang paling signifikan yaitu sebesar -0,456 K.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada penyedia data komposisi kimia atmosfer hasil pengukuran satelit Aqua dan Aura milik NASA yang dapat diakses dengan mudah melalui fasilitas website MIRADOR maupun GIOVANNI.

## DAFTAR RUJUKAN

- Abalos, M., W.J. Randels, D. E. Kinnison, and E. Serrano, 2013. *Quantifying Tracer Transport in the Tropical Lower Stratosphere using WACCM*, Atmos. Chem. Phys., 13, 10591-10607, doi: 10.5194/acp-13-10591-2013.
- Ahmad, S. P., J. W. Waters, J. E. Johnson, I. V. Gerasimov, G. G. Leptoukh, and S. J. Kempler, 2006. *Atmospheric Composition Data Products from the EOS Aura MLS*, Proc. Amer. Meteorological Soc. Eighth Conf. on Atmospheric Chemistry, Atlanta, Georgia, 2006 Jan 28 - Feb 3.
- Ambarsari N., dan N. Komala, 2010. *Karakteristik Profil Vertikal Ozon, CO, Uap Air, dan Temperatur di Bandung dan Watukosek Berbasis Sensor MLS Satelit Aura*, Prosiding Seminar Penerbangan dan Antariksa 2010: Sub Seminar Sains Atmosfer dan Iklim. Serpong 15 Nopember 2010.
- Ambarsari N., dan N. Komala, 2014. *Profil Vertikal Ozon dan CO pada Lapisan Tropopause Tropikal di Indonesia Hasil Observasi MLS/AURA*, Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer dan Antariksa 2014. Bandung 25 November 2014.
- Fueglistaler, S., A. E. Dessler, T. J. Dunkerton, I. Folkins, Q. Fu, and P. W. Mote, 2009. *Tropical Tropopause Layer*, Reviews of Geophysics, 47, RG1004, 1-31.
- Henz, D., 2010. *A Modelling Study of the Tropical Tropopause Layer*, Thesis University of Wisconsin-Madison.
- Jurkat, T., C. Voigt, S. Kaufmann, A. Zahn, M. Sprenger, P. Hoor, H. Bozem, S. Muller, A. Dornbrack, H. Schlager, H. Bonisch, and A. Engel, 2014. *A Quantitative Analysis of Stratospheric HCl, HNO<sub>3</sub>, and O<sub>3</sub> in the Tropopause Region Near the Subtropical Jet*, Geophys. Res. Lett., 41, 3315-3321, doi: 10.1002/2013GL059159.
- Kim, S., L. G. Huey, R. E. Stickel, R. B. Pierce, G. Chen, M. A. Avery, J. E. Dibb, G. S. Diskin, G. W. Sachse, C. S. McNaughton, A. D. Clarke, B. E. Anderson, and D. R. Blake, 2008. *Airborne Measurement of HCl from the Marine Boundary Layer to the Lower Stratosphere Over the North Pacific Ocean during INTEX-B*, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 8, 3563-3595.
- Koishi, K., and M. Shiotani, 2012. *Water Vapour and Ozone Variations in the Tropical Tropopause Layer during the Central Equatorial Pacific Experiment Campaign*, Journal of the Meteorological Society of Japan, 90(3), 403-416.
- Komala, N., N. Ambarsari, dan D. Y. Risdianto, 2013. *Analisis Profil Ozon Mixing Ratio dan Suhu di Sumatera berbasis data MLS dan insitu*, Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer-Antariksa. Serpong 22 Nopember 2011.
- Konopka, P., J. U. Groob, G. Gunther, F. Ploeger, R. Pommrich, and N. Livesey, 2010. *Annual Cycle of Ozone at and Above the Tropical Tropopause: Observations Versus Simulation with the Chemical Langrangian Model of the Stratosphere (CLaMS)*, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 10, 121-132.
- Liu, J., J. A. Logan, D. B. A. Jones, N. J. Livesey, I. Magretskaja, C. Carouge, and P. Nedelec, 2010. *Analysis of CO in the Tropical Troposphere using AURA Satellite Data and Geos-Chem Model: Insight into Transport Characteristics of the Geos Meteorological Products*, Atmos. Chem. Phys., 10, 12207-12232.
- Livesey, N. J., M. J. Filipiak, L. Froidevaux, W. G. Read, A. Lambert, M. L. Santee, J. H. Jiang, H. C. Pumphrey, J. W. Waters, and R. E. Cofield, 2008. *Validation of Aura Microwave Limb Sounder O<sub>3</sub> and CO observation in the Upper Troposphere*

- and Lower Stratosphere, *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-15.
- Marcy, T.P., P. J. Popp, R. S. Gao, D. W. Fahey, and E. A. Ray, 2007. *Measurement of Trace Gases in The Tropical Tropopause Layer*, *Atmospheric Environment*, 41, 7253-7261.
- Marecal, V., G. Krysztofiak, Y. Mebarki, V. Catoire, and F. Lott, 2011. *Impact of Deep Convection on the Tropical Tropopause Layer Composition in Equatorial Brazil*, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 16147-16183.
- Mebarki, Y., V. Catoire, N. Huret, G. Berthet, C. Robert, and G. Poulet, 2010. *More Evidence for Very Short Lived Substance Contribution to Stratospheric Chlorine inferred from HCl Balloon-Borne in situ Measurement in the Tropics*, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 397-409.
- Microwave Limb Sounder, <http://mls.jpl.nasa.gov/index-eos-mls.php>.
- MIRADOR, [www.mirador.gsfc.nasa.gov](http://www.mirador.gsfc.nasa.gov).
- Ploeger, F., P. Konopka, P. Muller, S. Fueglistaler, T. Schmidt, J.C. Manners, J. U. Groob, G. Gunther, P. M. Forster, and M. Riese, 2012. *Horizontal Transport Affecting Trace Gas Seasonality in the Tropical Tropopause Layer*, *Journal of Geophysical Research Letter*, 17, 1-16.
- Ploeger, F., S. Fueglistaler, J. U. Groob, G. Gunther, P. Konopka, Y. S. Liu, R. Muller, F. Ravegnani, C. Schiller, A. Ulanovski, and M. Riese, 2011. *Insight from Ozone and Water Vapour on Transport in the Tropical Tropopause Layer (TTL)*, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 407-409.
- Qian, L., S. Hua-Feng, S. Ai-Mei, B. Jian-Chun, and L. Da-Ren, 2014. *Distribution and Variation of Carbon Monoxide in the Tropical Troposphere and Lower Stratosphere*, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(3), 218-223.
- Santee, M. L., N. J. Livesey, G. L. Manney, A. Lambert, and W. G. Read, 2013. *Methyl Chloride from the Aura Microwave Limb Sounder: First Global Climatology and Assessment of Variability in the Upper Troposphere and Stratosphere*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 13532-13560.
- Stolarski, R. S., D. W. Waugh, L. Wang, L. D. Oman, A. R. Douglass, and P. A. Newman, 2014. *Seasonal Variation of Ozone in the Tropical Lower Stratosphere: Southern Tropics are Different from Northern Tropics*, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 119, doi:10.1002/2013JD 021294.
- Tuck, A. F., D. J. Donaldson, M. H. Hitchman, E. C. Richard, H. Tervahattu, V. Vaida, and J. C. Wilson, 2008. *On Geoengineering with Sulphate Aerosols in the Tropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere*, *Climatic Change*, 90, 315-331.
- Vomel, H., J. E. Barnes, R. N. Forno, M. Fujiwara, F. Hasebe, S. Iwasaki, R. Kivi, N. Komala, E. Kyro, T. Leblanc, B. Morel, S. Y. Ogino, W. G. Read, S. Ryan, S. Saraspriya, H. El Kirk, M. Shiotani, J. V. Canossa, and D. N. Whiteman, 2007. *Validation of Aura Microwave Limb Sounder Water Vapour by Balloon Borne Cryogenic Frost point Hygrometer Measurement*, *J. Geophys. Res.*, 112.
- Waters J.W., L. Froidevaux, and R. S. Harwood, 2006. *The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on The Aura Satellite*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, No. 5.
- Yan, X., S. J. Wright, X. Zheng, J. N. Livesey, H. Vomel, and X. Zhou, 2016. *Validation of Aura MLS Retrievals of Temperature, Water Vapour, and Ozone in the Upper Troposphere and Lower-Middle Stratosphere Over Tibetan Plateau During Boreal Summer*, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3547-3556.

# **ANALISIS PENGARUH PENETRASI MEDAN LISTRIK LINTANG TINGGI KE LINTANG RENDAH TERHADAP IONOSFER SAAT BADAI GEOMAGNET**

## **(ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD PENETRATION EFFECT FROM HIGH TO LOW LATITUDES ON THE IONOSPHERE DURING GEOMAGNETIC STORM)**

**Anwar Santoso\*, Dadang Nurmali, Mira Juangsih, Iyus Edi Rusnadi, Sri Ekawati, Anton Winarko, Siska Filawati**

Pusat Sains Antariksa LAPAN

Jln. DR. Djundjuran 133 Bandung

\*Email: anwar.santoso@lapan.go.id

Diterima 23 Juni 2016; Direvisi 12 Desember 2017; Disetujui 15 Desember 2017

### **ABSTRACT**

The influence of geomagnetic storms on the ionosphere in the equatorial and low latitudes can be either rising or falling value of the value foF2 with the different response delay time. The difference in response is one of them allegedly influenced by the modification of Equatorial Electrojet (EEJ) generated by the penetration of high latitude electric field towards the low latitude electric field and the equator. Therefore, this paper analyzes the influence of the high latitude penetration of electric current to the low latitude electric current towards the ionosphere response to Indonesia's current geomagnetic storms using the data foF2 BPAA Sumedang (SMD; 6,91<sup>o</sup> S; 106,83<sup>o</sup>E geographic coordinates or 16,55<sup>o</sup> S; 179,95<sup>o</sup> E magnetic coordinates) and data from the Biak geomagnetic field station (BIK; 1,08<sup>o</sup> S; 136,05<sup>o</sup> E geographic coordinates or 9,73<sup>o</sup> S; 207,39<sup>o</sup> E magnetic coordinates) in 2000-2001. The result showed that the injection of the electric field of the high latitudes to lower latitudes causing foF2 BPAA Sumedang to be disturbed. Onset of the foF2 disturbance in BPAA Sumedang started coincide with EEJ(HBIK-HDRW) and reached its minimum point with a time delay between 0 to 4 hours before and after Dst index reached the minimum point. For a delay time of 0 to 4 hours after the Dst index reached the minimum point, the results were in accordance with the research results from the prior research. However, for the time difference of between 0 to 4 hours before the Dst index reached the minimum point, the results differ from their results.

Keywords: *geomagnetic storms, ionosphere in the equatorial, equatorial electrojet (EEJ)*

## ABSTRAK

Pengaruh badai geomagnet terhadap ionosfer di ekuator dan lintang rendah berupa naiknya nilai foF2 atau turunnya nilai foF2 dengan waktu tunda respon berbeda-beda. Perbedaan respon tersebut salah satunya diduga dipengaruhi oleh modifikasi *Equatorial electrojet* (EEJ) yang dihasilkan oleh penetrasi medan listrik lintang tinggi sampai daerah lintang rendah dan ekuator. Oleh karena itu, dalam makalah ini dilakukan analisis pengaruh penetrasi arus listrik lintang tinggi ke lintang rendah terhadap ionosfer saat badai geomagnet menggunakan data foF2 dari Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) Sumedang (SMD; 6,91° LS; 106,83° BT koordinat geografis atau 16,55° LS; 179,95° BT koordinat magnet) dan data medan geomagnet dari stasiun Biak (BIK; 1,08° LS; 136,05° BT koordinat geografis atau 9,73° LS; 207,39° BT koordinat magnet) tahun 2000-2001. Hasilnya diperoleh bahwa penetrasi medan listrik dari lintang tinggi ke lintang lebih rendah Indonesia menyebabkan foF2 BPAA Sumedang terganggu. Onset gangguan foF2 BPAA Sumedang mulai terjadi bertepatan dengan EEJ(HBIK-HDRW) mencapai titik minimumnya dengan jeda waktu antara 0 sampai 4 jam sebelum dan sesudah indeks Dst mencapai minimum. Untuk beda waktu 0 sampai 4 jam sesudah indeks Dst mencapai minimum, hasilnya bersesuaian dengan hasil penelitian peneliti sebelumnya. Namun, untuk beda waktu 0 sampai 4 jam sebelum indeks Dst mencapai minimum, hasilnya merupakan temuan berbeda dari hasil mereka.

Kata Kunci: *badai geomagnet, ionosfer ekuator, elektrojet ekuator*

## 1 PENDAHULUAN

Dalam sistem cuaca antariksa, Matahari merupakan sumber penggerak utama cuaca antariksa. Salah satu fenomena di Matahari yang menjadi sumber penggerak cuaca antariksa adalah *Coronal Mass Ejection* (CME) atau dinamakan juga peristiwa pelepasan plasma dan medan magnet yang signifikan dari korona Matahari. Ketika terjadi CME, partikel-partikel dan medan magnet dilontarkan ke antariksa. Partikel-partikel tersebut terbawa serta oleh angin surya. Angin surya yang menuju Bumi akan bertumbukan dengan magnetosfer (biasanya dinamakan *interplanetary shock*, IPS). Dalam tumbukan ini akan terjadi injeksi energi medan listrik melalui mekanisme rekoneksi. Energi tersebut akan menyebabkan pertumbuhan arus cincin di sekitar Bumi. Pertumbuhan arus cincin akibat masuknya energi medan listrik gabungan (*merger*) memicu gangguan medan magnet Bumi dengan skala global (Gopalswamy, 2009).

Respon ionosfer terhadap badai geomagnet tidak terjadi secara langsung melainkan melalui proses kopling magnetosfer-ionosfer. Selama badai geomagnet, energi magnetosfer yang

masuk ke dalam atmosfer atas kutub Bumi dapat memodifikasi proses-proses kimia dan elektrodinamika sistem ionosfer-termosfer (I-T) secara signifikan. Konsekuensinya, gangguan densitas elektron ionosfer dan *total electron content* (TEC) teramati sepanjang badai geomagnet (Mannucci et al., 2005). Pengaruh badai geomagnet terhadap ionosfer di ekuator dan lintang rendah berupa naiknya nilai foF2 atau turunnya nilai foF2 dengan waktu tunda respon berbeda-beda. Beberapa hasil penelitian sebelumnya (Abdu et al., 1991; Yatini et al., 2009; Mukherje et al., 2010; Lusiani et al., 2011) telah melaporkan bahwa semakin kuat badai geomagnet, semakin cepat respon dari ionosfer untuk terjadinya badai geomagnet. Badai ionosfer dapat terjadi dalam selang waktu satu sampai 4 jam setelah kejadian badai geomagnet kuat. Badai geomagnet menengah mengakibatkan badai ionosfer dalam selang waktu satu sampai 10 jam setelah badai geomagnet tersebut. Sedangkan badai geomagnet lemah mengakibatkan badai ionosfer yang terjadi dalam selang waktu lebih dari 10 jam setelah badai geomagnet menengah tersebut. Perbedaan respon diduga

dipengaruhi oleh modifikasi pada *Equatorial Ionization Anomaly* (EIA), *Equatorial Spread-F* (ESF), dan *Equatorial electrojet* (EEJ) yang diproduksi oleh : (1) gangguan medan listrik yang dihasilkan dari penetrasi medan listrik lintang tinggi menuju ekuator dengan cepat, (2) gangguan dinamo yang digerakkan oleh peningkatan sirkulasi termosfer global yang dihasilkan dari masuknya energi pada lintang tinggi, dan (3) gangguan angin (zonal dan meridional) yang memodifikasi dinamika termosfer ekuator. Di bawah pengaruh penetrasi yang cepat medan listrik dan gangguan medan listrik dinamo, *Equatorial Ionization Anomaly* (EIA) dapat mengalami modifikasi drastis yang menghasilkan gangguan ionosfer besar di lintang rendah (Abdu et al., 1991; Abdu, 1997; Abdu, 2001; Mukherjee et al., 2010)

Dari gambaran di atas maka dalam makalah ini dilakukan analisis pengaruh penetrasi arus listrik lintang tinggi ke lintang rendah terhadap ionosfer Indonesia menggunakan data ionosfer dari Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) Sumedang (SMD; 6,91° LS; 106,83° BT koordinat geografis atau 16,55° LS; 179,95° BT koordinat magnet) dan data medan geomagnet dari stasiun Biak (BIK; 1,08° LS; 136,05° BT koordinat geografis atau 9,73° LS; 207,39° BT koordinat magnet) tahun 2000-2001 (puncak siklus Matahari ke-23).

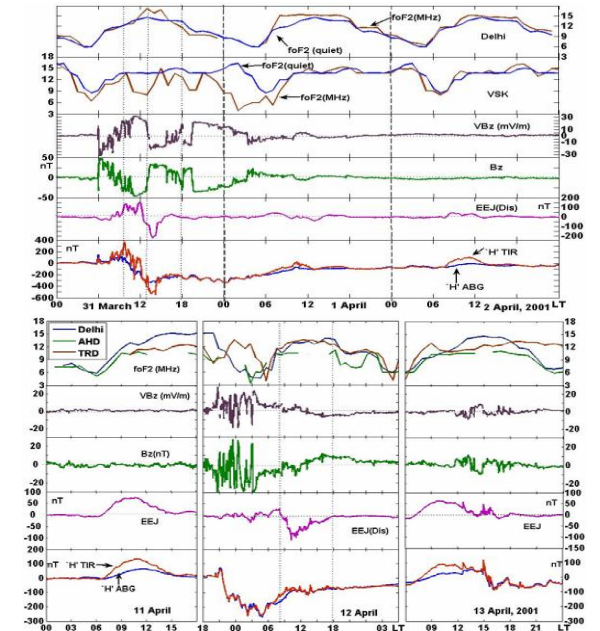
Adapun tujuan penelitian ini adalah mengetahui respon lapisan ionosfer di atas BPAA Sumedang (berdasarkan foF2) terhadap penetrasi medan listrik pada saat badai geomagnet.

## 2 DATA DAN METODOLOGI

### 2.1 Data

Data yang diolah adalah indeks Dst, *Interplanetary magnetic field* arah utara-selatan (IMF Bz), komponen kecepatan angin surya (Vsw), foF2 ionosfer dari Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) Sumedang (SMD) (6,91° LS; 106,83° BT koordinat geografis atau 16,55° LS; 179,95° BT koordinat magnet) dan medan geomagnet stasiun Biak (BIK) (1,08° LS; 136,05° BT koordinat geografis atau 9,73° LS; 207,39° BT koordinat magnet). Alasan ilmiah menggunakan data geomagnet dari

stasiun Biak sementara data foF2 ionosfernya dari BPAA Sumedang (berbeda jarak > 3000 km) adalah penulis berasumsi bahwa efek penetrasi medan listrik dari lintang tinggi ke rendah untuk area (regional) lintang Indonesia akan dirasakan hampir sama (Veenadhari dan Alex (2006).



Gambar 2-1: (atas) Variasi foF2 Delhi (19,02° LU) dan Vishakapatnam (VSK, 7,95° LU), medan listrik konveksi (-VBz), Bz IMF, EEJ dan komponen H medan geomagnet stasiun Tirunelveli dan Alibag saat badai geomagnet tanggal 31 Maret 2001, dan (bawah) saat badai geomagnet tanggal 11 April 2001.

Dalam penelitiannya, mereka menggunakan data data magnet dari stasiun Tirunelveli (0,03° LU; 150,40° BT Koordinat Geomagnet) dan Alibag (10,36° LU; 146,54° BT Koordinat Geomagnet) untuk mendapatkan EEJ. Sementara itu, untuk melihat efeknya digunakan data foF2 dari stasiun Visakhatpatnam (8,56° LU; 156,49° BT Koordinat Geomagnet) dan Delhi (19,2° LU; 150,2° BT Koordinat Geomagnet, dip 42,4°), seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1.

Selain itu, digunakan data lain sebagai pendukung yakni medan geomagnet dari stasiun Wewak (WEW) (3,55° LS; 143,63° BT koordinat geografis atau 12,12° LS; 215,55° BT koordinat magnet) dan stasiun Darwin (DAW) (12,40° LS; 130,90° BT koordinat geografis atau 22,06° LS; 202,78° BT

koordinat magnet). Periode pengamatan data yang diolah adalah tahun 2000-2001. Adapun tingkatan kuat badai geomagnet (melalui indeks Dst) dapat dikelompokkan menjadi 5 level aktivitas geomagnet (Kumar et al., 2010; Adekoya et al., 2012).

Untuk mempermudah analisis, maka dipilih puncak siklus aktifitas Matahari ke-23 (2000-2001) dengan jumlah kejadian badai geomagnet cukup banyak dan berintensitas kuat ( $Dst < -150$  nT), sehingga diharapkan deviasi foF2 ionosfer terhadap mediannya sebagai respon terhadap badai geomagnet akan jelas terlihat. Identifikasi kejadian badai geomagnet menggunakan kriteria indeks Dst dengan nilai  $Dst < -150$  nT sepanjang tahun 2000-2001 diperoleh 13 kejadian badai geomagnet. Dari 13 kejadian badai geomagnet tersebut, hanya 6 kejadian badai geomagnet yang terpilih untuk bahan analisis, seperti ditampilkan pada Tabel 2-1.

## 2.2 Metodologi

Berdasarkan kejadian badai geomagnet pada Tabel 2-1 tersebut kemudian dihitung variasi gangguan komponen H di stasiun Biak, Wewak dan Darwin menggunakan formulasi (2-1).

$$\Delta H(t_0) = H(t) - H_{Sq}(t) \quad (2-1)$$

Dengan,  $\Delta H(t)$  adalah gangguan medan geomagnet dari Matahari,  $H(t)$  adalah nilai variasi medan geomagnet yang terukur alat dan  $H_{Sq}(t)$  adalah

medan geomagnet hari tenang yang dihitung menggunakan formulasi (2-2).

$$H_{Sq}(t) = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5}{5} \quad (2-2)$$

Dengan,  $H_1$  adalah medan geomagnet hari tenang pertama di bulan tersebut dan seterusnya yang tabelnya dapat diunduh di website <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>.

Selanjutnya ditentukan injeksi medan listrik dari lintang tinggi ke lintang rendah dengan menggunakan formulasi (Veenadhari dan Alex, 2006):

$$EEJ(H) = \Delta H_1 - \Delta H_2 \quad (2-3)$$

Dengan  $EEJ(H)$  merupakan interpretasi kekuatan medan listrik yang terinjeksi dari lintang tinggi ke lintang lebih rendah (nT). Pada makalah ini,  $EEJ(H)$  diasumsikan sama seperti  $EEJ$ . Namun, bila  $EEJ$  merupakan pengurangan komponen H stasiun di sekitar lintang  $\pm 30^\circ$  ekuator magnet dengan lintang lebih tinggi, maka  $EEJ(H)$  merupakan pengurangan komponen H lintang magnet rendah dengan lintang lebih tinggi lagi.  $\Delta H_1$  adalah komponen H medan geomagnet dari stasiun Biak (BIK), Indonesia dan  $\Delta H_2$  adalah komponen H medan geomagnet lintang lebih tinggi dari  $\Delta H_1$ . Dalam makalah ini yakni dari stasiun Wewak (WWK) dan Darwin (DRW), Australia.

Tabel 2-1: DAFTAR KEJADIAN BADAI GEOMAGNET (TERPILIH) DENGAN NILAI  $Dst < -150$  nT SEPANJANG TAHUN 2000-2001 YANG TERSEDIA DATA foF2 BPAA SUMEDANG DAN MEDAN GEOMAGNET BIAK

No	Tanggal	Intensitas	Waktu Puncak Badai Geomagnet	Kategori
1	07 Apr 2000	-288 nT	01.00 nT	Sangat Kuat
2	15 Jul 2000	-301 nT	24.00 UT	Super Badai
3	12 Agt 2000	-235 nT	10.00 UT	Sangat Kuat
4	06 Nov 2000	-159 nT	22.00 UT	Kuat
5	31 Mar 2001	-387 nT	09.00 UT	Super Badai
6	11 Apr 2001	-271 nT	24.00 UT	Sangat Kuat



Biak (BIK) (1,08° LS; 136,05° BT koordinat geografis atau 9,73° LS; 207,39° BT koordinat magnet); Wewak (WEW) (3,55° LS; 143,63° BT koordinat geografis atau 12,12° LS; 215,55° BT koordinat magnet) dan stasiun Darwin (DAW) (12,40° LS; 130,90° BT koordinat geografis atau 22,06° LS; 202,78° BT koordinat magnet) masih berada di sekitar sabuk jaringan magnetometer 210° MM (Yumoto and The 2100 MM *Magnetic Observation Group*, 1995). Jika nilai  $EEJ(H)$  yang diperoleh pada Persamaan (2-3) bernilai negatif berarti telah terjadi penetrasi medan listrik dari lintang tinggi ke lintang rendah atau mengindikasikan bahwa nilai medan geomagnet di lintang rendah (Indonesia) lebih besar dari lintang lebih tinggi (Australia). Hal sebaliknya terjadi jika  $EEJ(H)$ -nya bernilai positif. Nilai  $EEJ(H)$  tersebut kemudian diplot bersama dengan  $\Delta foF2$  ionosfer BPAA Sumedang ( $\Delta foF2_{SMD}$ ) dan  $Bz$  IMF serta  $Vsw$ . Formulasi untuk menghitung  $\Delta foF2$  Sumedang adalah:

$$\Delta foF2_{SMD} = foF2_{SMD} - foF2_{MedSMD} \quad (2-4)$$

Dengan,  $\Delta foF2_{SMD}$  bernilai negative, menginterpretasikan bahwa telah terjadi badai ionosfer negatif. Begitu juga sebaliknya.

Berikutnya dilakukan analisis terhadap hasil plotting tersebut menggunakan metode visual dan dengan metode statistik. Hasil analisis dirangkum untuk menjadi kesimpulan.

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3-1 menunjukkan pola data  $EEJ(HBIK-HDRW)$ ,  $EEJ(HBIK-HDRW)$  dan indeks Dst sebelum, saat dan setelah badai geomagnet terpilih dalam Tabel 2-1. Dari Gambar 3-1 tampak bahwa pada saat puncak badai geomagnet (Dst menuju ke titik minimum), pola  $EEJ(H)$  terutama  $EEJ(HBIK-HDRW)$  jelas terlihat mengikuti pola indeks Dst menuju titik

minimumnya. Nilai  $EEJ(HBIK-HDRW)$  negatif menginterpretasikan bahwa depresi medan geomagnetik di Biak lebih besar dari di Darwin. Hal ini mengindikasikan telah terjadi injeksi medan listrik dari lintang tinggi (Darwin, Australia) ke lintang rendah (Biak, Indonesia). Walaupun pola  $EEJ(HBIK-HDRW)$  mengikuti pola indeks Dst menuju titik minimumnya, namun, waktu titik minimum  $EEJ(HBIK-HDRW)$  terhadap waktu titik minimum indeks Dst tidak terjadi bersamaan atau dengan kata lain berbeda waktu terjadinya.

Dari enam kejadian badai geomagnet, dua diantaranya dengan sebelum, saat dan setelah badai geomagnet waktu titik minimum  $EEJ(HBIK-HDRW)$  mendahului waktu titik minimum indeks Dst yakni kejadian badai geomagnet tanggal 12 Agustus 2000 dan 31 Maret 2001. Empat kejadian badai geomagnet sisanya terjadi dengan waktu titik minimum  $EEJ(HBIK-HDRW)$  setelah indeks Dst mencapai titik minimumnya. Pada kejadian badai geomagnet tanggal 12 Agustus 2000, titik minimum  $EEJ(HBIK-HDRW)$  terjadi 44 jam lebih awal dari titik minimum Dst. Sedangkan pada kejadian badai geomagnet tanggal 31 Maret 2001, titik minimum  $EEJ(HBIK-HDRW)$  terjadi 8 jam setelah titik minimum Dst.

Grafik pola data Dst,  $EEJ(HBIK-HDRW)$ ,  $foF2$  BPAA Sumedang, dan  $\Delta foF2_{SMD}$  ditunjukkan pada Gambar 3-2 sampai Gambar 3-7.

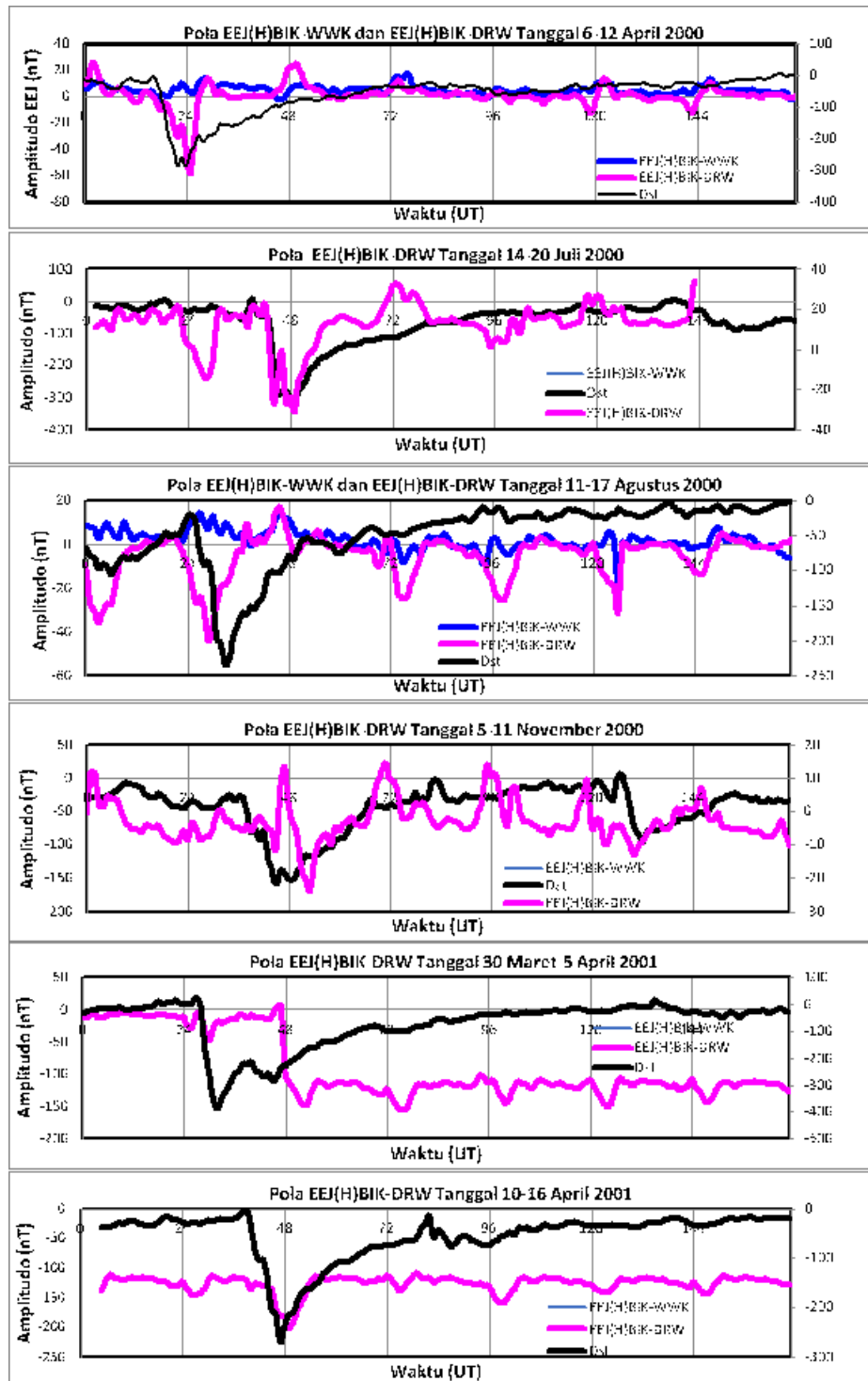
Dari gambar-gambar tersebut secara jelas terlihat bahwa ada perubahan pola  $\Delta foF2_{SMD}$  bertepatan dengan  $EEJ(HBIK-HDRW)$  mulai mencapai titik minimumnya sampai menuju normalnya. Secara fisis fenomena tersebut menjelaskan hal-hal sebagai berikut:

Ketika  $EEJ(HBIK-HDRW)$  bernilai negatif, maka telah terjadi aliran medan listrik menuju ke stasiun Biak dari stasiun Darwin sebagai konsekuensi koping lintang tinggi-rendah. Hal ini

karena EEJ(HBIK-HDRW) diperoleh dari pengurangan nilai HBIK dengan nilai HDRW sehingga apabila nilai EEJ(HBIK-HDRW) negatif berarti nilai HBIK lebih besar dari nilai HDRW.

- Selama proses injeksi medan listrik berlangsung (sebelum nilai EEJ(HBIK-HDRW) mencapai nilai minimum), lapisan ionosfer di atas Sumedang

belum mulai mengalami gangguan signifikan. Saat EEJ(HBIK-HDRW) mencapai nilai minimum, lapisan ionosfer di atas Sumedang mulai mengalami depresi nilai foF2-nya dan terus berlangsung bersamaan dengan EEJ(HBIK-HDRW) kembali menuju ke keadaan normal (*recovery phase*).

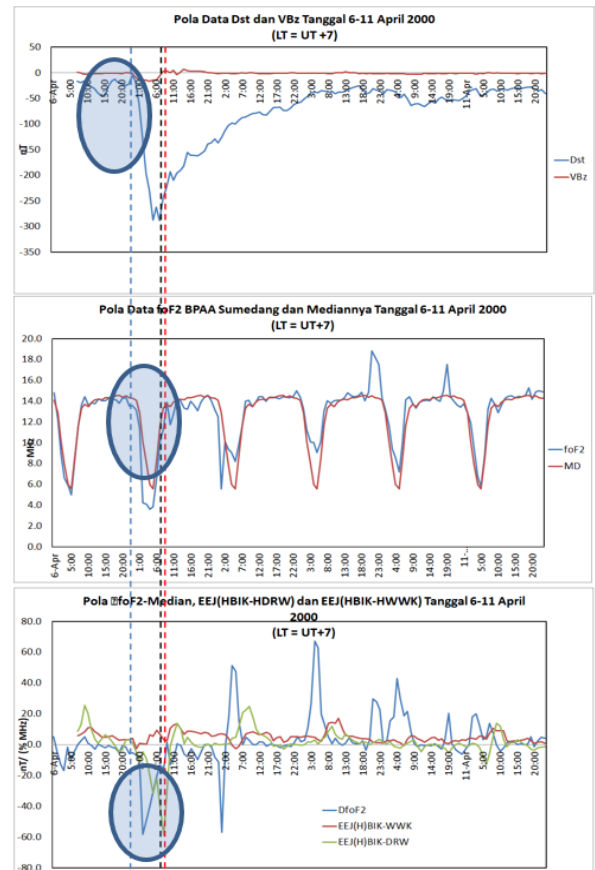


Gambar 3-1:Grafik Pola Data EEJ(HBIK-HDRW), EEJ(HBIK-DRW) dan indeks Dst

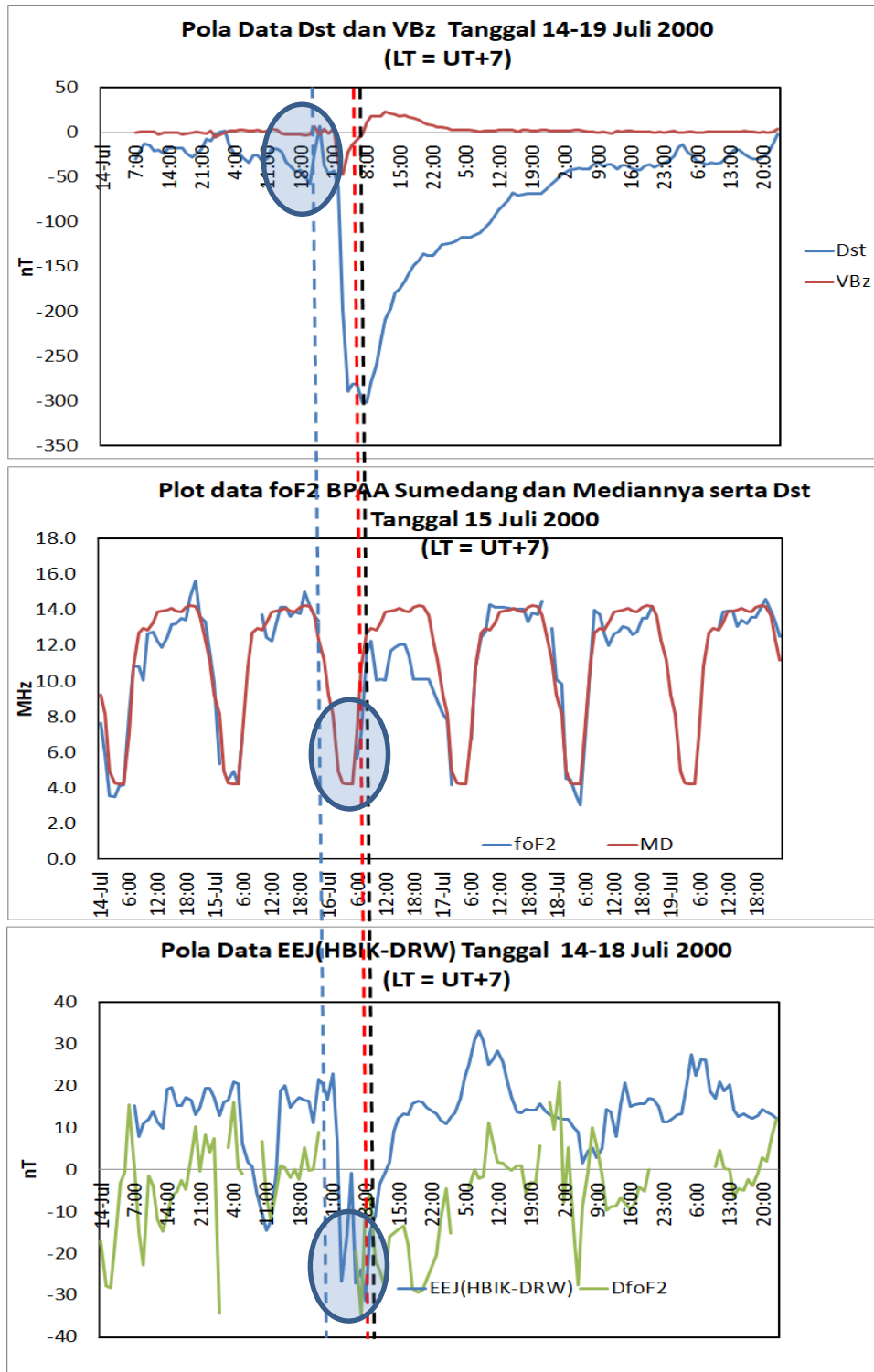
Secara umum, nilai EEJ(HBIK-HDRW) mencapai nilai minimum bersamaan atau setelah nilai indeks Dst mencapai nilai minimum sebagai konsekuensi normal dari partikel Matahari masuk ke magnetosfer dimulai dari kutub menuju ke lintang rendah. Akibatnya terjadi depresi foF2 BPAA Sumedang akibat badai geomagnet terjadi bersamaan atau setelah indeks Dst mencapai titik minimumnya karena nilai EEJ(HBIK-HDRW) mencapai minimum bertepatan dengan indeks Dst mencapai minimum. Contohnya seperti tampak jelas terlihat pada kejadian badai geomagnet tanggal 15 Juli 2000 (Gambar 3-3) dan 6 November 2000 (Gambar 3-5). Pada kejadian badai geomagnet tanggal 15 Juli 2000 (Gambar 3-3), depresi foF2 BPAA Sumedang mulai terjadi pukul 08.00 WIB bertepatan dengan nilai EEJ(HBIK-HDRW) dan indeks Dst mencapai titik minimum. Sedangkan pada kejadian badai geomagnet tanggal 6 November 2000 (Gambar 3-5), depresi foF2 BPAA Sumedang mulai terjadi pukul 12.00 WIB tanggal 7 November 2000 bertepatan dengan nilai EEJ(HBIK-HDRW) mencapai titik minimumnya. Pada kejadian badai geomagnet ini, indeks Dst mencapai nilai minimum pada pukul 08.00 WIB tanggal 7 November 2000 atau 4 jam sebelum nilai EEJ(HBIK-HDRW) mencapai nilai minimumnya. Dengan kata lain, depresi foF2 BPAA Sumedang terjadi 4 jam setelah puncak badai geomagnet. Hasil ini secara umum bersesuaian dengan hasil yang telah diperoleh oleh Lusiani et al. (2011) dan Yatini et al. (2009).

Pada beberapa kejadian badai geomagnet, nilai EEJ(HBIK-HDRW) mencapai nilai minimum sebelum indeks Dst-nya mencapai nilai minimum. Hal ini menyebabkan onset depresi foF2 BPAA Sumedang terjadi mendahului indeks Dst mencapai titik minimumnya. Contohnya seperti tampak jelas terlihat pada kejadian badai geomagnet tanggal 12 Agustus 2000 (Gambar 3-4) dan 31 Maret

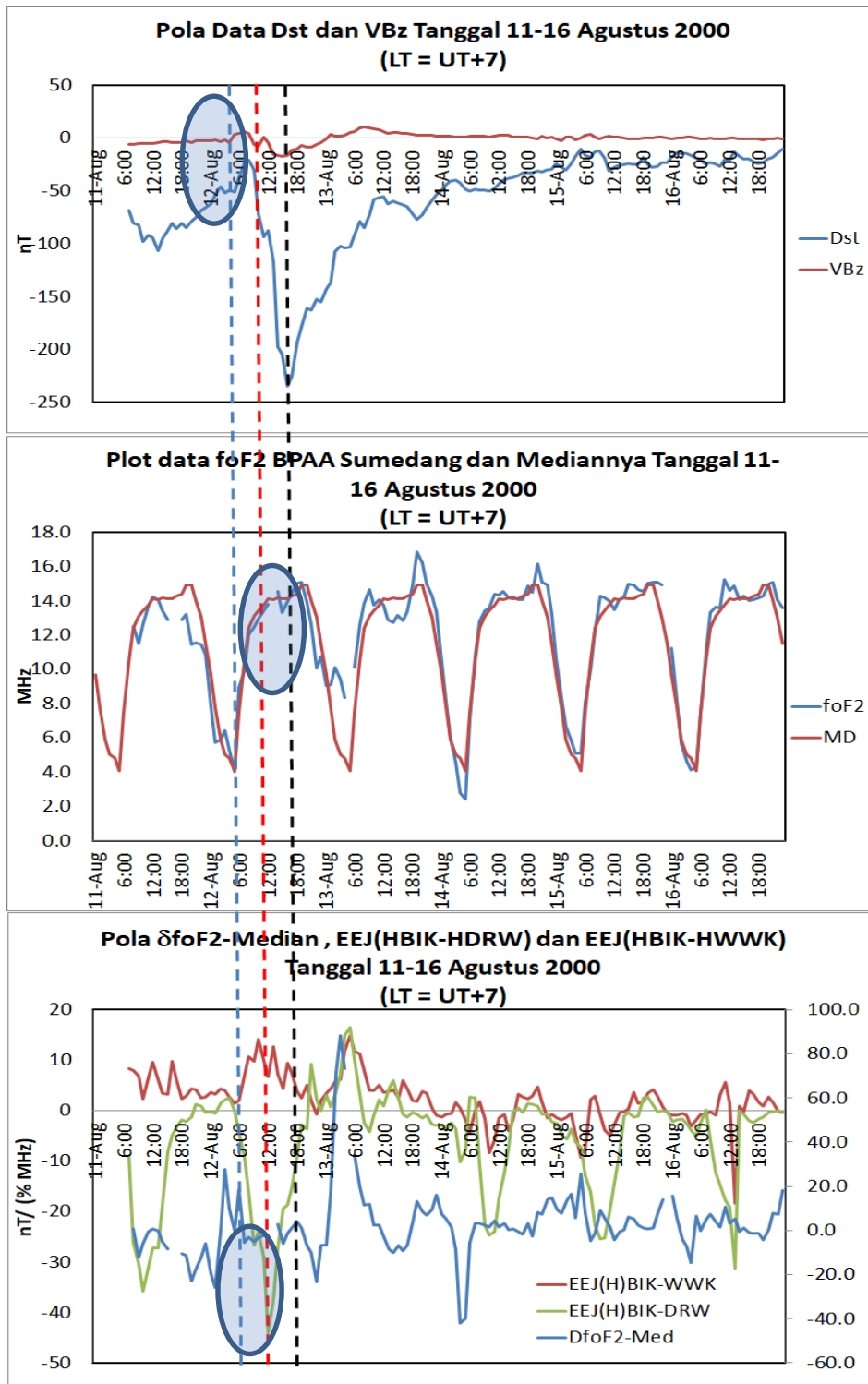
2001 (Gambar 3-6). Pada kejadian badai geomagnet tanggal 12 Agustus 2000 (Gambar 3-4), nilai indeks Dst mencapai minimum pukul 16.00 WIB dan nilai EEJ(HBIK-HDRW) mencapai titik minimum pukul 12.00 WIB tanggal 12 Agustus 2000. Artinya EEJ(HBIK-HDRW) mencapai minimumnya 4 jam lebih dulu daripada indeks Dst mencapai minimumnya. Depresi foF2 BPAA Sumedang mulai terjadi pukul 12.00 WIB bertepatan dengan EEJ(HBIK-HDRW) mencapai minimum. Dengan kata lain, foF2 BPAA Sumedang mulai mengalami gangguan sebelum indeks Dst mencapai nilai minimumnya.



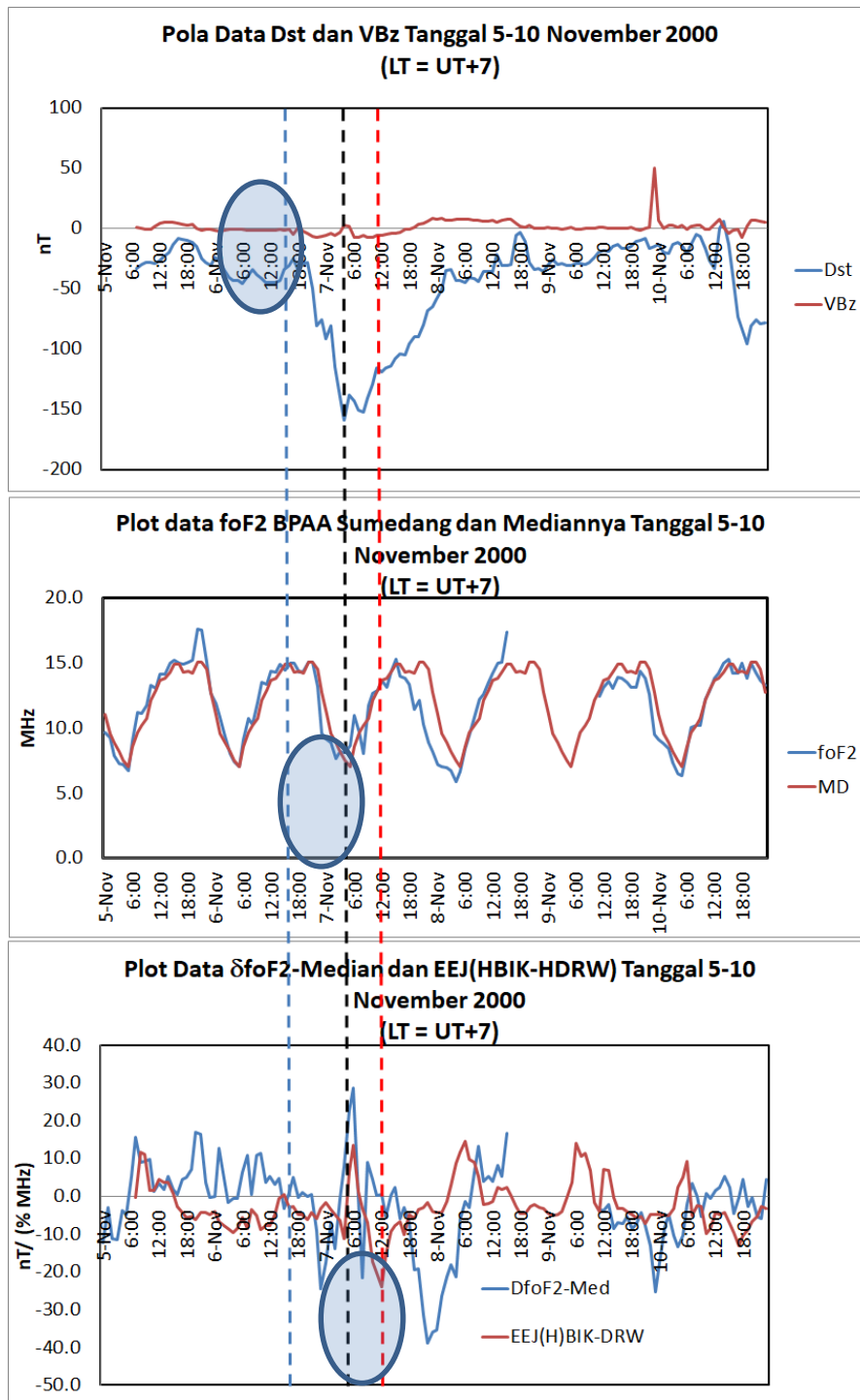
Gambar 3-2: Grafik pola indeks Dst dan VBz (atas), foF2 BPAA Sumedang dan mediannya (tengah) serta EEJ(BHIK-HWWK), EEJ(HBIK-HDRW), dan  $\Delta$ foF2 BPAA Sumedang ( $\delta$ foF2<sub>SMD</sub>) (bawah) tanggal 6-11 April 2000. Garis vertikal putus-putus (a) biru adalah onset Dst, (b) hitam adalah titik Dst mencapai minimum, dan (c) merah adalah titik EEJ mencapai minimum bertepatan dengan onset foF2 mulai terdepresi



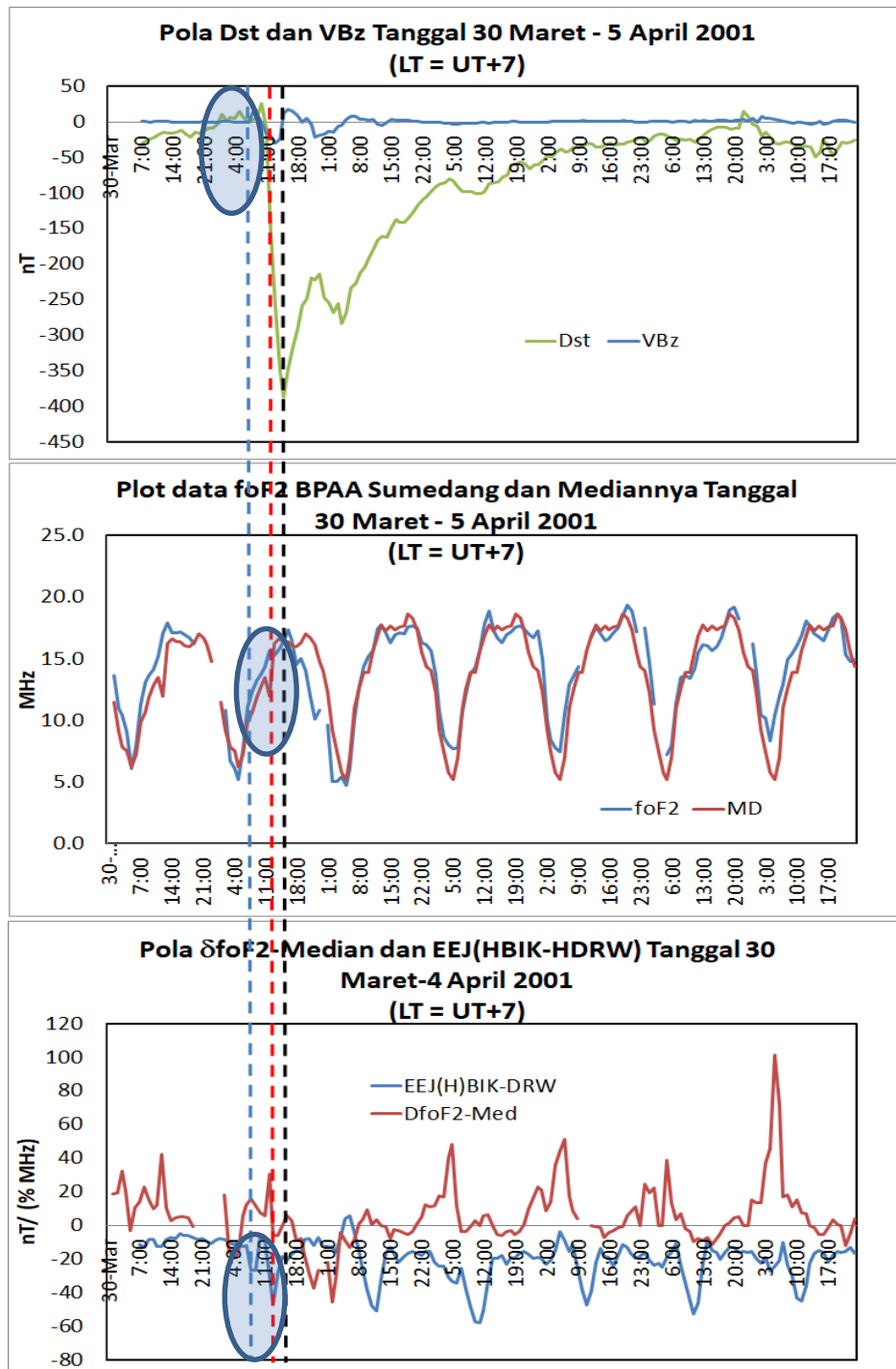
Gambar 3-3: Grafik pola indeks Dst dan VBz (atas), foF2 BPAA Sumedang dan mediannya (MHz) (tengah) serta EEJ(BHIK-HWWK), EEJ(HBIK-HDRW), dan  $\Delta$ foF2 BPAA Sumedang ( $\delta$ foF2<sub>SMD</sub>) (bawah) tanggal 14-18 Juli 2000. Garis vertikal putus-putus (a) biru adalah onset Dst, (b) hitam adalah titik Dst mencapai minimum, dan (c) merah adalah titik EEJ mencapai minimum bertepatan dengan onset foF2 mulai terdepresi.



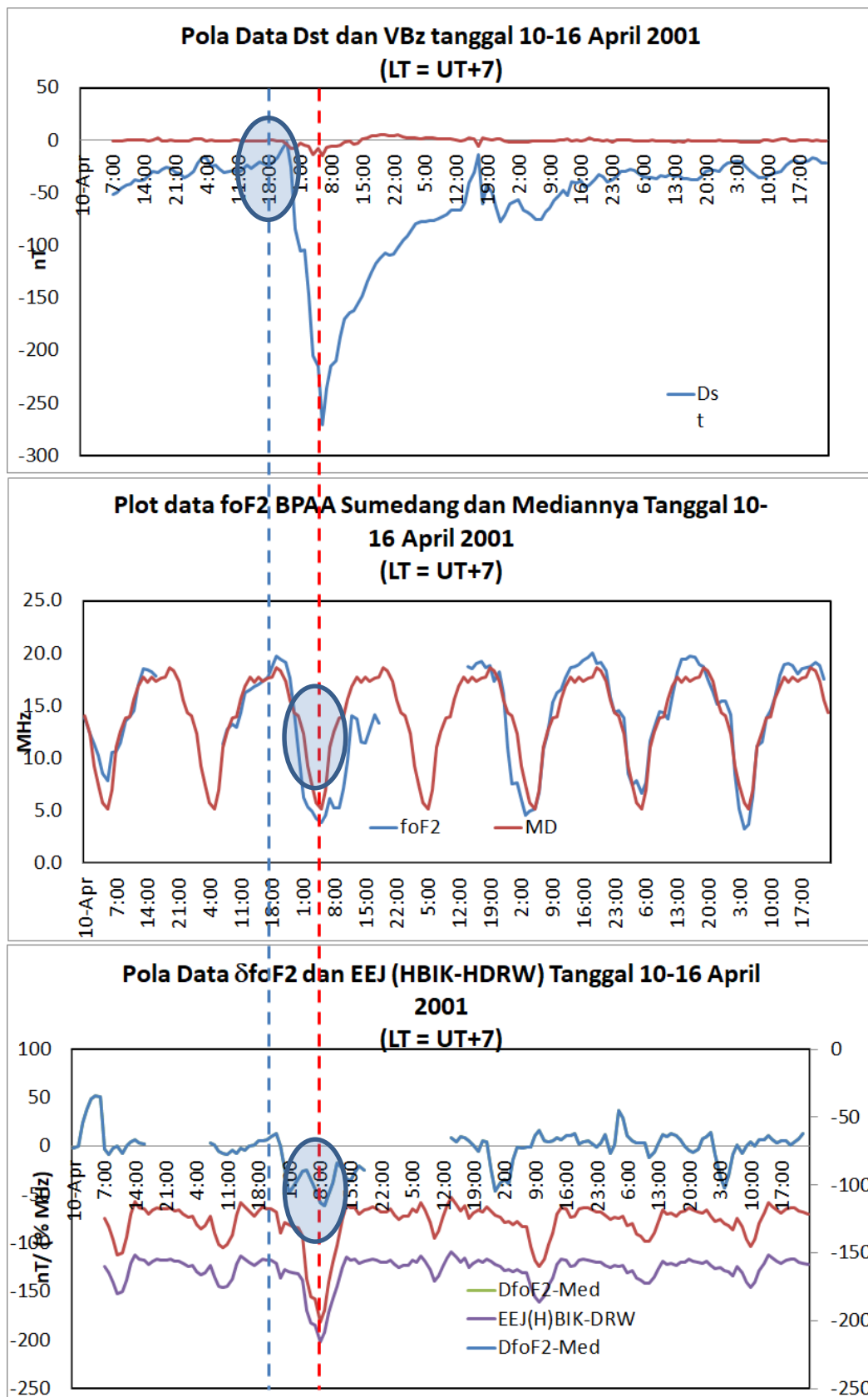
Gambar 3-4: Grafik pola indeks Dst dan VBz (atas), foF2 BPAA Sumedang dan mediannya (tengah) serta EEJ(HBIK-HWWK), EEJ(HBIK-HDRW), dan  $\Delta$ foF2 BPAA Sumedang ( $\delta$ foF2<sub>SMD</sub>) (bawah) tanggal 14-16 Agustus 2000. Garis vertikal putus-putus (a) biru adalah onset Dst, (b) hitam adalah titik Dst mencapai minimum, dan (c) merah adalah titik EEJ mencapai minimum bertepatan dengan onset foF2 mulai terdepresi.



Gambar 3-5: Grafik pola indeks Dst dan VBz (atas), foF2 BPAA Sumedang dan mediannya (tengah) serta EEJ(BHIK-HWWK), EEJ(HBIK-HDRW), dan  $\Delta$ foF2 BPAA Sumedang ( $\delta$ foF2<sub>SMD</sub>) (bawah) tanggal 5-10 November 2000. Garis vertikal putus-putus (a) biru adalah onset Dst, (b) hitam adalah titik Dst mencapai minimum, dan (c) merah adalah titik EEJ mencapai minimum bertepatan dengan onset foF2 mulai terdepresi.



Gambar 3-6: Grafik pola indeks Dst dan VBz (atas), foF2 BPAA Sumedang dan mediannya (tengah) serta EEJ(BHIK-HWWK), EEJ(HBIK-HDRW), dan  $\Delta$ foF2 BPAA Sumedang ( $\delta$ foF2<sub>SMD</sub>) (bawah) tanggal 30 Maret-4 April 2001. Garis vertikal putus-putus (a) biru adalah onset Dst, (b) hitam adalah titik Dst mencapai minimum, dan (c) merah adalah titik EEJ mencapai minimum bertepatan dengan onset foF2 mulai terdepresi.



Gambar 3-7: Grafik pola indeks Dst dan VBz (atas), foF2 BPAA Sumedang dan mediannya (tengah) serta EEJ(BHIK-HWWK), EEJ(HBIK-HDRW), dan  $\Delta$ foF2 BPAA Sumedang ( $\delta$ foF2<sub>SMD</sub>) (bawah) tanggal 10-16 April 2001. Garis vertikal putus-putus (a) biru adalah onset Dst, (b) hitam adalah titik Dst mencapai minimum, dan (c) merah adalah titik EEJ mencapai minimum bertepatan dengan onset foF2 mulai terdepresi.



#### 4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dalam makalah ini adalah bahwa pada saat terjadi badai geomagnet maka akan terjadi injeksi medan listrik dari lintang tinggi ke lintang lebih rendahnya. Hal ini dibuktikan dengan EEJ(HBIK-HDRW) bernilai negatif. Nilai foF2 ionosfer BPAA Sumedang mulai terdepresi bertepatan dengan nilai minimum (negatif) EEJ(HBIK-HDRW). Pola EEJ(HBIK-HDRW) mencapai titik minimumnya dapat terjadi sebelum atau setelah indeks Dst mencapai nilai minimumnya sehingga onset depresi foF2 BPAA Sumedang juga dapat terjadi sebelum atau setelah indeks Dst mencapai nilai minimumnya. Pada makalah ini beda waktu antara EEJ(HBIK-HDRW) mencapai minimum dengan indeks Dst mencapai minimum berkisar antara 0 sampai 4 jam baik sebelum dan sesudah indeks Dst mencapai minimum. Namun, untuk beda waktu 0 sampai 4 jam sebelum indeks Dst mencapai minimum merupakan temuan berbeda dari hasil mereka.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Pusat Sains Antariksa atas diperkenankannya menggunakan data ionosfer BPAA Sumedang dan medan geomagnet stasiun Biak. Terima kasih juga disampaikan kepada tim *scaling* ionogram yang telah men-*scaling* data ionogram untuk mendapatkan nilai foF2 (salah satu parameter ionosfer) BPAA Sumedang yang digunakan sebagai analisis dalam penelitian ini.

#### DAFTAR RUJUKAN

Abdu, M.A., J.H.A. Sobral, E. R. Paula, I. S. Batista, 1991. Magnetospheric disturbance effects on the Equatorial Ionization Anomaly (EIA): an overview. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 53, 757-771

- Abdu, M. A., 1997. *Major phenomena of the equatorial ionosphere thermosphere system under disturbed conditions*, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 59, 1505-1519.
- Abdu, M. A., 2001. *Outstanding problems in the equatorial ionosphere thermosphere electrodynamics relevant to spread-F*, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 63, 869-884.
- Adekoya, B. J., V. U. Chukwuma, N. O. Bakare, and T. W. David, 2012. *Effects of geomagnetic storm on middle latitude ionospheric F2 during storm of 2-6 April 2004*, *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol. 41, pp 606-616.
- Gopalswamy, N., 2009. *Halo coronal Mass ejections and geomagnetic storm*, *Earth Planet Space*, 61, 1-3
- Kumar, P., W. Uddin, A. Taori, R. Chandra, and S. Bisht, 2010. *Ionospheric response to the space weather event of 18 November 2003-An investigation*, *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol 39, pp 290-295.
- Lusiani, E. S. Mumpuni, J. A. Utama, 2011. *Analisis kaitan badai geomagnet dengan badai ionosfer sebagai dampak kejadian Lontaran massa korona Matahari (Oktober-November 2003)*, *Prosiding Seminar Nasional Astronomi Indonesia*.
- Mannucci, A.J., B.T. Tsurutani, B.A. Iijima, A. Komjathy, A. Saito, W.D. Gonzalez, F.L. Guarnieri, J.U. Kozyra, and R. Skoug, 2005. *Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29-30 2003 "Halloween storms"*, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12S02, DOI: 10.1029/2004GL021467.
- Mukherjee S., S. Sarkar, P. K. Purohit, A. K. Gwal, 2010. *Effect of geomagnetic storms in the Equatorial Anomaly Region observed from ground based data*, *Int. Journal of Geomagnetism and Geosciences*, Vol. 1, No. 3, pp. 478-488.
- Veenadhari, B. dan S. Alex, 2006. *Space weather effects on low latitude geomagnetic field and ionospheric plasma response*, *ILWS Workshop 206, GOA, India*.

Yatini C. Y., Jiyo, dan M. Ruhimat, 2009. *Badai Matahari dan Pengaruhnya pada Ionosfer dan Geomagnet di Indonesia*, Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara Vo. 4 No.Hal.17-24.

Yumoto, K. and The 210° MM Magnetic Observation Group, (1995). *Initial results from the 210° magnetic meridian project—Review*, J. Geomag. Geoelectr., 47, 1197–1213.

**RESPON TEC IONOSFER DI ATAS BANDUNG DAN MANADO  
TERKAIT *FLARE* SINAR-X MATAHARI KELAS M5.1 DAN M7.9 TAHUN  
2015  
(IONOSPHERIC TEC RESPONSE OVER BANDUNG DAN MANADO  
ASSOCIATED WITH M5.1 AND M7.9 CLASSES OF SOLAR FLARE  
XRAYS IN 2015)**

**Sri Ekawati\***

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

\*e-mail : [sri.ekawati@lapan.go.id](mailto:sri.ekawati@lapan.go.id)

Diterima 8 Mei 2016; Direvisi 19 September 2017; Disetujui 22 September 2017

**ABSTRACT**

The solar flare is potential to cause sudden increase of the electron density in the ionosphere, particularly in D layer, known as Sudden Ionospheric Disturbances (SID). This increase of electron density occurs not only in the ionospheric D layer but also in the ionospheric E and F layers. Total Electron Content (TEC) measured by GPS is the total number of electrons from D to F layer. The aim of this research is to study the effect of solar flare x-rays, greater than M5 class in 2015, on ionospheric TEC over Bandung and Manado. This paper presents the preliminary result of ionospheric TEC response on solar flare occurrence over Indonesia. The ionospheric TEC data is derived from GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) receiver at Bandung (-6.90° S; 107.6° E geomagnetic latitude 16.54° S) and Manado (1.48° N; 124.85° E geomagnetic latitude 7.7° S). The solar x-rays flares classes analyzed were M5.1 on 10 March 2015 and M7.9 on 25 June 2015. Slant TEC (STEC) values were calculated to obtain Vertical TEC (VTEC) and the Differential of the VTEC (DVTEC) per PRN satellite for further analysis. The results showed that immediately after the flare, there were sudden enhancement of the VTEC and the DVTEC (over Bandung and Manado) at the same time. The time delay of ionospheric TEC response on M5.1 flare was approximately 2 minutes, then the VTEC increased by 0.5 TECU and the DVTEC rose sharply by 0.5 – 0.6 TECU/minutes. Moreover, the time delay after the M7.9 flare was approximately 11 minutes, then the VTEC increased by 1 TECU and the DVTEC rose sharply by 0.6 – 0.9 TECU/minutes.

*Keywords: Ionosphere, TEC, flare, GPS, SID*

## ABSTRAK

*Flare* matahari berpotensi meningkatkan kerapatan elektron ionosfer secara mendadak, khususnya di lapisan D, yang dikenal sebagai *Sudden Ionospheric Disturbances* (SID). Peningkatan kerapatan elektron tersebut terjadi tidak hanya di lapisan D, tetapi juga di lapisan E dan F ionosfer. *Total Electron Content* (TEC) dari GPS merupakan jumlah banyaknya elektron total dari lapisan D sampai lapisan F. Penelitian ini bertujuan mengetahui efek *flare*, yang lebih besar dari kelas M5 tahun 2015, terhadap TEC ionosfer di atas Bandung dan Manado. Makalah ini merupakan hasil awal dari respon TEC ionosfer terhadap fenomena *flare* di atas Indonesia. Data TEC ionosfer diperoleh dari penerima *GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor* (GISTM) di Bandung ( $-6,90^{\circ}$  S;  $107,60^{\circ}$  E lintang geomagnet  $16,54^{\circ}$  LS) dan Manado ( $1,48^{\circ}$  LU;  $124,85^{\circ}$  BT lintang geomagnet  $7,7^{\circ}$  LS) dikaitkan dengan kejadian *flare* kelas M5.1 pada tanggal 10 Maret 2015 dan kelas M7.9 pada tanggal 25 Juni 2015. Nilai Slant TEC (STEC) dihitung untuk memperoleh nilai Vertical TEC (VTEC), kemudian nilai *Differential of VTEC* (DVTEC) per PRN satelit diperoleh untuk analisis selanjutnya. Hasil menunjukkan segera setelah terjadi *flare*, terjadi peningkatan VTEC dan DVTEC (di atas Bandung dan Manado) secara mendadak pada waktu yang sama. Waktu tunda dari respon TEC ionosfer setelah terjadi *flare* M5.1 adalah sekitar 2 menit, kemudian VTEC meningkat sebesar 0,5 TECU dan DVTEC meningkat secara tajam sebesar 0,5 – 0,6 TECU/menit. Sedangkan, waktu tunda setelah terjadi *flare* M7.9 adalah 11 menit, kemudian VTEC meningkat sebesar 1 TECU dan DVTEC meningkat secara tajam sebesar 0,6 – 0,9 TECU/menit.

Kata kunci: *Ionosfer, TEC, Flare, GPS, SID*

### 1. PENDAHULUAN

Pemahaman interaksi aktivitas Matahari dengan ionosfer Bumi perlu ditingkatkan untuk optimalisasi layanan Pusat Sains Antariksa, sebagai *center of excellence* sains antariksa, terhadap *local space weather communities* di Indonesia. Sebab ionosfer, yang sangat rentan dipengaruhi oleh aktivitas matahari, merupakan salah satu faktor keberhasilan komunikasi radio, komunikasi satelit dan sistem navigasi berbasis satelit. Penjalaran sinyal satelit ke antena di bumi dapat terganggu bila medium ionosfer yang dilaluinya terganggu.

Ionosfer terbentuk disebabkan proses ionisasi dari sinar *Extreme Ultraviolet* (EUV) dan sinar-X Matahari. Ionosfer adalah lapisan plasma (elektron dan ion) yang melingkupi bumi yang terbentuk karena mendapat energi radiasi matahari (Kelley, 1989). Pada siang hari

terjadi proses ionisasi dan ionosfer akan terbagi menjadi lapisan D (70 – 90 km), E (90 – 150 km), F1 (150 – 200 km) dan F2 (200 – 300 km). Sedangkan pada malam hari terjadi proses rekombinasi dan lapisan-lapisan tersebut akan menghilang menyisakan satu lapisan yaitu lapisan F dan pada suatu kondisi tertentu akan muncul pula lapisan Es (Sporadis). Pembentukan lapisan-lapisan di ionosfer diilustrasikan pada Gambar 1-1.

Ketika terjadi peristiwa *flare* sinar-x, berupa peningkatan intensitas sinar-x yang kuat dan mendadak, maka akan mengakibatkan peningkatan densitas elektron di lapisan ionosfer. Gangguan secara mendadak di ionosfer tersebut dikenal dengan istilah *Sudden Ionospheric Disturbances* (SID). Penelitian tentang pengaruh *flare* terhadap ionosfer di atas Indonesia dari data ionosonda menunjukkan bahwa fenomena peristiwa *flare* sinar-x dari matahari, yang

merupakan radiasi elektromagnetik pengionisasi, merupakan kategori dampak langsung terhadap struktur dan dinamika ionosfer dengan waktu tunda sekitar 8,3 menit (Suratno dan Suhartini, 2011). *Flare* sinar-x juga menyebabkan peningkatan frekuensi minimum (*fmin*) dari data ionosonda, sehingga anomali ini menyebabkan kegagalan komunikasi yang menggunakan frekuensi di bawah (*fmin*) (Suratno dan Suhartini, 2011). Komunikasi radio HF yang pada kondisi normal dapat digunakan untuk komunikasi, ketika terjadi *flare* sinar-x, mendadak tidak bisa berkomunikasi karena gelombang tersebut memperoleh serapan lebih tinggi oleh lapisan D. Adapun ilustrasi terjadinya SID diilustrasikan pada Gambar 1-2. Peristiwa SID oleh komunitas pengguna radio HF lebih dikenal dengan sebutan fenomena *Short Wave Fadeout* (SWF).

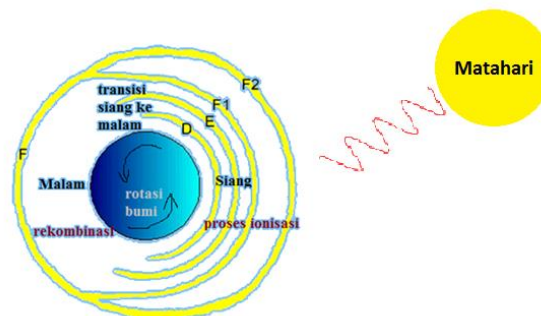
Penelitian tentang pengaruh *flare* terhadap ionosfer di atas Indonesia dari data ionosonda telah lebih dahulu diteliti. Namun, penelitian anomali ionosfer diatas Indonesia dari data *Total Electron Content* (TEC) yang diperoleh dari penerima *Global Positioning System* (GPS) masih perlu

penelitian lebih dalam. Padahal, data TEC yang mengukur kerapatan elektron dari lapisan D sampai dengan lapisan F ionosfer dapat digunakan untuk mendeteksi pengaruh *flare* sinar-x terhadap anomali ionosfer.

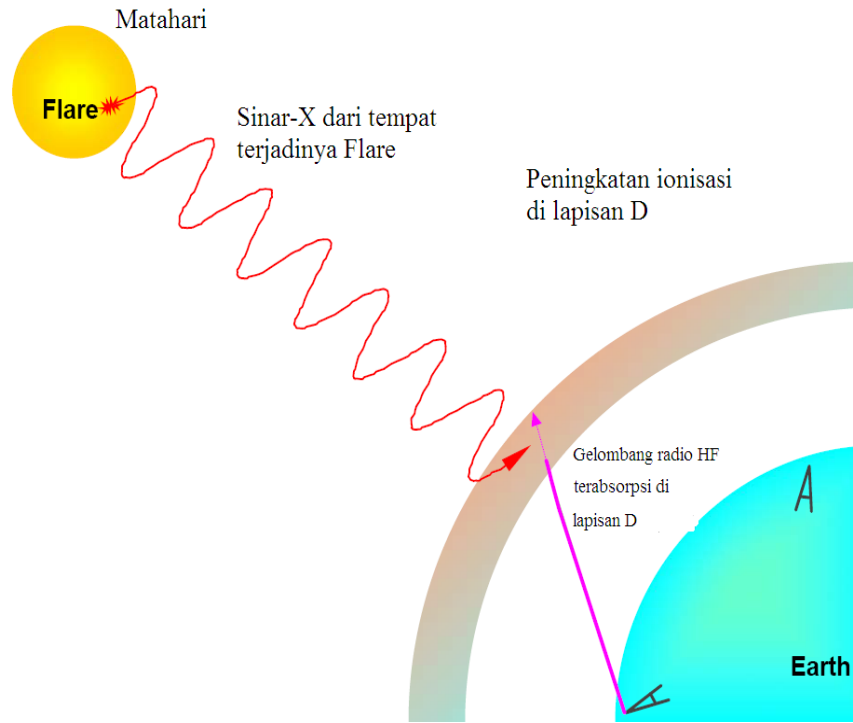
Peningkatan kerapatan elektron ionosfer yang disebabkan *flare* sinar-x tidak hanya terjadi di lapisan D ionosfer tetapi juga terjadi di lapisan E ionosfer (Xiong, 2011) dan terjadi juga di lapisan F ionosfer (Tripathi et al, 2011). Peningkatan kerapatan elektron di lapisan D, lapisan E dan lapisan F ionosfer akan meningkatkan juga nilai Total Electron Content (TEC) (Muslim, 2014). Nilai TEC adalah integral dari densitas elektron sepanjang garis lurus *line of sight* antara satelit dengan penerima yang dapat dituliskan pada Persamaan (1-1).

$$STEC = \int N_{edl} \dots (1-1)$$

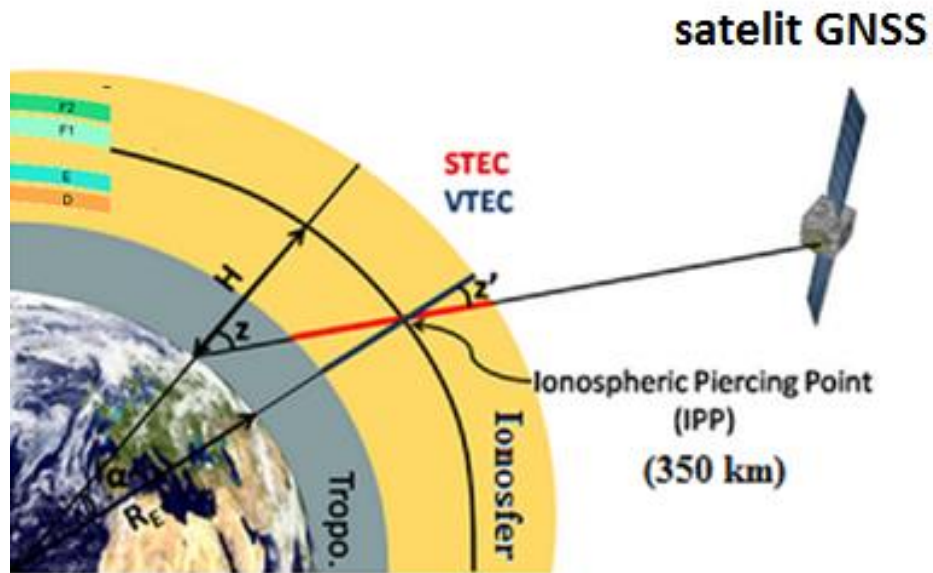
dengan *Ne* adalah densitas elektron dalam satuan elektron/m<sup>3</sup>, dan satuan TEC adalah TEC Unit (1 TECU = 10<sup>16</sup> elektron/m<sup>2</sup>).



Gambar 1-1. Ilustrasi pembentukan lapisan Ionosfer pada siang dan malam



Gambar 1-2.: Ilustrasi kegagalan komunikasi radio HF akibat *flare* sinar-x Matahari (IPS,2015)



Gambar 1-3: Ilustrasi pengukuran STEC dan VTEC (courtesy: ROB)

Nilai TEC yang diperoleh dari pengukuran penerima GNSS merupakan *Slant Total Electron Content* (STEC). Sedangkan pada makalah ini akan digunakan nilai vertical TEC. Gambar 1-3 menunjukkan ilustrasi pengukuran STEC dan VTEC oleh satelit GNSS. STEC ditunjukkan dengan garis warna merah pada ionosfer. STEC menunjukkan banyaknya elektron per  $m^2$  secara “*line of sight*” antara satelit GNSS dengan penerima GNSS di bumi. Sedangkan VTEC ditunjukkan dengan garis biru pada ionosfer. VTEC mengadaptasi model lapisan tipis ionosfer yang menganggap ionosfer berada pada ketinggian 350-kilometer dari permukaan bumi (Klobuchar, 1986; Asnawi, 2011). Ketinggian tersebut dipilih karena konsentrasi elektron di ionosfer, paling tinggi pada ketinggian tersebut.

Anomali peningkatan nilai VTEC akibat *flare* matahari sinar-x paling besar (X-rays class X17.2) pada tanggal 28 Oktober 2003 telah dilaporkan (Sahai, 2007). Peningkatan nilai VTEC sangat intensif dan mendadak sesaat setelah terjadinya *flare*, yang diamati oleh empat penerima GPS di Brazil, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-4. Dibandingkan dengan hari sebelumnya, maka anomali VTEC meningkat secara mendadak sekitar 25 TECU dan kembali normal setelah tiga jam kemudian. Beberapa penelitian anomali TEC di atas Indonesia telah dilakukan dengan mengamati median TEC harian (Ekawati dan Srigutomo, 2013) dan *Differential of STEC* (DSTEC) dari *International GNSS Service* (IGS) (Muslim, 2014). Muslim (2014) memperoleh hasil waktu terjadinya gangguan ionosfer dari 6 stasiun GPS yang berbeda, berkaitan erat dengan peristiwa *flare* kelas X. Liu, et al (2006) menyebutkan bahwa anomali pada TEC

terdeteksi untuk peristiwa *flare* kelas M atau kelas X.

Penelitian pada makalah ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan nilai TEC ionosfer di atas Bandung dan Manado dikaitkan dengan peristiwa *flare* sinar-x matahari dengan kelas lebih besar dari 5 yaitu kelas M5.1 pada tanggal 10 Maret 2015 dan kelas M7.9 tanggal 25 Juni 2015.

## 2. DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan pada makalah ini meliputi data ionosfer dan *flare* sinar-x matahari. Data *Total Electron Content* (TEC) ionosfer diperoleh dari penerima *GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring* (GISTM) di atas untuk Bandung Bandung ( $-6,90^{\circ}$  S;  $107,60^{\circ}$  E lintang geomagnet  $16,54^{\circ}$  LS) dan Manado ( $1,48^{\circ}$  LU;  $124,85^{\circ}$  BT lintang geomagnet  $7,7^{\circ}$  LS). Sedangkan data *flare* sinar-x matahari diperoleh dari web SWPC di [http://www.polarlicht-vorhersage.de/goes\\_archive](http://www.polarlicht-vorhersage.de/goes_archive) seperti yang ditunjukkan Gambar 2-1 dan data *flare* sinar-x matahari berupa plot image 3-harian dapat diunduh di alamat [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015\\_plots](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015_plots). Sedangkan data yang lebih detail mengenai kejadian *flare* matahari (*event*) dapat diunduh di <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/>. Pada makalah ini, *flare* yang akan dianalisis adalah kejadian *flare* sinar-x matahari yang lebih besar dari kelas M5 selama tahun 2015.

Data TEC dari GISTM merupakan data STEC, kemudian data tersebut dikonversi terlebih dahulu menjadi VTEC dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Klobuchar, 1986):

$$VTEC = STEC \cos \left[ \arcsin \left( \frac{R \cos \theta}{R_e + h_{max}} \right) \right] \dots (2-1)$$

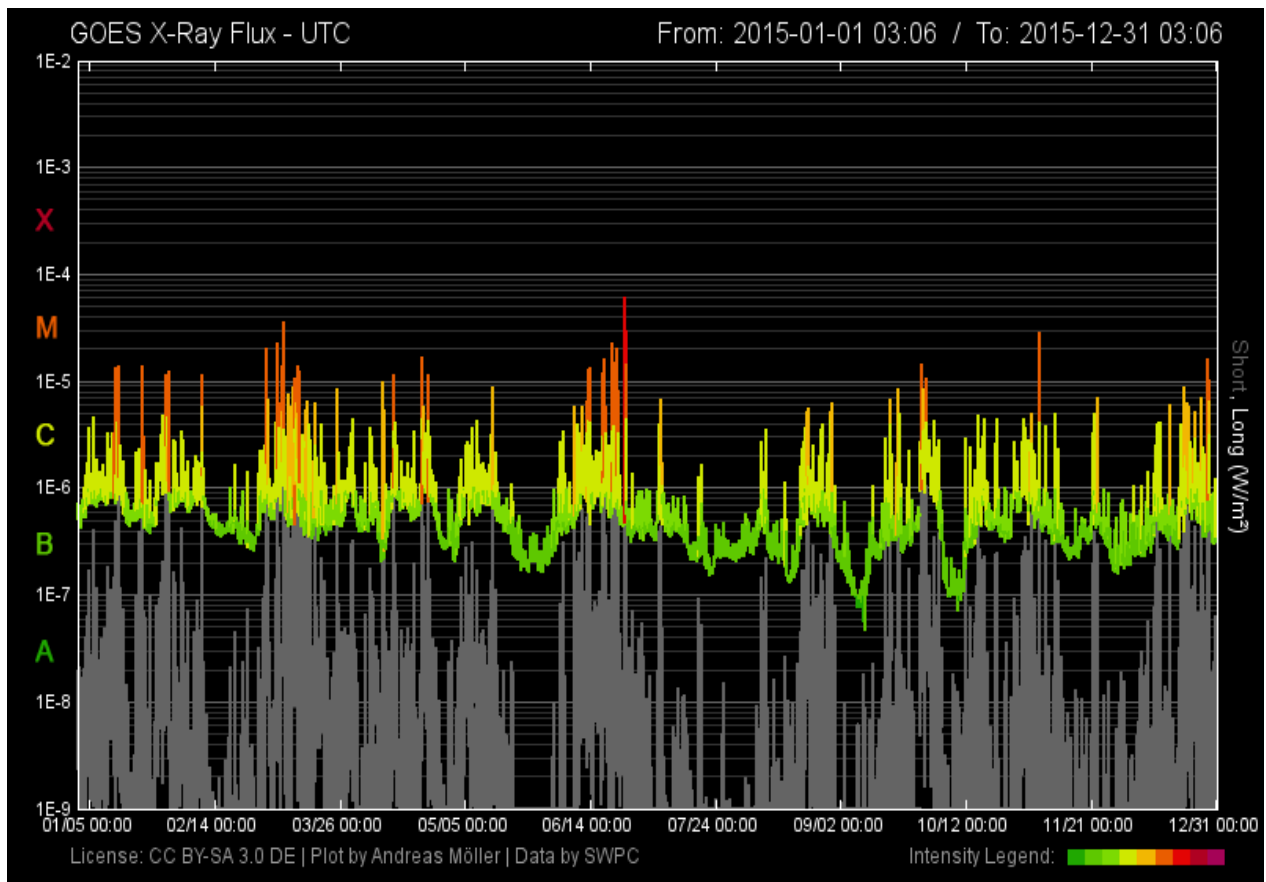
dengan  $R_e$  adalah jejari bumi (6378 km),  $h_{max}$  adalah ketinggian lapisan ionosfer yaitu 350 km dan  $\theta$  adalah sudut elevasi posisi satelit terhadap antena penerima GNSS di bumi.

Selama satu menit, nilai TEC diperoleh lebih dari 11 nilai dari PRN (*Pseudo-Random Noise/Number*) satelit yang berbeda secara simultan. Kemudian, data-data VTEC tersebut dipilih pada waktu sekitar peristiwa *flare*. Selanjutnya dipilih kembali berdasarkan PRN satelit

yang mengukur nilai TEC pada waktu yang ditetapkan (waktu sekitar terjadinya *flare*). Terakhir, dilakukan perhitungan *differensial of VTEC* (DVTEC) dan dilakukan perbandingan nilai DVTEC pada saat terjadi dengan *flare* dengan DVTEC pada saat kondisi aktivitas matahari dan geomagnet dalam kondisi tenang. Adapun perhitungan DVTEC dilakukan seperti pada Persamaan (2-2) berikut:

$$DVTEC = VTEC(t) - VTEC(t - 1) \dots (2-2)$$

dengan  $t$  adalah waktu.

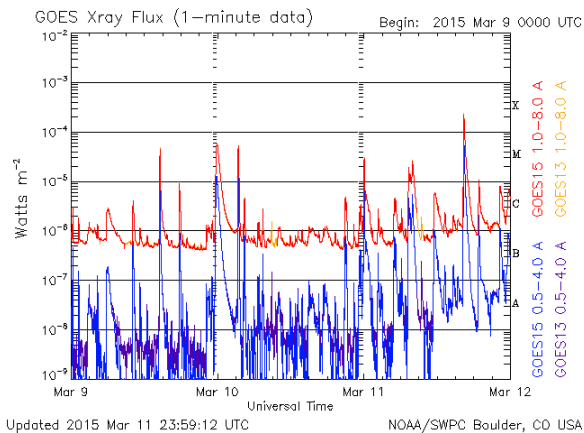


Gambar 2-1 : GOES X-rays flux dari tanggal 1 Jan – 31 Desember 2015 ([http://www.polarlicht-vorhersage.de/goes\\_archive](http://www.polarlicht-vorhersage.de/goes_archive) diunduh bulan Januari 2017)

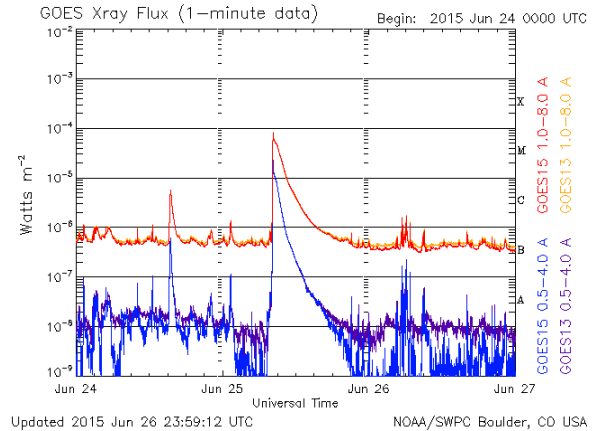


### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3-1 menunjukkan hasil identifikasi kemunculan *flare* sinar-x matahari di atas kelas M5 selama tahun 2015. Tabel tersebut menunjukkan terdapat dua kejadian *flare* yang mungkin berdampak pada ionosfer di atas Indonesia, karena terjadi pada siang hari untuk wilayah Indonesia, yaitu *flare* kelas M5.1 pada tanggal 10 Maret 2015 (Gambar 3-1) dan *flare* kelas M7.9 pada tanggal 25 Juni 2015 (Gambar 3-2).



Gambar 3-1: Plot *flare* tanggal 09 – 11 Maret 2015 (sumber:[ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015\\_plots](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015_plots) diunduh Maret 2016)



Gambar 3-2: Plot *flare* tanggal 24 – 26 Juni 2015 (sumber:[ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015\\_plots](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015_plots) diunduh Maret 2016)

Tabel 3-1 juga menunjukkan waktu awal, waktu puncak dan waktu akhir kemunculan *flare*. *Flare* M5.1 mulai terjadi pada pukul 03.19 UT (10.19 WIB atau 11.19 WITA), mencapai waktu puncak pada pukul 03.24 UT dan berakhir pada pukul 03.28 UT. Sedangkan, *flare* M7.9 mulai terjadi pada pukul 08.02 UT (15.02 WIB atau 16.02 WITA), mencapai puncak pada pukul 08.16 UT dan berakhir pada pukul 09.05 UT.

Tabel 3-1. Kemunculan *Flare* di atas M5 selama tahun 2015 (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/> diunduh bulan April 2016)

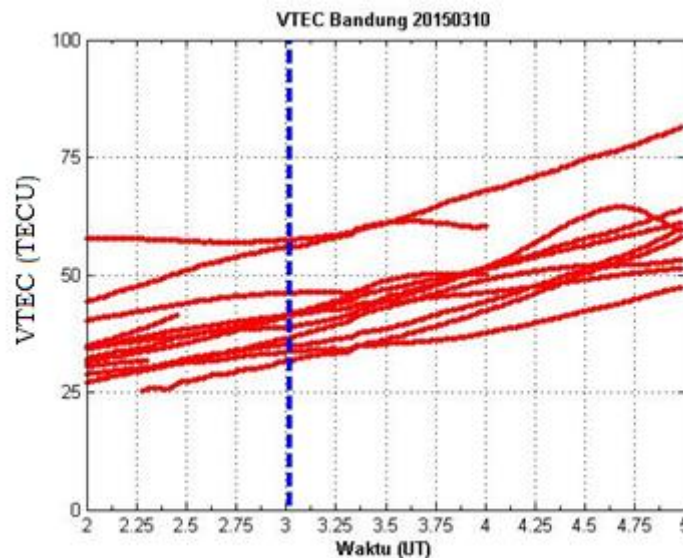
Tanggal	Kelas <i>flare</i>	Mulai (UT)	Maks. (UT)	Selesai (UT)	Keterangan
07 Mar 2015	M9.2	21.45	22.22	22.58	malam
09 Mar 2015	M5.8	23.29	23.53	00.12	malam
<b>10 Mar 2015</b>	<b>M5.1</b>	<b>03.19</b>	<b>03.24</b>	<b>03.28</b>	<b>siang</b>
11 Mar 2015	X2.1	16.11	16.22	16.29	malam
05 Mei 2015	X2.7	22.05	22.11	22.15	malam
22 Jun 2015	M6.5	17.39	18.23	18.51	malam
<b>25 Jun 2015</b>	<b>M7.9</b>	<b>08.02</b>	<b>08.16</b>	<b>09.05</b>	<b>siang</b>

### 3.1. TEC pada tanggal 10 Maret 2015 (*flare* M5.1)

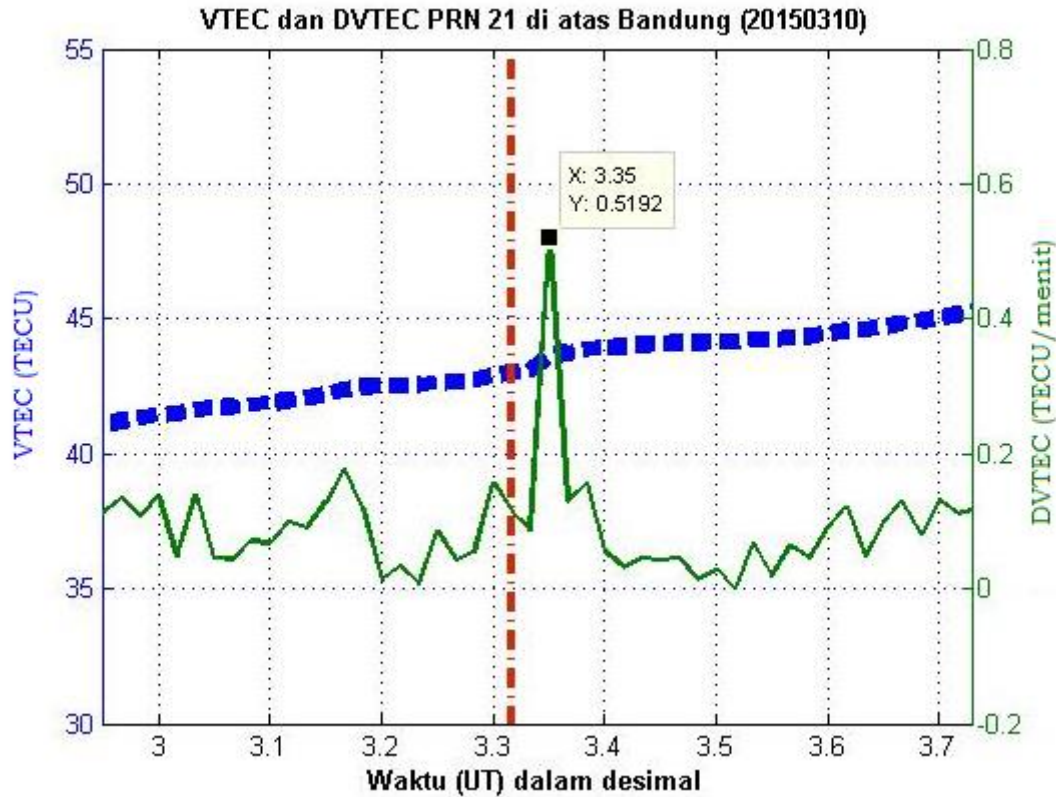
Gambar 3-3 menunjukkan data VTEC di atas Bandung pada tanggal 10 Maret 2015. Data TEC yang ditampilkan pada Gambar 3-3 adalah data dari pukul 02.00 UT sampai dengan 05.00 UT, karena TEC yang akan dianalisis adalah nilai TEC yang terjadi sekitar waktu terjadinya *flare* (siang hari). Adapun, garis putus-putus secara vertikal berwarna biru menunjukkan waktu kejadian *flare* M5.1. Bila melihat secara sepintas, nilai VTEC meningkat setelah terjadi *flare* tersebut. Namun, sedikit sulit untuk menentukan waktu mulai peningkatan VTEC, yang disebabkan oleh *flare*, beserta nilai peningkatannya disebabkan waktu *flare* M5.1 tersebut terjadi pada fase naik menuju nilai maksimum ionisasi pada siang hari. Oleh karena itu, dihitung nilai DVTEC per PRN satelit untuk melihat perubahan TEC per menit.

Gambar 3-4 menunjukkan VTEC dan DVTEC dari PRN 21 pada tanggal 10 Maret 2015 di atas Bandung. Garis putus-

putus (*dash-dot line*) vertikal berwarna merah menunjukkan waktu awal terjadinya *flare* yaitu pukul 03.19 UT atau 03.3167 UT (dalam desimal). Selanjutnya, waktu menit dihitung menggunakan sistem desimal untuk memudahkan *plotting* dan perhitungan. Grafik putus-putus berwarna biru adalah nilai VTEC dengan nilai sumbu-y di sebelah kiri, satuannya adalah TECU. Grafik garis berwarna hijau adalah DVTEC dengan nilai sumbu-y di sebelah kanan, satuannya adalah TECU/menit atau  $10^{16}$  elektron/m<sup>2</sup>/menit. Secara fisis DVTEC adalah perubahan peningkatan densitas elektron per satuan waktu. Nilai DVTEC meningkat sangat tajam segera setelah peristiwa *flare* M5.1, yaitu pada pukul 3.35 UT dengan nilai DVTEC sebesar 0,5192 TECU/menit. Data peningkatan DVTEC dan VTEC terkait *flare* M5.1 secara terperinci ditunjukkan pada Tabel 3-2. Peningkatan DVTEC bukan hanya ditunjukkan oleh data dari PRN21, tetapi hampir serentak oleh PRN satelit lainnya yang melintas di atas Bandung pada saat terjadi *flare* M5.1.



Gambar 3-3: VTEC di atas Bandung pada tanggal 10 Maret 2015 sekitar terjadinya *flare* M5.1



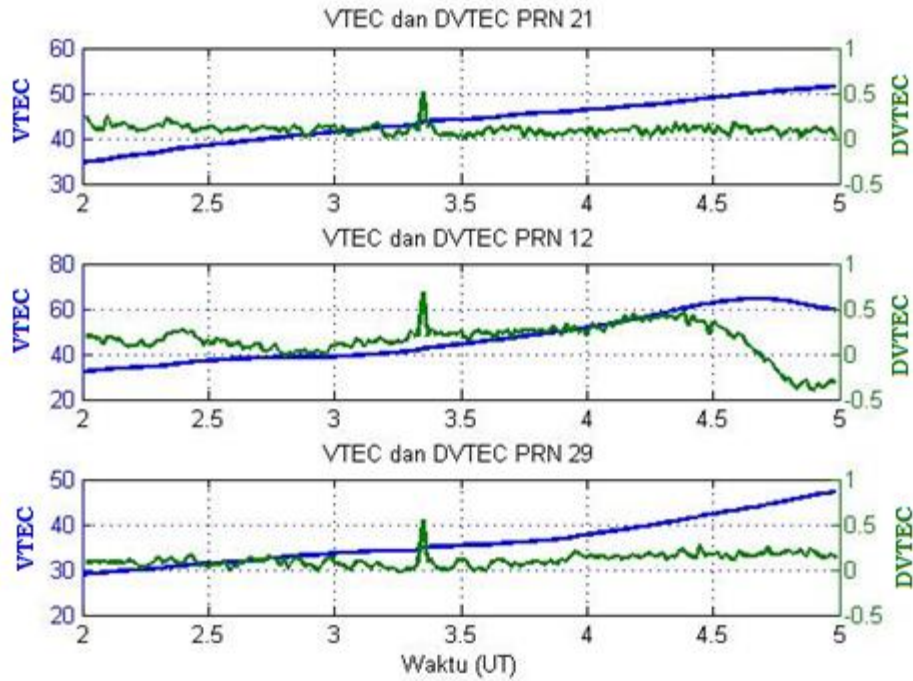
Gambar 3-4: VTEC dan DVTEC dari PRN 21 di atas Bandung pada tanggal 10 Maret 2015

Tabel 3-3. Peningkatan nilai DVTEC dan TEC satelit PRN 21 di atas Bandung terkait dengan flare M5.1

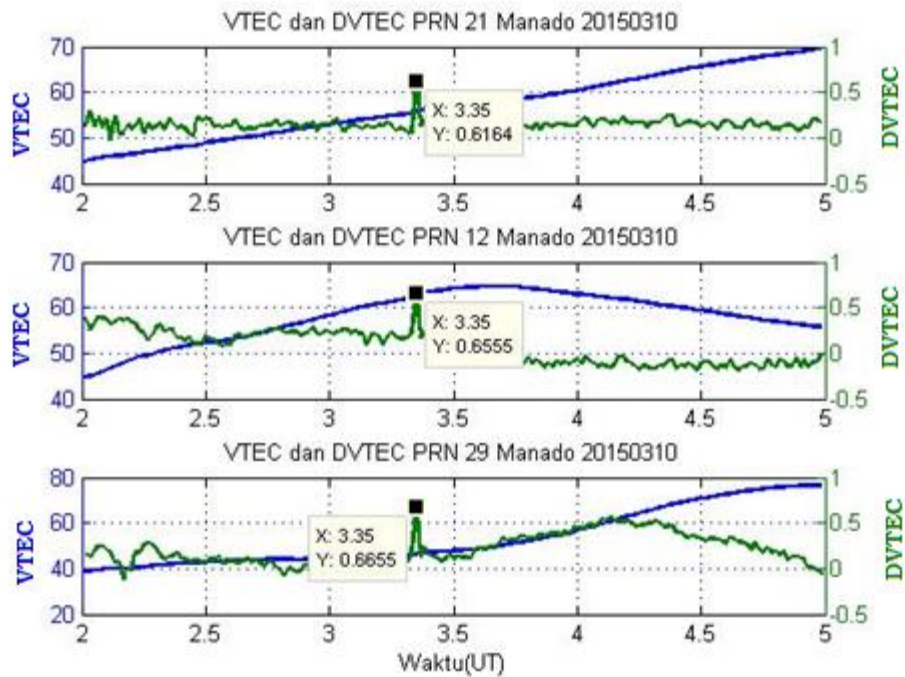
	Waktu (dalam desimal)		Waktu Tunda		Nilai	
	Flare	DVTEC	tDVTEC -Flare_awal	DVTEC	VTEC	
<b>Mulai (UT)</b>	3.3167	3.3330	0.0163 (58 detik)	0,08751	43,0800	
<b>Puncak (UT)</b>	3.4000	<b>3.3500</b>	<b>0.0333 (1 menit 59 detik)</b>	0,51920	43,6000	
<b>Akhir (UT)</b>	3.4667	3.4170	0.1003 (6 menit 6 detik)	0,03243	43,9800	

Gambar 3-5 menunjukkan peningkatan VTEC dan DVTEC yang diperoleh dari GPS PRN 21, PRN 12 dan PRN 29. Nilai DVTEC dari semua PRN tersebut menunjukkan peningkatan yang tajam setelah peristiwa flare M5.1. Adapun waktu tundanya adalah sekitar 2-menit dengan nilai DVTEC sekitar 0,5-TECU/menit. Hal yang sama ditunjukkan

oleh Gambar 3-6 yang diperoleh dari data GPS TEC dari stasiun di Manado. Waktu tunda respon TEC ionosfer adalah sebesar 2 menit dengan DVTEC sekitar 0,6 TECU/menit. Peningkatan DVTEC tersebut ditunjukkan secara serentak dan mendadak oleh semua PRN satelit GPS yang melintas di atas Bandung dan Manado.



Gambar 3-5: Peningkatan DVTEC dan VTEC di atas Bandung, segera setelah peristiwa flare M5.1, dari data PRN 21, PRN12 dan PRN 29



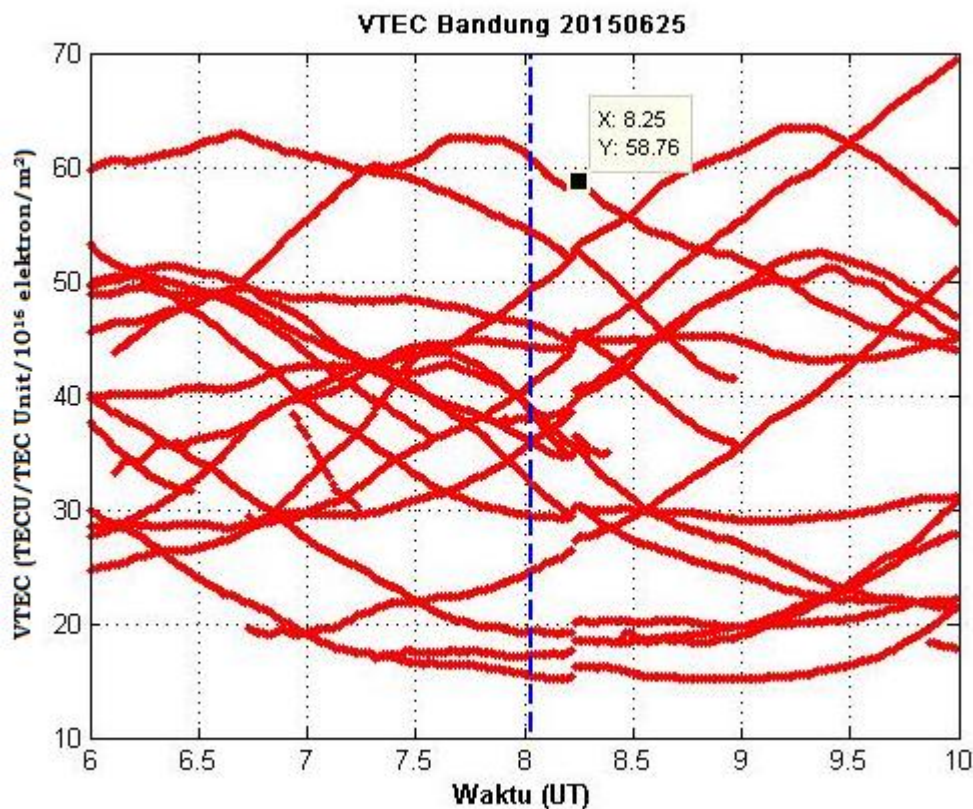
Gambar 3-6: Peningkatan DVTEC dan VTEC di atas Manado, segera setelah peristiwa flare M5.1, dari data PRN 21, PRN12 dan PRN 29

### 3.2. TEC pada tanggal 25 Juni 2015 (flare M7.9)

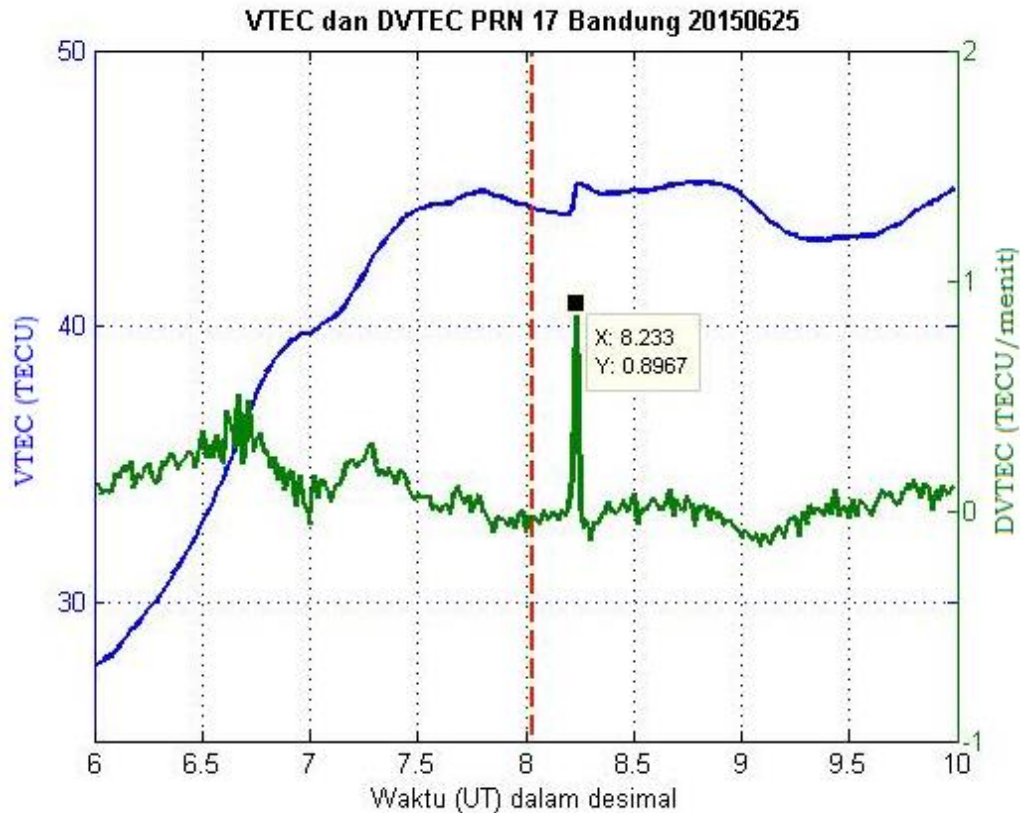
Gambar 3-7 menunjukkan nilai VTEC di atas Bandung dari pukul 06.00 UT sampai dengan 10.00 UT. Garis putus-putus berwarna biru adalah waktu awal peristiwa *flare* M7.9. Setelah terjadi *flare*, peningkatan nilai VTEC secara mendadak dapat terlihat pada grafik ini, yaitu pada pukul 08.25 UT. Nilai VTEC dari semua PRN satelit terlihat tidak simultan, tidak kontinu dan terlihat seperti “melompat” secara tajam. Untuk analisis lebih mendalam, maka akan dihitung nilai DVTEC dari masing-masing PRN satelit tersebut.

Gambar 3-8 menunjukkan nilai VTEC dan DVTEC dari satelit PRN 17 di

atas Bandung. Nilai VTEC ditunjukkan garis berwarna biru sedangkan dengan nilai sumbu-y di sebelah kiri, satuannya TECU. Sedangkan, nilai DVTEC ditunjukkan dengan garis berwarna biru dengan nilai sumbu-y sebelah kanan, satuannya adalah TECU/menit. Peningkatan DVTEC meningkat secara tajam pada pukul 8.2330 UT (dalam desimal) dengan waktu tunda sebesar 11-menit 58 detik dari waktu awal terjadinya *flare* M7.9. Peningkatan VTEC, secara mendadak, sebesar 1,1 TECU ( $1,1 \times 10^{16}$  elektron/m<sup>2</sup>) selama 57 detik. Respon VTEC ionosfer tidak hanya ditunjukkan oleh satelit PRN 17 saja, tetapi ditunjukkan oleh semua satelit PRN yang melintas di atas Bandung di sekitar waktu peristiwa *flare* M7.9.



Gambar 3-7: VTEC di atas Bandung pada tanggal 25 Maret 2015 sekitar terjadinya *flare* M7.9.



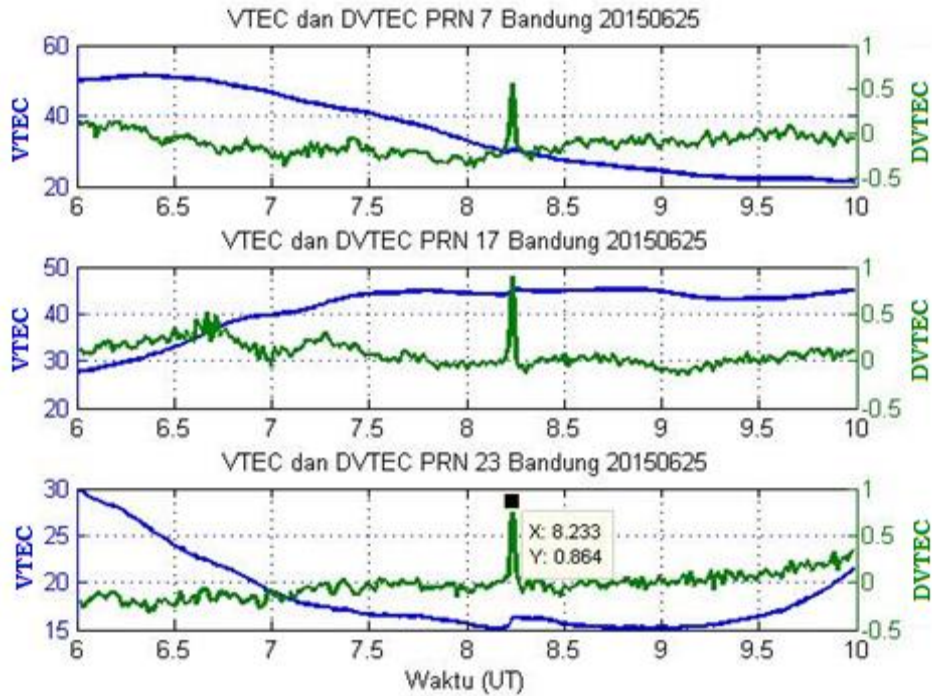
Gambar 3-8: VTEC dan DVTEC dari PRN 17 di atas Bandung pada tanggal 25 Juni 2015

Tabel 3-3. Peningkatan nilai DVTEC dan TEC satelit PRN 17 di atas Bandung terkait dengan *Flare* M7.9

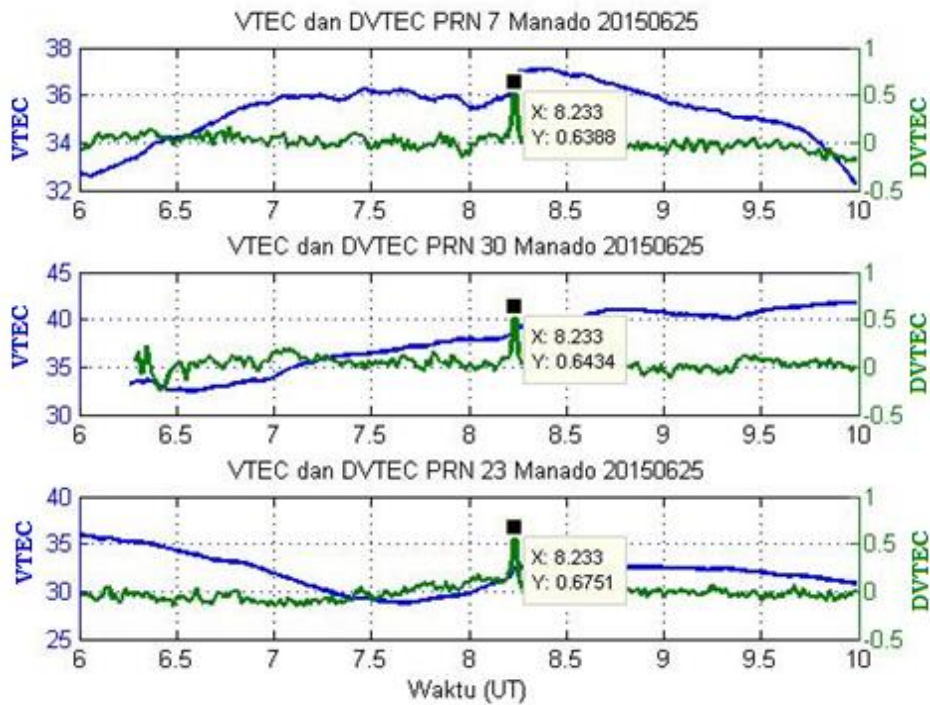
	Waktu (dalam decimal)		Waktu Tunda		Nilai	
	<i>Flare</i>	DVTEC	tDVTEC - <i>Flare</i> awal	DVTEC	VTEC	
<b>Mulai (UT)</b>	8.0333	8.2170	0.1837 (11 menit 10 detik)	0,1643	44,24	
<b>Puncak (UT)</b>	8.2667	<b>8.2330</b>	<b>0.1997 (11 menit 58 detik)</b>	0,8967	45,14	
<b>Akhir (UT)</b>	9.0833	8.3000	0.2667(16 menit)	-0,1268	44,93	

Gambar 3-9 menunjukkan peningkatan VTEC dan DVTEC yang diperoleh dari GPS PRN 7, PRN 17 dan PRN 23 di atas Bandung pada pukul 06.00 UT sampai dengan 10.00 UT. Nilai DVTEC dari semua PRN tersebut menunjukkan peningkatan yang tajam setelah peristiwa *flare* M7.9. Adapun waktunya adalah sekitar 11 menit 58 detik dengan nilai DVTEC bervariasi dari 0,5 sampai dengan 0,9 TECU/menit.

Gambar 3-10 menunjukkan peningkatan nilai VTEC dan DVTEC dari stasiun di Manado. Waktu tunda respon TEC ionosfer di atas Manado juga sebesar sekitar 11 menit 58 detik dengan DVTEC sekitar 0,63 – 0,67 TECU/menit. Peningkatan VTEC dan DVTEC tersebut ditunjukkan secara serentak dan mendadak oleh semua PRN satelit GPS yang melintas di atas Bandung dan Manado setelah peristiwa *flare* M7.9.



Gambar 3-9: Peningkatan DVTEC dan VTEC di atas Bandung, segera setelah peristiwa *flare* M7.9, dari data PRN 7, PRN 17 dan PRN 23.



Gambar 3-10: Peningkatan DVTEC dan VTEC di atas Manado, segera setelah peristiwa *flare* M7.9, dari data PRN 7, PRN 30 dan PRN 23.

#### 4. KESIMPULAN

Metode DVTEC sangat efektif untuk mengetahui respon ionosfer terhadap peristiwa *flare* kelas M, karena dengan hanya menganalisis data VTEC saja tidak terlalu signifikan peningkatannya. Apabila *flare* terjadi pada saat fase naik atau peningkatan ionisasi menuju puncak densitas elektron di siang hari, maka peningkatannya tidak dapat terlihat secara signifikan.

Peningkatan VTEC dan DVTEC terjadi secara serentak dan mendadak yang ditunjukkan oleh semua PRN satelit yang melintas baik di atas Bandung maupun di Manado. Respon TEC ionosfer terhadap *flare* M5.1 dapat terlihat dengan baik dari nilai DVTEC yang meningkat secara tajam sebesar 0,5 – 0,6 TECU/menit serentak pada pukul 03.23 UT atau sekitar 2 menit dari waktu awal terjadinya peristiwa *flare* 5.1. Adapun peningkatan VTEC sekitar 0,5 TECU. Begitu juga dengan peningkatan nilai VTEC dan DVTEC sebagai respon terhadap *flare* M7.9, terjadi secara serentak dan mendadak ditunjukkan oleh semua PRN satelit yang melintas baik di atas Bandung maupun di Manado. Nilai DVTEC meningkat secara tajam sebesar 0,6 – 0,9 TECU/menit serentak pada pukul 08.13 UT atau sekitar 11 menit dari waktu awal terjadinya peristiwa *flare* 7.9 dan peningkatan VTEC sebesar 1,1 TECU.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFS) Pusat Sains Antariksa, tim jaringan LAPAN, serta tim BPD Manado atas ketersediaan data ionosfer. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dr. Buldan Muslim,

yang telah mengarahkan dalam metode pengolahan data TEC.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Appleton, E. V., 1946. “*Two anomalies in the ionosphere*”, *Nature*, 157, 691, doi: 10.1038/157691a0.
- Asnawi, S. Ekawati dan D. U. Prabowo, 2012. “*Variasi Total Electron Content Ionosfer pada awal Peningkatan Aktivitas Matahari siklus ke-24*”, *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara*, ISSN:1907-0713, Vol.7, No.1, Maret 2012.
- Ekawati, S. dan W. Srigutomo, 2013. “*Analisis Ketidakteraturan Plasma Ionosfer pada saat aktivitas matahari tinggi diatas Indonesia*”, *Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2013*, ISBN 978-602-19655-5-9, Hal. 322-328.
- IPS, diunduh bulan Juli, 2015. “*Introduction to HF Radio Propagation*”, web diunduh di : <http://www.ips.gov.au/Category/Educational/Other%20Topics/Radio%20Communication/Intro%20to%20HFRadio.pdf>
- Kelley, M.C., 1989. “*The Earth’s Ionosfer: Plasma Physics and Electrodynamics*”, Academic Press, USA.
- Klobuchar, J., 1986. “*Design and Characteristic of the GPS Ionospheric Time-delay Algorithm for Single Frequency Users*”, *Proceedings of PLANS’86 – Position Location and Navigation Sysmposium*, Las Vegas, Nevada, p. 280-286, 4 – 7 November.
- Liu, J.H., C.H. Lin, Y.I. Chen, Y.C. Lin, T. W. Fang, C.H. Chen, Y.C. Chen, and J.J. Hwang, 2006. “*Solar Flare Signature of the ionospheric GPS Total Electron Content*”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, A05308.
- Muslim, B., 2014. “*Deteksi efek Flare Sinar-X pada Ionosfer dari Data Total Electron Content yang diturunkan dari pengamatan GPS*”, *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara*, Vol 9, No.2, Desember 2014:43-52.



- Y. Sahai, F. Becker-Guedes, P. R. Fagundes, W. L. C. Lima, A. J. de Abreu, F. L. Guarnieri, C. M. N. Candido, and V. G. Pillat, 2007. "Unusual ionospheric effects observed during the intense 28 October 2003 solar flare in the Brazilian sector", *Ann. Geophys.*, 25, 2497–2502, 2007.
- Suratno, dan S. Suhartini, 2011. "Analisis Asosiasi Semburan Radio Matahari Tipe III dengan Flare Sinar-X dan Frekuensi Minimum Ionosfer", *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol.8, No.2 Juni 2011, ISSN: 1412-808X
- Tripathi, S.C., P.A. Khan, A. Ahmad, P. Bhawre, P.K. Purohit, A.K. Gwal, 2011." *Effect of Enhance X-Rays Flux on the D and F Layer Ionization during Extrem Solar Event*", Proceeding of the 2011 IEEE International Conference and Communication (IconSpace) 12-13 Juli 2011, Penang, Malaysia.
- Xiong, Bo, W. Wan, L. Liu, P. Withers, B. Zhao, B. Ning, Y. Wei, H. Le, Z. Ren, Y. Chen, M. He, and J. Liu, 2011. "Ionospheric response to the X-class solar flare on 7 September 2005", *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, A11317, doi:10.1029/2011JA01691, 2011.



**PENGARUH AKTIVITAS MATAHARI TERHADAP KERAPATAN  
ATMOSFER ATAS BERDASARKAN DATA POSISI  
GPS SATELIT LAPAN-A2  
(SOLAR ACTIVITY INFLUENCE ON THE UPPER ATMOSPHERIC  
DENSITY DERIVED FROM GPS DATA ON  
LAPAN-A2 SATELLITE)**

Tiar Dani\*)<sup>1</sup>, Rhorom Priyatikanto\*), Slamet Supriadi\*), Abdul Rachman\*), Amrullah A. Qadir\*\*)

\*)Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jl. Dr. Djundjuran 133 Bandung 40173 Indonesia

\*\*\*)Pusat Teknologi Satelit

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jl. Cagak Satelit KM 4 Rancabungur Indonesia

<sup>1</sup>e-mail: tiar.dani@lapan.go.id.

Diterima 6 Februari 2017; Direvisi 22 November 2017; Disetujui 22 November 2017

**ABSTRACT**

Studies on atmospheric density were very important to obtain a correction factor for the atmospheric density model. Thus, improvement of atmospheric models accuracy, i.e. CIRA, JASCHIA, NRLMSISE, became important in its application for re-entry prediction, satellite tracking and mitigation of the collisions probability between active satellites with space debris. GPS equipment installed in LAPAN-A2 indirectly measured the upper atmospheric density variation in-situ from the satellite orbit path. Notwithstanding the measurement had a lower temporal resolution than using accelerometer, but still gives better resolution than using Two-Line Element (TLE) data. This study had successfully determined upper atmospheric density variation with a 10 second resolution using LAPAN-A2 GPS data. The LAPAN-A2 GPS data validated using In-track Radial Cross-track (RIC) had  $\pm 2$  km error compared to the TLE data. It was also found that there was influence of solar activity on atmospheric density changes obtained from the LAPAN-A2 GPS data.

Keyword: *upper atmospheric density, GPS LAPAN-A2, solar activities, Two-Line Element (TLE)*

## ABSTRAK

Studi kerapatan atmosfer atas sangat penting untuk memperoleh faktor koreksi dari suatu model kerapatan atmosfer. Peningkatan akurasi dari model atmosfer yang telah ada (CIRA, JASCHIA, NRLMSISE) sangat penting dalam penerapannya untuk prediksi *re-entry*, penjejakan satelit dan prakiraan kemungkinan terjadinya tabrakan antara satelit aktif dengan sampah antariksa. Peralatan GPS yang terpasang di satelit LAPAN-A2 secara tidak langsung dapat melakukan pengukuran *in-situ* perubahan kerapatan atmosfer atas dari orbit yang dilaluinya, meskipun tingkat resolusi temporalnya masih lebih rendah dibandingkan menggunakan instrumen akselerometer tetapi masih jauh lebih baik dibandingkan menggunakan data *Two-Line Element* (TLE). Studi ini telah berhasil memperoleh variasi kerapatan atmosfer atas dengan resolusi 10 detik menggunakan data posisi GPS LAPAN-A2. Selain itu, diperoleh pula tingkat kesalahan dalam koordinat satelit (*Radial Intrack Crosstrack* - RIC) data TLE terhadap data posisi GPS LAPAN-A2 sebesar  $\pm 2$  km. Selain itu terlihat pula pengaruh aktivitas matahari terhadap perubahan kerapatan atmosfer atas yang diperoleh dari data posisi GPS LAPAN-A2

Kata kunci: *kerapatan atmosfer atas, GPS LAPAN-A2, aktivitas matahari, Two-Line Element (TLE)*

### 1 PENDAHULUAN

Studi kerapatan atmosfer sangat penting bagi keberlangsungan misi suatu satelit selama berada di orbitnya. Gangguan dari radiasi matahari, terjadinya badai geomagnet, serta dinamika atmosfer netral dapat meningkatkan kerapatan atmosfer atas dan gaya hambat satelit (Vallado, 2001; Delgado, 2008; Lechtenberg, 2010). Model-model kerapatan atmosfer yang banyak dibangun masih membutuhkan koreksi dengan melakukan pengukuran secara *in-situ* dengan resolusi temporal yang tinggi sehingga perubahan yang bersifat sesaat akibat cuaca antariksa dapat terlihat dan sebagai koreksi untuk model atmosfer yang telah ada.

Pengukuran kerapatan atmosfer secara *in-situ* dilakukan dengan berbagai metode dan instrumen seperti akselerometer, spektrometer massa, *airglow ultraviolet imager*, hingga rekonstruksi orbit satelit berdasarkan pengamatan optik dan radar Doornbos (2011). Studi untuk kerapatan atmosfer selama siklus matahari ke-23 pada ketinggian 400 – 800 km dengan menggunakan data *Two-line Element* (TLE) multi satelit telah dilakukan oleh Dani (2013); Dani dan Rachman (2013) melakukan studi kerapatan atmosfer menggunakan data TLE satelit LAPAN-Tubsat tahun 2008-2011 dan Dani dan Neflia (2014) kemudian

membandingkannya dengan TLE dari satelit berorbit ekuatorial. Hasil studi tersebut menemukan bahwa pengukuran kerapatan atmosfer berdasarkan data TLE memiliki resolusi temporal yang rendah (dalam orde hari). Hal ini berbeda jika kerapatan atmosfer diperoleh dari pengukuran menggunakan akselerometer atau *Global Positioning System* (GPS) yang dapat memberikan peluang untuk memahami variasi temporal dan spasial kerapatan atmosfer atas dengan orde yang lebih kecil (dalam orde detik/milidetik) (misalnya Young, 2001; van den van den Ijssel, 2014) sehingga pengaruh perubahan kerapatan atmosfer atas akibat peristiwa transien di matahari ataupun pada lapisan magnetosfer Bumi dapat dipelajari. Satelit baru milik LAPAN membuka peluang untuk studi kerapatan atmosfer atas menggunakan GPS.

LAPAN-A2 diluncurkan 28 September 2015 mengitari Bumi pada orbit ekuatorial dengan inklinasi  $6^\circ$  dan ketinggian 638 – 658 km. Dibandingkan pendahulunya (LAPAN-Tubsat), terdapat peningkatan dan penambahan peralatan pada LAPAN-A2 seperti GPS, sensor bintang dan Matahari, *on-board solid state memory*, serta panel surya dengan kapasitas lebih besar (Hardhienata et al., 2011).

Posisi satelit LAPAN-A2 sebagai fungsi waktu diperoleh menggunakan sensor GPS tipe VGPS-51 yang dibuat khusus untuk ditempatkan di ruang angkasa dengan *receiver* frekuensi tunggal 12 channel. Untuk mengurangi waktu tunda saat menerima sinyal GPS, terutama setelah *Power-On* atau *Reset*, VGPS-51 dilengkapi informasi awal dari lintasan satelit tersebut untuk mengakomodasi penerimaan sinyal pada ketinggian dan kecepatan tinggi. Dengan memanfaatkan GPS yang ada pada satelit LAPAN-A2, dapat diperoleh data posisi yang akurat dan beresolusi tinggi sebagai masukan untuk memperkirakan kerapatan atmosfer atas yang dilalui satelit ini.

Tujuan dari studi ini untuk mengetahui pengaruh aktivitas matahari terhadap variasi perubahan kerapatan atmosfer atas dalam skala temporal tinggi yang tidak dapat dilakukan dengan menggunakan data TLE. Studi ini mempergunakan data posisi GPS yang ditempatkan di satelit LAPAN-A2 untuk memperoleh kerapatan atmosfer atas.

## 2 DATA

Menurut Hussou (2006), data navigasi GPS dari VGPS-51 terdiri atas waktu dalam hitungan minggu dan hitungan detik per minggu, waktu dalam UTC, posisi ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) dalam meter, kecepatan geosentris ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) dalam meter/detik, kondisi navigasi, jumlah satelit terakuisisi, serta *Positional dilution of precision* (PDOP).

Saat operasional LAPAN-A2, sensor GPS tidak rutin dinyalakan dan hanya digunakan sesekali sebagai koreksi orbit untuk penjejukan satelit tersebut. Beberapa hal yang menjadi kendala untuk akuisisi data posisi GPS pada LAPAN-A2 adalah permasalahan manajemen sumber daya listrik sehingga GPS tidak dapat dinyalakan secara terus menerus untuk memperoleh data, permasalahan manajemen penyimpanan data/*buffering* pada *on-board Solid State Memory* di satelit yang sangat terbatas,

permasalahan pengambilan data dari *buffer* pada satelit hanya dapat diunduh dari stasiun bumi di Rumpin dan Biak, dan permasalahan skala prioritas yaitu misi utama LAPAN-A2 adalah *Automatic Identification System* (AIS) untuk pemantauan kapal di laut dan *Imagery*. Dari kendala tersebut, maka akuisisi data posisi GPS oleh LAPAN-A2 hanya dapat dilakukan 1 kali setiap bulan selama 1 kali revolusi satelit mengeliling Bumi dengan resolusi sekitar 10 detik. Berikut ini contoh akuisisi data posisi GPS dari satelit LAPAN-A2:

```
-----
2016/03/19 02:50:02: Read Buffer Command
ST02
Message ID      : F40
GPS week        : 1888
GPS sec of week : 528618.00000 s
GPS UTC         : -1579932.61 s
Signed x        : -1579932.61 m
Signed y        : +6805071.90 m
Signed z        : +731409.21 m
Signed Vx       : -6840.88997 m/s
Signed Vy       : -1591.59091 m/s
Signed Vz       : +61.61822 m/s
Navigation status : 3D Nav
No. of tracked sat : 8
PDOP            : 2.5
Checksum        : 61
ETX             : 03
-----
```

Selain data posisi GPS, untuk memperoleh kerapatan atmosfer memerlukan sumber data lain, yaitu parameter fisik berupa bentuk dan berat satelit LAPAN-A2 dari Pusat Teknologi Satelit LAPAN. Data ini dipergunakan untuk mengestimasi koefisien balistik satelit LAPAN-A2.

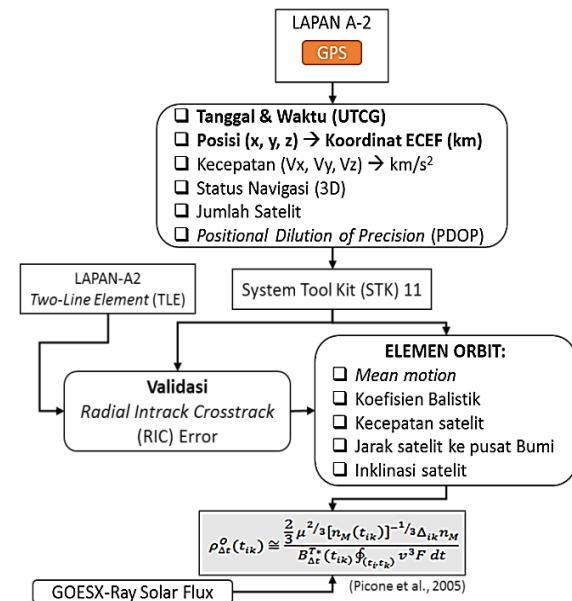
Diperlukan pula data TLE satelit LAPAN-A2 dari Departemen Pertahanan Amerika Serikat melalui USSTRATCOM di situs <https://www.space-track.org> yang akan dipergunakan untuk memvalidasi data posisi GPS LAPAN-A2 yang diperoleh.

Untuk melihat pengaruh dari aktivitas matahari terhadap variasi kerapatan atmosfer atas dipergunakan sumber data *GOES X-ray Solar Flux* dan *Solar and Geophysical Event Report* dari *Space Weather Prediction Center (SWPC) NOAA* (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov>).

### 3 METODE

Gambar 3-1 menunjukkan metodologi studi ini dimulai dari akuisisi data posisi GPS hingga diperolehnya kerapatan atmosfer dan pengaruh aktivitas matahari terhadap variasi kerapatan atmosfer yang diperoleh. Hasil dari pengamatan GPS LAPAN-A2 terutama data tanggal dan waktu dalam *Coordinated Universal Time (UTC)*, serta *vector* posisi satelit ( $x, y, z$ ) dalam koordinat *Earth Center Earth Fixed (ECEF)* posisi akan menjadi input dalam *System Tool Kit (STK) 11* untuk validasi akuisisi data posisi GPS LAPAN-A2 yang diperoleh dengan cara membandingkan perbedaan posisi yang diperoleh dari data TLE LAPAN-A2 dan data posisi GPS. Nilai kesalahan posisi antara GPS LAPAN-A2 dengan TLE diperoleh dari perbedaan posisi kedua pengukuran pada sistem koordinat satelit *Radial Transverse Normal (RSW)*. Sistem koordinat RSW telah umum digunakan dalam mendeskripsikan posisi satelit terhadap situs pengamatan (*sensor site*). Sistem ini terdiri dari komponen *radial, in-track*, dan *cross-track*. Adapun sistem koordinat *True Equator Mean Equinox (TEME)* adalah sistem koordinat yang dipakai untuk data TLE (Vallado dkk., 2006). Untuk transformasi dari *Earth Centered Inertial (ECI)* ke RSW, vektor GPS dijadikan sebagai *baseline*. Dengan demikian, vektor TLE ditransformasi dari ECI ke kerangka RSW yang didefinisikan oleh *baseline* vektor tadi. Galat *Radial In-track Cross-track (RIC)* yang dicari adalah selisih set vektor GPS dan TLE dalam koordinat RSW tersebut. Kahr et al. (2010) menemukan bahwa penggunaan data posisi GPS yang singkat untuk propagasi TLE akan mampu

mempertahankan akurasi elemen orbit tersebut hingga satu minggu, terutama pada posisi *cross-track*. Penentuan validasi data posisi GPS dengan membandingkan dengan TLE pada *epoch* yang sama kemudian dihitung *RIC error* menggunakan STK versi 11. Input yang dimasukkan adalah waktu, posisi dan kecepatan dari data posisi GPS serta data TLE dari *Space-Track* pada *epoch* yang berdekatan.



Gambar 3-1: Metodologi yang dipergunakan dalam penelitian ini

Setelah dilakukan proses validasi terhadap data posisi GPS yang diperoleh kemudian dihitung elemen orbit yang diperlukan dengan menggunakan STK 11 untuk diperoleh kerapatan atmosfer atas yang dilalui oleh LAPAN-A2 menggunakan Persamaan (3-1) dari Picone et al. (2005)

$$\rho_{\Delta t}^0(t_{ik}) \cong \frac{2}{3} \mu^{2/3} [n_M(t_{ik})]^{-1/3} \Delta_{ik} n_M / B_{\Delta t}^{T*}(t_{ik}) \int_{t_k \rightarrow t_i} v^3 F dt \quad (3-1)$$

Seluruh parameter dari Persamaan (3-1) diperoleh dari STK 11 kemudian dihitung nilai kerapatan atmosfernya. Parameter dalam Persamaan (3-1) dijelaskan sebagai berikut:

- $t_{ik}$  = selang waktu iterasi yang dipilih :  $t_{ik} \equiv (t_i + t_k)/2$ , untuk studi ini selang waktu yang dipergunakan 10 detik,

- $\rho_{\Delta t}^0(t_{ik})$  = kerapatan atmosfer total dalam selang waktu  $t_{ik}$  (kg/m<sup>3</sup>),
- $\mu = GM$ , perkalian konstanta gravitasi dan massa Bumi ( $3,986 \times 10^{14}$  m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>),
- $\Delta_{ik}n_M = n_M(t_k) - n_M(t_i)$ , selisih *mean motion* pada selang waktu  $t_{ik}$ ,
- $n_M(t_{ik})$  = perubahan rata-rata dari *mean motion* dalam selang waktu  $t_{ik}$ ,
- $B$  = koefisien balistik (m<sup>2</sup>/kg) dengan:  $B = b^{-1} = \frac{C_D A}{m}$  dengan  $C_D$  = koefisien hambatan,  $A$  = luas permukaan yang berhadapan langsung dengan arah gerak (*cross section area*-m<sup>2</sup>), dan  $m$  = massa satelit (kg). Untuk LAPAN-A2, nilai koefisien balistik  $\approx 0,012$  dengan asumsi koefisien hambatan ( $C_D$ ) LAPAN-A2  $\approx 0,0592$ ,  $A = 15$  m<sup>2</sup> dan  $m = 74$  kg,
- $v$  = kecepatan satelit (m/s),
- $F = \text{wind factor}$  (tidak berdimensi) :  $F \cong \left(1 - \frac{r\omega}{v} \cos i\right)^2$  (King-Hele, 1987) dengan  $r$  = jarak satelit ke pusat Bumi (m),  $\omega$  = kecepatan sudut rotasi Bumi (m/s),  $i$  = sudut inklinasi satelit.

Nilai kerapatan atmosfer yang telah diperoleh kemudian dilakukan analisis variasi kerapatan atmosfer akibat pengaruh aktivitas matahari, yaitu fluks sinar-X dengan resolusi yang sama dengan data posisi GPS.

#### 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Validasi Data posisi GPS LAPAN-A2

Tabel 4-1 menunjukkan waktu dan durasi data posisi GPS LAPAN-A2 yang berhasil diakuisisi. Rentang waktu terpendek data yang berhasil diakuisisi adalah tanggal 7 September 2016 selama 42 menit dan data terpanjang yang berhasil diperoleh adalah tanggal 6 Oktober 2016 selama 2 jam 41 menit dan 30 detik. Keseluruhan data tersebut memiliki resolusi 10 detik. Waktu yang diperlukan LAPAN-A2 untuk melakukan satu kali revolusi mengelilingi Bumi berkisar 100 menit.

Data posisi GPS hasil akuisisi dari LAPAN-A2 perlu divalidasi untuk memastikan bahwa data tersebut telah sesuai, yaitu dengan membandingkan

posisi satelit LAPAN-A2 hasil pengukuran dari GPS dengan data TLE dari *Space-Track* pada *epoch* yang berdekatan. Untuk kedua set data harus memiliki sistem koordinat yang sama (GPS dan TLE). Vektor GPS yang berupa koordinat ECEF perlu ditransformasikan terlebih dahulu menjadi koordinat ECI. Transformasi dilakukan berdasarkan formula IAU-76/FK5 untuk memperoleh vektor J2000. Adapun untuk data TLE, dibuat dulu vektor posisi hasil propagasi ke *epoch* yang bersesuaian dengan *epoch* GPS. Vektor TLE dalam koordinat TEME ini kemudian ditransformasi ke ECEF lalu ke ECI. Dengan demikian, kedua set data dinyatakan dalam koordinat ECI. Keseluruhan proses tersebut dilakukan dengan menggunakan STK 11.

Tabel 4-1: WAKTU DAN DURASI DATA POSISI GPS SATELIT LAPAN-A2 YANG BERHASIL DIAKUISI DAN DIANALISIS DALAM STUDI INI

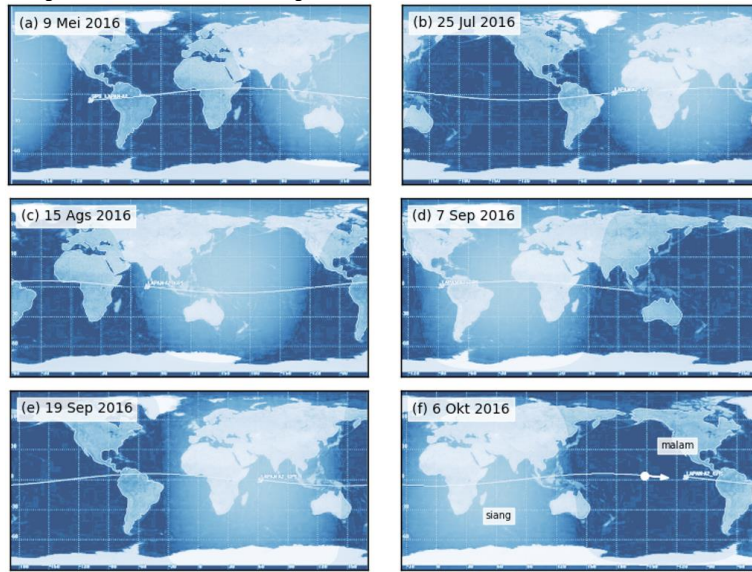
2016		
Tanggal	Waktu (UTC)	Durasi (menit)
09-May	02:07:37 - 03:52:37	1:45:00
25-Jul	07:15:07 - 09:16:17	2:01:10
15-Aug	01:59:07 - 03:38:07	1:39:00
7-Sep	13:25:47 - 14:07:47	0:42:00
19-Sep	08:16:07 - 10:11:27	1:55:20
06-Oct	08:40:17 - 11:21:47	2:41:30

Lintasan satelit LAPAN-A2 selama melakukan akuisisi data posisi GPS diperlihatkan pada Gambar 4-1. Pada sebagian besar kasus, satelit hampir melakukan 1 revolusi penuh mengitari Bumi serta melalui daerah siang dan malam. Pengukuran pada tanggal 7 September hanya mencakup sekitar separuh orbit satelit, sementara pengukuran pada 6 Oktober mencakup sekitar dua kali orbit.

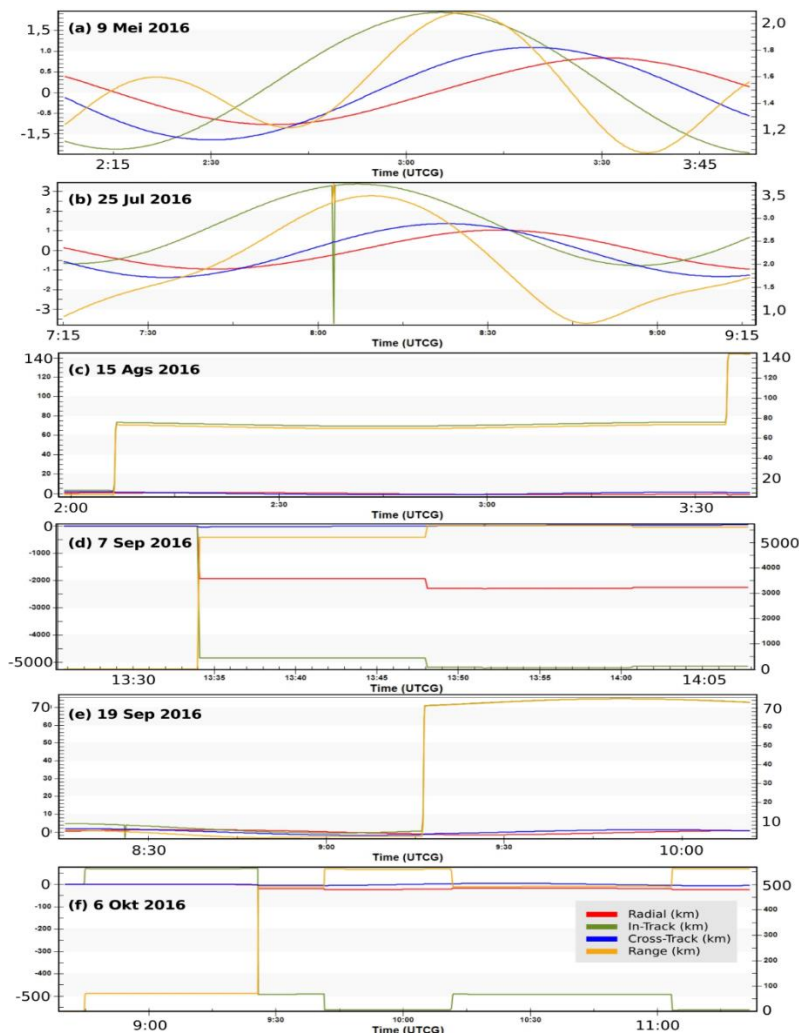
Gambar 4-2 menunjukkan perbedaan posisi menurut TLE dan posisi menurut GPS pada arah *In-Track*, *Cross-Track* dan *Radial*. Pada kasus pengukuran 9 Mei 2016, terlihat bahwa kesalahan posisi dari TLE terhadap GPS untuk *In-track* dapat mencapai  $\pm 1,9$  km dan untuk *cross-track* dan *radial* sekitar  $\pm 1$  km. Nilai perbedaan *in-track* dari TLE

terhadap GPS akan menyebabkan nilai dari kerapatan atmosfer yang diperoleh dari data TLE menjadi tidak akurat jika

dibandingkan dengan menggunakan data posisi GPS.



Gambar 4-1: Lintasan satelit LAPAN-A2 (kurva putih) selama melakukan akuisisi data posisi GPS pada berbagai waktu/*epoch*. Satelit bergerak dari barat ke timur melalui daerah siang dan malam hari



Gambar 4-2: Perbedaan posisi satelit menurut data posisi GPS dan hasil propagasi TLE pada *epoch* yang sesuai. Perbedaan dinyatakan dalam kilometer dan diuraikan menjadi perbedaan arah *radial* (merah), *in-track* (hijau), *cross-track* (biru), serta *range* (jingga)



Pada 25 Juli, LAPAN-A2 melakukan akuisisi data dimulai di atas Samudra Atlantik. Perbedaan posisi TLE terhadap GPS untuk *in-track* dapat mencapai  $\pm 3$  km dan untuk *cross-track* dan *radial* sekitar  $\pm 1,5$  km. Perbedaan ini masih dapat diterima mengingat satelit LAPAN-A2 mengorbit pada ketinggian  $\sim 600$  km dan bergerak dengan kecepatan  $\sim 700$  km/detik.

Perbedaan yang lebih besar terjadi pada kasus akuisisi tanggal 15 Agustus dan setelahnya. Pada kasus akuisisi 15 Agustus, perbedaan *in-track* mencapai  $\pm 140$  km sementara perbedaan arah *cross-track* dan *radial* hanya bernilai sekitar  $\pm 1,5$  km.

Perbedaan terbesar terjadi hanya pada komponen *Range* dan komponen *In-track*. Untuk komponen *Radial* dan *Cross-track* tidak ada perbedaan signifikan dan nyaris berimpitan dengan harga RIC yang diperoleh dari propagasi TLE. Kemungkinan, perbedaan terjadi karena adanya perbedaan data posisi dan waktu GPS yang tidak sinkron mengingat ada beberapa data yang hilang (*data lompat/skipped data*). Kesalahan dapat pula ditimbulkan oleh data dan propagasi TLE yang tidak akurat. Komponen *In-track* yang paling besar mengalami perbedaan dengan data TLE karena komponen tersebut yang mengalami perubahan paling besar sebagai fungsi waktu, sebanding dengan kecepatan orbit satelit. Untuk komponen *Radial* dan *Cross-track*, nilainya relatif konstan.

Akuisisi tanggal 7 September merupakan akuisisi dengan durasi paling singkat. Saat itu, satelit melintas dari ruang di atas Amerika Selatan hingga ruang di atas Laut Jawa. Pada *epoch* tersebut, kesalahan posisi dari TLE terhadap GPS untuk *In-track* yang mencapai hingga  $\pm 5000$  km dan untuk *cross-track* sekitar  $\pm 1,5$  km, serta *radial* sekitar  $\pm 2500$  km.

Perbedaan dengan pola yang mirip juga teramati pada data 19 September dan 6 Oktober, tetapi dengan amplitudo yang lebih rendah. Pada kasus 19

September, perbedaan antara posisi TLE dan GPS arah *In-track* yang mencapai  $\pm 8$  km yang kemudian pada sekitar pukul 09:15 UT meningkat menjadi  $\pm 74$  km sementara untuk *cross-track* dan *radial* hanya bernilai sekitar  $\pm 2$  km. Pada 6 Oktober, perbedaan arah *in-track* dan *range* mencapai  $\pm 500$  km.

#### 4.2 Kerapatan Atmosfer dan Pengaruh Aktivitas Matahari

Penentuan kerapatan atmosfer berdasarkan elemen orbit satelit menggunakan Persamaan (3-1) dari Picone et al. (2005) yang seluruh *input*-nya (elemen orbit, kecepatan *in-track* dan percepatan *in-track*) diperoleh dari ekstraksi data posisi GPS dengan menggunakan STK 11.

Tabel 4-2 menunjukkan nilai kerapatan atmosfer berdasarkan model Harris Priester dalam Vallado (2001). Ketinggian tersebut merupakan ketinggian yang dilalui oleh LAPAN-A2 (*perigee* dan *apogee*). Perbedaan kerapatan minimum dan maksimum diakibatkan adanya pengaruh aktivitas matahari. Saat aktivitas matahari maksimum, maka nilai kerapatan atmosfer akan maksimum pula, begitupun sebaliknya.

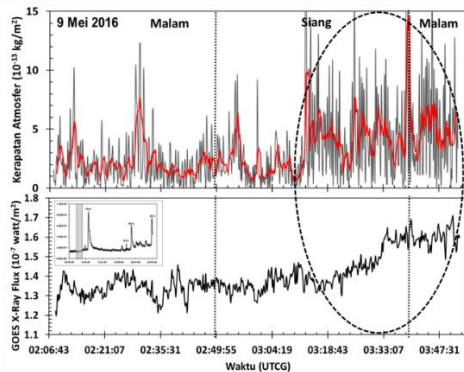
Tabel 4-2: NILAI KERAPATAN ATMOSFER BERDASARKAN MODEL HARRIS PRIESTER (Vallado, 2001)

Ketinggian (km)	Densitas Minimum ( $\text{kg/m}^3$ )	Densitas Maximum ( $\text{kg/m}^3$ )
620	$6,012 \times 10^{-14}$	$5,123 \times 10^{-13}$
640	$4,519 \times 10^{-14}$	$4,121 \times 10^{-13}$
660	$3,430 \times 10^{-14}$	$3,325 \times 10^{-13}$

Nilai kerapatan atmosfer berdasarkan data posisi GPS yang diperoleh untuk seluruh data lebih mendekati nilai kerapatan atmosfer sesuai dengan model ( $\sim 10^{-13} \text{ kg/m}^3$ ). Pengaruh siang malam terhadap perubahan kerapatan atmosfer tidak terlihat dari seluruh data yang telah diolah, meski secara teori pada siang hari

nilai kerapatan atmosfer lebih tinggi dibandingkan malam hari. Hal ini dimungkinkan kontribusi dari perubahan siang malam tidak memberikan perubahan kerapatan atmosfer yang signifikan karena akuisisi data posisi GPS dilakukan saat satelit bergerak dengan kecepatan hingga 700 km/s.

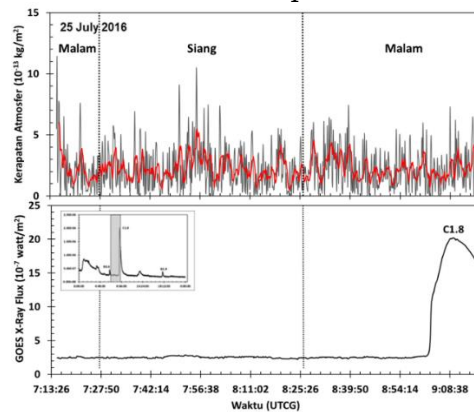
Gambar 4-3 menunjukkan variasi nilai kerapatan atmosfer mengalami kenaikan seiring dengan naiknya fluks sinar-X (lingkaran hitam putus-putus) meskipun kenaikan sinar-X fluks tersebut bukan disebabkan oleh peristiwa transien seperti *flare*. Gambar inset di panel bawah menunjukkan kondisi fluks dalam satu hari, dan daerah berwarna abu-abu merupakan waktu pengamatan dilakukan/nilai kerapatan atmosfer. Terlihat adanya kenaikan gradual fluks sinar-X yang mengindikasikan adanya peningkatan aktivitas di Matahari pada waktu tersebut sebelum terjadi *flare* kelas B9.4 pada sekitar pukul 05:00 UT berdasarkan data *Solar and Geophysical Event Report* dari *Space Weather Prediction Center* (SWPC) NOAA.



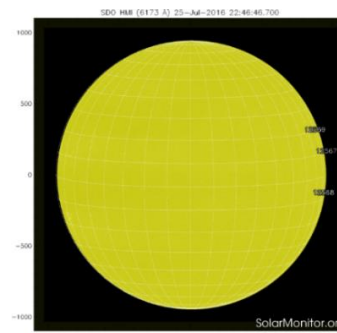
Gambar 4-3: Plot kerapatan atmosfer dari data posisi GPS (panel atas) disandingkan fluks sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES pada tanggal 9 Mei 2016 pukul 02:07:37 hingga 03:52:37 UT. Garis merah pada panel atas menunjukkan nilai rata-rata (*moving average*) setiap menit. Gambar inset pada panel bawah merupakan plot fluks sinar-X dalam sehari di tanggal 9 Mei 2016

Gambar 4-4 menunjukkan variasi nilai kerapatan atmosfer stabil karena fluks sinar-X juga tidak mengalami

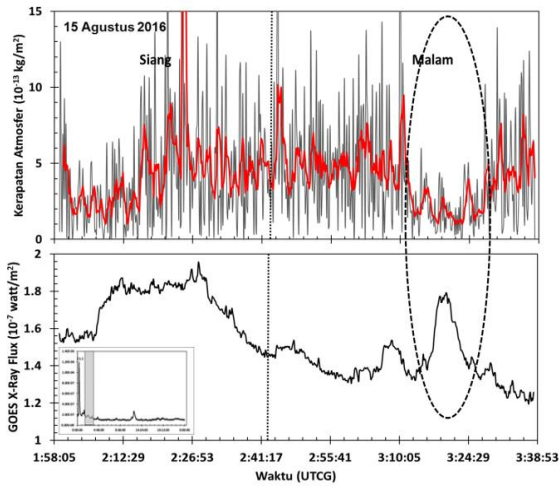
peningkatan yang berarti, kecuali pada akhir pengamatan terjadi peristiwa transien *flare* kelas C1.8 dari NOAA 12567. Kenaikan signifikan dari fluks sinar-X akibat *flare* ini tidak memberikan pengaruh terhadap peningkatan kerapatan atmosfer karena lokasi daerah aktif tersebut berada di tepi barat piringan Matahari berdasarkan pengamatan Matahari oleh satelit SDO pada citra panjang gelombang tampak tanggal 25 Juli 2016 (Gambar 4-5). Gambar inset menunjukkan kondisi fluks dalam satu hari, dan daerah berwarna abu-abu merupakan waktu pengamatan dilakukan/nilai kerapatan atmosfer. Terlihat pada akhir pengamatan terjadi *flare* kelas C1.8 sekitar pukul 09:36 UT.



Gambar 4-4: Plot kerapatan atmosfer dari data posisi GPS (panel atas) disandingkan fluks sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES pada 25 Juli 2016 pukul 07:15:07 hingga 09:16:17 UT. Garis merah pada panel atas menunjukkan nilai rata-rata (*moving average*) setiap menit. Gambar inset pada panel bawah merupakan plot fluks sinar-X dalam sehari di tanggal 25 Juli 2016



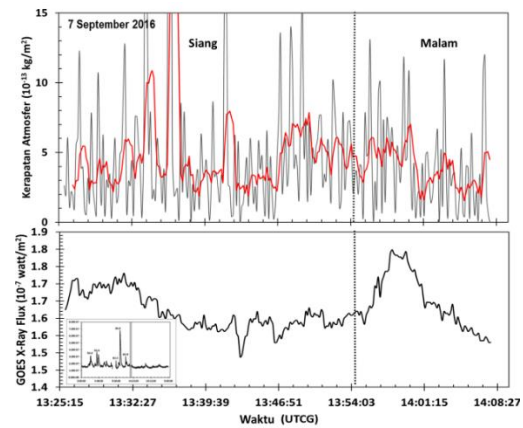
Gambar 4-5: Citra pengamatan Matahari dan daerah aktifnya pada tanggal 25 Juli 2016 dari satelit SDO. Sumber: Solarmonitor.org



Gambar 4-6: Plot kerapatan atmosfer dari data posisi GPS (panel atas) disandingkan fluks sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES pada tanggal 15 Agustus 2016 pukul 01:59:07 hingga 03:38:07 UT. Garis merah pada panel atas menunjukkan nilai rata-rata (*moving average*) setiap menit. Gambar inset pada panel bawah merupakan plot fluks sinar-X dalam sehari di tanggal 15 Agustus 2016

Gambar 4-6 menunjukkan variasi nilai kerapatan atmosfer yang stabil dengan fluks sinar-X sedang mengalami penurunan setelah terjadi *flare* kelas C1.1. Terjadi peristiwa yang cukup menarik dengan adanya kenaikan fluks sinar-X (lingkaran hitam putus-putus) yang menyebabkan penurunan kerapatan atmosfer. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut dengan data yang lebih banyak terkait kondisi saat malam hari memberikan pengaruh yang sebaliknya terhadap kerapatan atmosfer saat terjadi peningkatan fluks sinar-X. Gambar inset menunjukkan kondisi fluks dalam satu hari, dan daerah berwarna abu-abu merupakan waktu pengamatan dilakukan/nilai kerapatan atmosfer. Terlihat fluks saat akuisisi GPS dilakukan, baru saja terjadi *flare* kelas C1.1 dan fluks sinar-X dalam masa menuju normal. Terjadi peningkatan menjelang akhir pengamatan yang menyebabkan penurunan kerapatan atmosfer. Satelit LAPAN-A2 saat itu berada pada sisi malam. Gambar 4-7 menunjukkan variasi nilai kerapatan

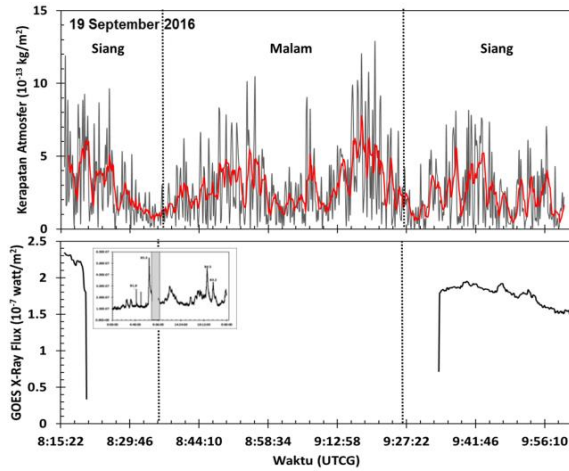
atmosfer yang stabil dan fluks sinar-X sedang mengalami penurunan setelah terjadi *flare* kelas B2.9. Nilai kerapatan atmosfer yang diperoleh sangat rendah sekali dibandingkan dengan data yang lain. Ini merupakan data terpendek yang diperoleh selama akuisisi data posisi GPS dari LAPAN-A2. Gambar inset menunjukkan kondisi fluks dalam satu hari, dan daerah berwarna abu-abu merupakan waktu pengamatan dilakukan/nilai kerapatan atmosfer.



Gambar 4-7: Plot kerapatan atmosfer dari data posisi GPS (panel atas) disandingkan fluks sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES pada tanggal 7 September 2016 pukul 13:25:47 hingga 14:07:47 UT. Garis merah pada panel atas menunjukkan nilai rata-rata (*moving average*) setiap menit. Gambar inset pada panel bawah merupakan plot fluks sinar-X dalam sehari di tanggal 7 September 2016

Gambar 4-8 menunjukkan variasi nilai kerapatan atmosfer yang tampak memiliki pola sinusoidal. Sangat disayangkan bahwa pada waktu pengamatan, data fluks sinar-X tidak ada di setiap satelit GOES sehingga tidak dapat dianalisis apakah pola sinusoidal tersebut akibat adanya peningkatan fluks sinar-X. Hal ini disebabkan peristiwa *Sun Outage* yang dialami seluruh satelit GOES. Tetapi berdasarkan data *Solar and Geophysical Event Report* dan *Solar Region Summary* dari SWPC NOAA, terjadi *flare* kelas B5.3 dari NOAA 2592 (N14E27) dengan luas 10 SMH (*solar millionth hemisphere*) dan memiliki

konfigurasi magnetik Beta. *Flare* tersebut dimulai pada pukul 07:32 UT dan berakhir pada pukul 07:52 UT yang diduga menyebabkan kenaikan kerapatan pada sisi siang di saat awal pengamatan.

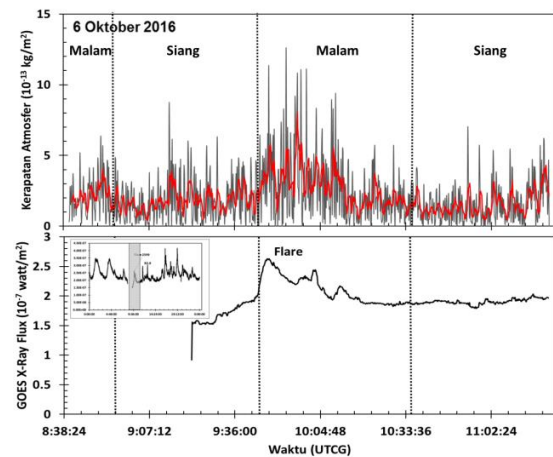


Gambar 4-8: Plot kerapatan atmosfer dari data posisi GPS (panel atas) disandingkan fluks sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES pada tanggal 19 September 2016 pukul 08:16:07 hingga 10:11:27 UT. Garis merah pada panel atas menunjukkan nilai rata-rata (*moving average*) setiap menit. Gambar inset pada panel bawah merupakan *plot* fluks sinar-X dalam sehari di tanggal 19 September 2016

Terjadi pula semburan radio matahari tipe III (berasosiasi dengan *flare*) pada pukul 09:20 UT. Apakah dampak dari semburan radio matahari tipe III tersebut menyebabkan pola sinusoidal pada kerapatan atmosfer di sisi malam masih perlu dilakukan kajian lebih lanjut. Gambar inset menunjukkan kondisi fluks dalam satu hari, dan daerah berwarna abu-abu merupakan waktu pengamatan dilakukan/nilai kerapatan atmosfer.

Gambar 4-9 menunjukkan variasi nilai kerapatan atmosfer yang tampak mengalami peningkatan akibat *flare* dari NOAA2599 (S14E46) yang memiliki luas 460 SMH dan kelas magnetik Beta berdasarkan data dari *Solar and Geophysical Event Report* dan *Solar Region Summary* SWPC NOAA. Flare dari

NOAA2599 ini terjadi pada pukul 09:44 UT – 09:59 UT. Data fluks sinar-X juga tidak ada pada awal pengamatan GPS yang masih disebabkan peristiwa *Sun Outage* yang dialami seluruh satelit GOES. Gambar inset menunjukkan kondisi fluks dalam satu hari, dan daerah berwarna abu-abu merupakan waktu pengamatan dilakukan/nilai kerapatan atmosfer.



Gambar 4-9: *Plot* kerapatan atmosfer dari data posisi GPS (panel atas) disandingkan fluks sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES pada tanggal 6 Oktober 2016 pukul 08:40:17 hingga 11:21:47 UT. Garis merah pada panel atas menunjukkan nilai rata-rata (*moving average*) setiap menit. Gambar inset pada panel bawah merupakan *plot* fluks sinar-X dalam sehari di tanggal 6 Oktober 2016

Dari keseluruhan analisis tersebut menunjukkan bahwa pengaruh aktivitas matahari dalam skala temporal yang singkat (10 detik) memberikan pengaruh peningkatan kerapatan atmosfer. Peristiwa transien di Matahari berupa *flare* tidak memberikan pengaruh peningkatan kerapatan atmosfer berdasarkan hasil yang diperoleh. Selain itu, terdapat beberapa kasus peningkatan aktivitas matahari memberikan pengaruh penurunan kerapatan atmosfer. Hal ini perlu ditinjau lebih lanjut untuk melihat faktor lain, yaitu pengaruh terbesar kedua yang mempengaruhi kerapatan atmosfer, yaitu adanya pemanasan Joule akibat aktivitas badai geomagnet

## 5 KESIMPULAN

Data posisi GPS yang diakuisisi oleh LAPAN-A2 telah cukup baik, dibuktikan dengan membandingkan data tersebut terhadap data TLE yang berasal dari pengamatan optik dan radar USSTRATCOM (*space-track*). Diperoleh kesalahan posisi dalam koordinat RSW dengan perbedaan  $\pm 2$  km (data Mei dan Juli), sedangkan data posisi GPS untuk bulan Agustus, September dan Oktober perlu dikaji lebih dalam sumber kesalahan penentuan posisinya walaupun pada akhirnya hal ini tidak mempengaruhi nilai kerapatan atmosfer yang dihasilkan.

Diperoleh pula nilai kerapatan atmosfer yang diperoleh dari data posisi GPS LAPAN-A2 menggunakan persamaan ekstraksi kerapatan atmosfer dari elemen orbit (TLE) (Picone et al., 2005). Nilai dari kerapatan atmosfer berdasarkan metode Picone et al. (2005) memberikan nilai yang berdekatan dengan nilai model atmosfer.

Pengaruh aktivitas matahari dari data fluks sinar-X terhadap kerapatan atmosfer menunjukkan adanya peningkatan kerapatan atmosfer saat terjadi kenaikan nilai fluks sinar-X. Peningkatan fluks sinar-X yang tiba-tiba juga tampaknya tidak secara cepat direspons dengan perubahan peningkatan kerapatan atmosfer.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih sebesar-besarnya kepada USSPACECOM atas data *Two-Line Element* (TLE) di situs *Space-Track* serta terima kasih juga sebesar-besarnya kepada NOAA dan SDO atas data fluks sinar-X dan citra Matahari

## DAFTAR RUJUKAN

- Dani, T. dan A. Rachman, 2013. *Pengaruh Radiasi EUV Matahari dan Badai Geomagnet Terhadap Variasi Kerapatan Atmosfer dari Elemen Orbit LAPAN-Tubsat*, Jurnal Sains Dirgantara, 10, 70-81.
- Dani, T., dan Neflia, 2014. *Comparison Between TLE Derived Density from LAPAN-Tubsat and Razaksat Satellite Orbital Element and the NRLMSISE-00 Density Model*, Proceeding of International Workshop on Space Weather in Indonesia, 6-11.
- Dani, T., 2013. *Pengaruh Aktivitas Matahari Siklus Ke-23 yang Berdampak pada Perubahan Kerapatan Atmosfer dari Analisis Elemen Orbit Satelit LEO*, Master Tesis, Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung.
- Delgado, M.R., 2008. *Atmospheric Drag: Modeling the Space Environment*. Technical report, Universidad Politecnica de Madrid, E.T. S.I. Aeronauticos.
- Doornbos, E., 2011. *Thermospheric Density and Wind Determination from Satellite Dynamics*, Ph.D. thesis, TU Delft, School of Aerospace Engineering.
- Hardhienata, S., R. H. Triharjanto, dan M., Mukhayadi, 2011. *LAPAN-A2: Indonesian Near-Equatorial Surveillance Satellite*, APRSAF-18 (Asia-Pacific Regional Space Agency Forum) Singapore.
- Houssou, S., 2006. *GPS Receiver Type VGPS-51: Interface Control Documen & Operation Manuals*, Vectronic Aerospace.
- Kahr, E., S. Skone, and K., O'Keefe, 2010. *Orbit Determination for the Canx-2 Nanosatellite Using Intermittent GPS Data*, *Proceedings of ION GNSS*, The Institute of Navigation, Portland, Oregon.
- King-Hele, D., 1987. *Satellite Orbits in an Atmosphere: Theory and Applications*. 1st ed. London: Blackie and Son Ltd.
- Lechtenberg, T. F., 2010. *Derivation and Observability of Upper Atmospheric Density Variations utilizing precision orbit ephemerides*, Master's thesis, University of Kansas, School of Aerospace Engineering.
- Picone, J. M., J. T., Emmert, and J. L., Lean, 2005. *Thermospheric Densities Derived from Spacecraft Orbits: Accurate Processing of two Line Element*, *Journal of Geophysical Research*, 110, A03301.
- Vallado, D. A., 2001. *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, 2 ed., Microcosm Press.

Vallado, D. A, P., Crawford, R., Hujsak, and T., Kelso, 2006. *Revisiting Spacetrack Report #3*, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, AIAA/AAS, Keystone, CO.

Van den Ijssel, J.A.A, 2014. *GPS-Based Precise Orbit Determination and Accelerometry for Low Flying Satellites*, Dissertation,

faculteit Luchtvaarten  
Ruimtevaarttechniek, Technische  
Universiteit Delft.

Young, J. L., 2001. *Determination of Atmospheric Density in Low-Earth Orbit using GPS Data*, Trident Scholar Project Report, US Naval Academy, no. 287.

## INDEKS PENGARANG

### A

Abdul Rachman 127 [14,2]  
Amrullah A. Qadir 127 [14,2]  
Anton Winarko 97[14,2]  
Anwar Santoso 17[14,1], 97[14,2]

### D

Dadang Nurmalia 97[14,2]  
Dessi Marlia 1[14,1]

### F

Fanny Aditya Putri 83[14,2]  
Farahhati Mumtahana 71[14,2]

### I

Indah Susanti 27[14,1]  
Iyus Edi Rusnadi 97[14,2]

### M

Mamat Ruhimat 17[14,1]  
Mira Juangsih 97[14,2]  
Mumen Tarigan 71[14,2]

### N

Ninong Komala 83[14,2]  
Novita Ambarsari 83[14,2]

### R

Rasdewita Kesumaningrum 17[14,1]  
Rhorom Priyatikanto 71,127[14,2]  
Rohmat Yulianto 43[14,1]  
Rosida 27[14,1]

### S

Sefria Anggarani 1[14,1]  
Siska Filawati 17[14,1], 97[14,2]  
Slamet Supriadi 127[14,2]  
Sri Ekawati 1[14,1],97  
,111[14,2]  
Suaydhi 57[14,1]

### T

Tiar Dani 127[14,2]

### V

Varuliantor Dear 43[14,1]





<b>T</b>		Two-Line Element (TLE)	125,126,137[14,2]
TEC	2,6,55[14,1],96,98,111 ,112,113,114,115,116 ,117,118,119,120,121 ,122,123,124,137 ,138[14,2]	<b>U</b> Upper atmospheric density	125[14,2]
The top of atmosphere	27,41[14,1]	<b>W</b> WRF	57,58,59,60,61,62 ,63,64,65,66,67,68 ,69[14,1]
Trace gases	83,84,85,86,87,88,89,90 ,91,92,93,94,95,96[14,2]		
Tropopause	83,84,85,86,87,88,89,90 ,91,92,93,94,95,96[14,2]		
TTL	83,84,85,86,87,88,89,90 ,91,92,93,94,95,96[14,2]		

**Pedoman Penulisan Jurnal Sains Dirgantara)**  
**JUDUL MAKALAH DITULIS DENGAN HURUF KAPITAL TEBAL**  
**SECARA SINGKAT DAN JELAS, (Studi Kasus : apabila ada)**  
**(16 pt, Britannic Bold )**  
**Judul dibuat dalam 2 bahasa (Indonesia dan Inggris), apabila**  
**tulisan dalam bahasa Indonesia, maka judul dalam bahasa**  
**Inggris ditulis dalam tanda kurung**  
**(16 pt, Britannic Bold )**

**Penulis Pertama<sup>1</sup>, Penulis Kedua<sup>2</sup>, dst<sup>n</sup> ← (Nama Penulis Tanpa gelar)**  
**(10,5 pt, Franklin Gothic Medium, bold)**

<sup>1</sup>Instansi Penulis Pertama  
<sup>2</sup>Instansi Penulis Kedua  
dst<sup>n</sup>....  
**(10,5 pt, Franklin Gothic Medium)**

**e-mail: e-mail penulis pertama ← (berwarna hitam)**  
**(10,5 pt, Franklin Gothic Medium)**

Diterima : ..... (tanggal bulan tahun); Disetujui : ..... (tanggal bulan tahun); Diterbitkan : ..... (tanggal bulan tahun)  
**(9 pt, Franklin Gothic Medium)**

**ABSTRACT**  
**(10,5 pt, Bookman Old Style, bold)**

Abstract is a summary of the most important elements of the paper, written in one paragraph in the one column of a maximum of 200 words. Abstract made in two languages written with the Bookman Old Style 9 pt. If the paper written in Indonesian, the Indonesian abstract written first then followed by English abstract and vice versa. The title "ABSTRAK" or "ABSTRACT" made with uppercase letters, and bold.

Keywords: *guidence, author, journal* ← (minimal 3 keywords)  
**(9pt, Bookman Old Style, italic)**

**ABSTRAK**  
**(10,5 pt, Bookman Old Style, bold)**

Abstrak merupakan ringkasan elemen-elemen terpenting dari naskah, ditulis dalam satu paragraf dalam 1 kolom maksimal 200 kata. Abstrak dibuat dalam 2 bahasa ditulis dengan huruf 9 pt, Bookman Old Style. Apabila naskah dalam Bahasa Indonesia, maka abstrak dengan Bahasa Indonesia ditulis terlebih dahulu dilanjutkan abstrak Bahasa Inggris dan sebaliknya. Judul "ABSTRAK" atau "ABSTRACT" dibuat dengan huruf besar, *bold*.

Kata kunci: *panduan, penulis, jurnal* ← (minimal 3 kata kunci)  
**(9pt, Bookman Old Style, italic)**

**1 PENDAHULUAN**  
**(10,5pt, Bookman Old Style, bold)**

Naskah dapat ditulis dalam Bahasa Indonesia maupun Bahasa Inggris. Naskah diketik dalam Microsoft Word dengan 1 kolom untuk abstrak dan 2 kolom untuk isi. Ukuran kertas A4

dengan ukuran panjang (*height*) 29,7 cm, lebar (*width*) 21 cm dengan dimensi

*Top* 3 cm, *Bottom* 2,5 cm, *Inside* 2,5 cm, *Outside* 2 cm, *Gutter* 1 cm, *Header* 1 cm dan *Footer* 1 cm. Jenis Huruf Bookman Old Style 10,5 pt, dan spasi (*line spacing*) 1. Panjang naskah tidak

melebihi 10 halaman termasuk tabel dan gambar.

Kerangka Tulisan disusun dengan urutan : Judul, Identitas Penulis, Abstrak, Kata Kunci, Pendahuluan, Metode, Hasil Pembahasan, Kesimpulan, Ucapan Terimakasih, dan Daftar Pustaka.

## 2 METODOLOGI

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Menguraikan tentang metode yang digunakan dalam penelitian termasuk data, peralatan, teori, diagram alir, beserta lokasi penelitian.

### 2.1 Lokasi dan Data

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

### 2.2 Standarisasi data

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

### 2.3 Metode Penelitian

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Persamaan matematis atau formula diberi nomor secara berurutan yang diletakkan di ujung kanan dalam tanda kurung. Apabila penulisan persamaan lebih dari satu baris maka penulisan nomor diletakkan pada baris terakhir. Penggunaan huruf sebagai simbol matematis dalam naskah ditulis dengan huruf miring (*Italic*) seperti  $x$ . Penjelasan persamaan diulas dalam naskah. Penurunan persamaan matematis atau formula tidak perlu dituliskan secara detil, cukup diberikan bagian yang terpenting, metode yang digunakan dan hasilnya.

$$D(t) = \Delta H(t) - Sq(t, m) \quad (1-1)$$

dengan  $D(t)$  tingkat gangguan geomagnet,  $\Delta H(t)$  variasi medan magnet komponen horizontal,  $Sq(t, m)$  variasi harian pada waktu  $t$  dan bulan  $m$ .

## 3 HASIL PEMBAHASAN

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Tabel dibuat ringkas dan diberi judul yang singkat tetapi jelas hanya menyajikan data yang esensial dan mudah di-

pahami. Tabel diberi catatan secukupnya, termasuk sumbernya, sehingga tabel mampu menjelaskan informasi yang disajikan secara mandiri. Setiap tabel diberi nomor secara berurutan dan diulas di dalam naskah. Judul tabel diketik dengan jenis huruf Bookman Old Style 10,5 pt dan pada tulisan "Tabel 1:" "Tabel 2:" dan seterusnya diketik tebal.

Tabel yang ukurannya melebihi satu kolom, maka dapat menempati area dua kolom. Tabel tidak boleh dalam bentuk "picture", harus dalam bentuk tabel. Judul tabel dituliskan pada bagian atas tabel, rata tengah dan diberi tanda titik (.) pada akhir judul tabel.

Gambar, Grafik dan Foto harus tajam dan jelas agar cetakan berkualitas baik. Semua simbol di dalamnya harus dijelaskan. Seperti halnya tabel, keterangan pada gambar, grafik atau foto harus mencukupi agar tersaji secara mandiri. Gambar, grafik dan foto harus diulas di dalam naskah. Seperti halnya tabel, gambar, grafik dan foto yang ukurannya melebihi satu kolom, maka dapat menempati area dua kolom. Gambar, grafik dan foto memiliki kedalaman minimal 300 dpi.



Gambar 3-1: Domain model yang digunakan dalam simulasi  
(9pt, Bookman Old Style)

Tabel 3-1: ANALISIS ENERGI GANGGUAN GEOMAGNET  
(9pt, Bookman Old Style)

Tanggal	Bz (nT)	v (km/s)	N (/cm <sup>3</sup> )	LO (RE)	(x10 ε11J)	Em (mV/m)	Dst* (nT)	Q (nT/jam)
1	-4,3	670	3,2	9,4	3,1	2,4	-37	14,8
2	-13,8	352	4,6	8,9	21,2	4,8	-73	21,4
3	-0,5	349	2,7	12,3	0,42	0,49	-2	2,9

#### 4 KESIMPULAN

Hal-hal penting dalam naskah yang merupakan kesimpulan dari hasil penelitian atau kajian.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Wajib dituliskan penulis, ditujukan kepada pihak-pihak yang membantu penulis baik penyediaan data, pengerjaan data, serta Tim Redaksi Jurnal Geomatika dan Mitra Bestari.

#### DAFTAR RUJUKAN

Referensi hendaknya dari sumber yang jelas dan terpercaya. Setiap referensi yang tercantum dalam daftar pustaka harus dikutip (disitir) pada naskah dan sebaliknya setiap kutipan harus tercantum dalam daftar pustaka. Penulisan acuan dalam pembahasan sebaiknya menggunakan "sistem penulis-tahun" yang mengacu pada karya pada daftar pustaka. Kutipan buku dalam bentuk saduran untuk satu sampai dua penulis ditulis nama akhir penulis dan tahun. Contoh: Muhammad Nasir dituliskan (Nasir, 2009).

Referensi primer lebih dari 80 % dan diterbitkan dalam 5-10 tahun terakhir. Referensi yang dicantumkan dalam naskah mengikuti pola baku dengan disusun menurut abjad berdasarkan nama (keluarga) penulis pertama dan tahun publikasi, dengan sistim sitasi *American Physiological Association 6th Edition*. Contoh penulisan di dalam Daftar Pustaka adalah sebagai berikut :

##### Artikel dalam Jurnal (Jurnal Primer)

Burton R. K., R. I. McPherron, C. T. Russell, 1975. *An Empirical Relationship Between Interplanetary Conditions and Dst*, J. Geophys. Res., 80(31), 4204-4214.

##### Buku

Ross, S. M., 2004. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Burlington, Elsevier.

##### Artikel bagian dari Buku

Maris, G.; M.D. Popescu dan M. Mierla, 2004. *Soft X-Ray Solar Flarecycles*, dalam A.V. Stepanov; E.E. Benevolenskaya dan A.G.Kosovichev (editor), *Proceedings IAU Symposium*, no. 223, 73.

##### Skripsi/Tesis/Disertasi

Ameldam, P., 2012. *Pengujian Data NCEP-FNL Dan CCMP Untuk Potensi Energi Angin (Studi Kasus Di Jawa Barat)*, Skripsi ITB.

##### Naskah Prosiding

Avia, L. Q., A. Haryanto, N. Cholianawati dan B. Siswanto, 2010. *Identifikasi Awal Musim Kemarau dan Musim Hujan Berdasarkan Data Satelit TRMM*, Prosiding Seminar Penerbangan dan Antariksa 2010: Sub Seminar Sains Atmosfer dan Iklim. Serpong, 15 Nopember 2010.

##### Naskah Konferensi

Pontes, M-T, Sempreviva, AM, Barthelmie, R., Giebel, G., Costa, P., 2007. *Integrating Offshore Wind And Wave Resource Assessment*, Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.

##### Naskah Laporan Hasil Penelitian

P3TKEBTKE-Kementerian ESDM, 2008. *Laporan Penelitian Kajian PLT Angin di Indonesia Bagian Timur*.

##### Naskah Online

Habby, J., 2011. *Applying Tropospheric Moisture to Forecasting, Meteorology Education*, diakses [http:// weatherprediction.com](http://weatherprediction.com), 23 Desember 2014.

**PEDOMAN BAGI PENULIS  
JURNAL SAINS DIRGANTARA  
(*Journal of Aerospace Sciences*)**

**Jurnal Sains Dirgantara (*Journal of Aerospace Sciences*)** adalah jurnal ilmiah untuk publikasi penelitian dan pengembangan di bidang sains atmosfer dan sains antariksa.

Penulis diundang untuk mengirimkan naskah atau karya asli hasil penelitian, pengembangan, dan atau pemikiran yang belum dipublikasikan atau dikirimkan ke media publikasi manapun. Penulis boleh mengusulkan penelaah ahli di luar Dewan Penyunting, yang dianggap memahami betul substansi naskah yang dikirim. Naskah yang dikirim akan dievaluasi secara anonim oleh dua atau tiga penelaah ahli dan/atau Dewan Penyunting dari segi keaslian (orisinalitas), kesahihan (validitas) ilmiah, dan kejelasan pemaparan. Penulis berhak menanggapi hasil evaluasi, sedangkan Dewan Penyunting berhak menerima atau menolak serta menyempurnakan naskah tanpa mengurangi isi/maknanya. Naskah yang tidak dimuat, dikembalikan kepada penulis dengan alasan penolakannya. Penulis yang naskahnya dimuat mendapat 3 (tiga) eksemplar dari nomor yang diterbitkan, dan naskah yang ditulis kolektif, hanya diberikan 2 (dua) eksemplar untuk masing-masing penulis. Ketentuan bagi penulis pada jurnal ini adalah sebagai berikut.

**a. Pengiriman naskah**

Naskah dikirim dan diunggah melalui laman [www.jurnal.lapan.go.id/jurnal\\_sains/](http://www.jurnal.lapan.go.id/jurnal_sains/). Naskah diketik dengan MS Word dengan Bookman Old Style font 10.5pt pada kertas A4 dengan spasi ganda. Khusus untuk judul naskah ditulis huruf besar dengan font 16 pt. Penulis yang naskahnya diterima untuk dipublikasikan, diminta menyerahkan file dalam cd, atau dikirim melalui e-mail ke Sekretariat Dewan Penyunting ([pukasi.lapan@gmail.com](mailto:pukasi.lapan@gmail.com); [publikasi.lapan@gmail.com](mailto:publikasi.lapan@gmail.com))

**b. Sistematika penulisan**

Judul harus ringkas tanpa singkatan dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris. Informasi penulis terdiri dari nama (para) penulis tanpa gelar, instansi/ perguruan tinggi, dan e-mail penulis utama. Isi makalah terdiri dari: (a) abstrak dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris maksimum 200 kata yang tersusun dalam satu alinea, (b) kata kunci, (c) batang tubuh naskah terdiri dari Pendahuluan, Data/Metode/Teori, Hasil dan Pembahasan, Implementasi (jika ada), serta Kesimpulan, (d) Ucapan terimakasih (bila perlu) yang lazim, dan (e) Daftar rujukan.

**c. Gambar dan Tabel**

Gambar atau foto harus dapat direproduksi dengan tajam dan jelas. Gambar atau foto warna hanya diterima dengan pertimbangan khusus. Gambar dan tabel dapat dimasukkan ke dalam batang tubuh atau dalam lampiran tersendiri. Untuk kejelasan penempatan dalam jurnal, gambar dan tabel harus diberi nomor sesuai nomor bab dan nomor urut pada bab tersebut, misalnya Gambar 2-2 atau Tabel 2-1 yang disertai keterangan singkat gambar dan judul dari tabel yang bersangkutan.

**d. Persamaan, Satuan, dan Data Numerik**

Persamaan diketik atau ditulis tangan (untuk simbol khusus) dan diberi nomor di sebelah kanannya sesuai nomor bab dan nomor urutnya, misalnya persamaan (1-2). Satuan yang digunakan adalah satuan internasional (CGS atau MKS) atau yang lazim pada cabang ilmunya. Karena terbit dengan dua bahasa, angka desimal data numerik pada tabel dan gambar harus mengacu pada sistem internasional dengan menggunakan titik, sedangkan pada naskah tetap menggunakan ketentuan menurut bahasanya.

**e. Rujukan**

PP No. 74, 2001. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 1999 Tentang: *Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Kementerian Lingkungan Hidup. Jakarta.

Haryani, N. S., Hidayat, Sulma, S., dan Pasaribu, J. M., 2014. *Deteksi Limbah Acid Sludge Menggunakan Metode Red Edge Berbasis Data Penginderaan Jauh*, Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan data Citra Digital, Vol 11 No.2 Desember 2014.

Center for International Forestry Research [CIFOR], 2012. *Forests and Climate Change Mitigation : What Policymakers Should Know*, Fact Sheet. No. 5, November 2012, MITIGATION, Key of Research Findings. CGIAR Research Programme.

The National Geophysical Data Center (NOAA)-NASA. Sumber data VNF, 2014. Sumber: [http://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download\\_2014\\_indonesia.html](http://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_2014_indonesia.html) atau (Sumber LAPAN: <http://modis-catalog.lapan.go.id/monitoring/katalognpp#>).

[http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data\\_prod/prog\\_sect11\\_3.html](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html)