

**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*)¹, Rhorom Priyatikanto*), Slamet Supriadi*), Abdul Rachman*), Amrullah A. Qadir**)

*)Pusat Sains Antariksa

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

**Pusat Teknologi Satelit

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

¹e-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 ± 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 ± 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° 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.

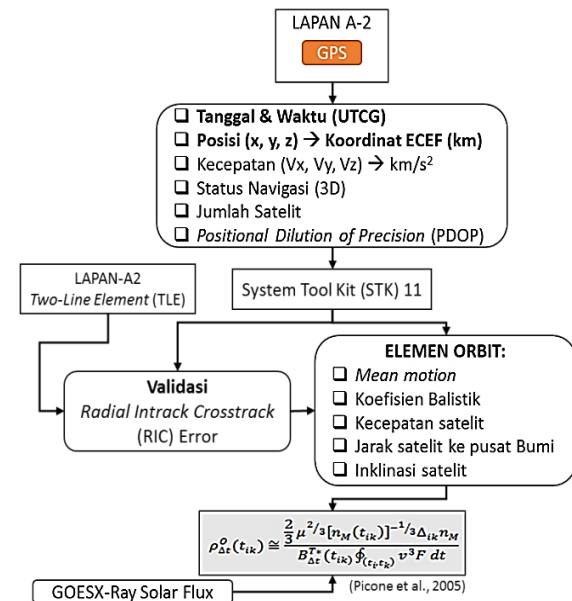
Diperlukan pula data TLE satelit LAPAN-A2 dari Departemen Pertahanan Amerika Serikat melalui USSTRATCOM di situs <https://www.space-track.org> yang akan dipergunakan untuk memvalidasi data posisi GPS LAPAN-A2 yang diperoleh.

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)

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

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/m³),
- $\mu = GM$, perkalian konstanta gravitasi dan massa Bumi ($3,986 \times 10^{14}$ m³/s²),
- $\Delta_{ik}n_M = n_M(t_k) - n_M(t_i)$, 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 (m²/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*-m²), dan m = massa satelit (kg). Untuk LAPAN-A2, nilai koefisien balistik $\approx 0,012$ dengan asumsi koefisien hambatan (C_D) LAPAN-A2 $\approx 0,0592$, $A = 15$ m² 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), ω = 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

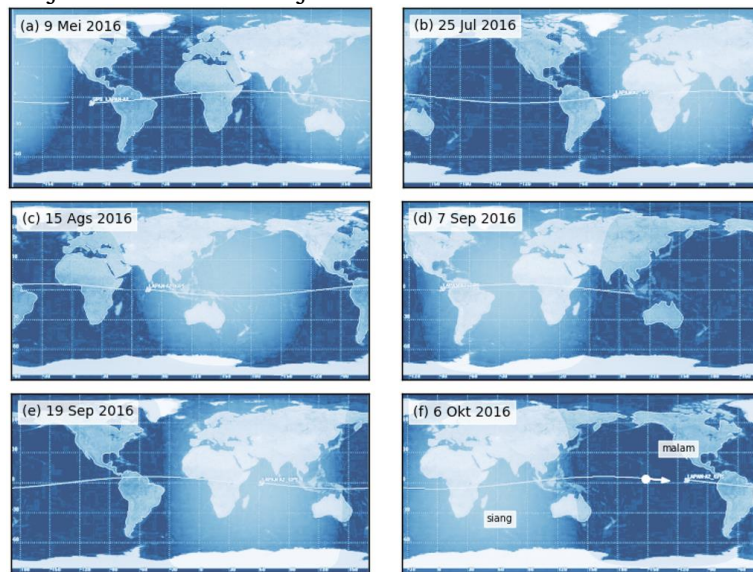
2016		
Tanggal	Waktu (UTC)	Durasi (menit)
09-May	02:07:37 - 03:52:37	1:45:00
25-Jul	07:15:07 - 09:16:17	2:01:10
15-Aug	01:59:07 - 03:38:07	1:39:00
7-Sep	13:25:47 - 14:07:47	0:42:00
19-Sep	08:16:07 - 10:11:27	1:55:20
06-Oct	08:40:17 - 11:21:47	2:41:30

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.

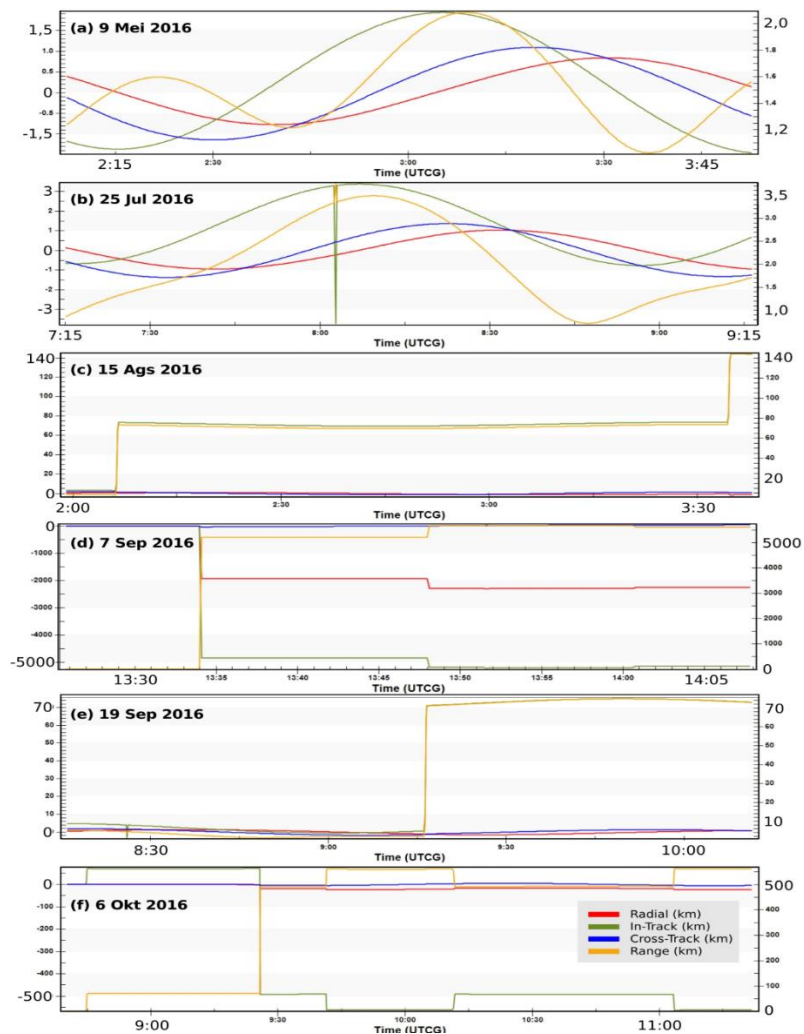
Gambar 4-2 menunjukkan perbedaan posisi menurut TLE dan posisi menurut GPS pada arah *In-Track*, *Cross-Track* dan *Radial*. Pada kasus pengukuran 9 Mei 2016, terlihat bahwa kesalahan posisi dari TLE terhadap GPS untuk *In-track* dapat mencapai $\pm 1,9$ km dan untuk *cross-track* dan *radial* sekitar ± 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 ± 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 ~ 600 km dan bergerak dengan kecepatan ~ 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 ± 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 ± 5000 km dan untuk *cross-track* sekitar $\pm 1,5$ km, serta *radial* sekitar ± 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 ± 8 km yang kemudian pada sekitar pukul 09:15 UT meningkat menjadi ± 74 km sementara untuk *cross-track* dan *radial* hanya bernilai sekitar ± 2 km. Pada 6 Oktober, perbedaan arah *in-track* dan *range* mencapai ± 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.

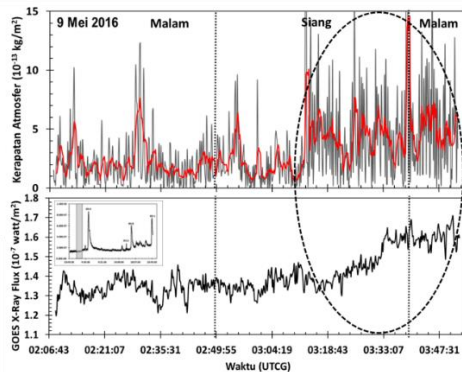
Tabel 4-2: NILAI KERAPATAN ATMOSFER BERDASARKAN MODEL HARRIS PRIESTER (Vallado, 2001)

Ketinggian (km)	Densitas Minimum (kg/m^3)	Densitas Maximum (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.

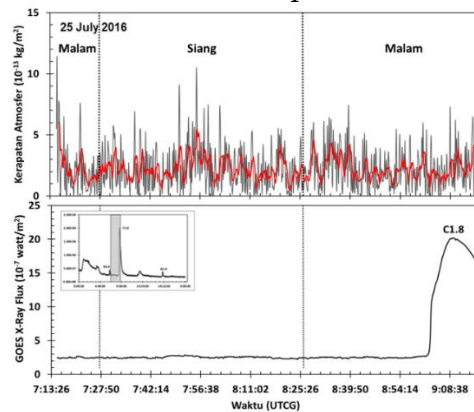
Gambar 4-3 menunjukkan variasi nilai kerapatan atmosfer mengalami kenaikan seiring dengan naiknya fluks sinar-X (lingkaran hitam putus-putus) meskipun kenaikan sinar-X fluks tersebut bukan disebabkan oleh peristiwa transien seperti *flare*. Gambar inset di panel bawah menunjukkan kondisi fluks dalam 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.



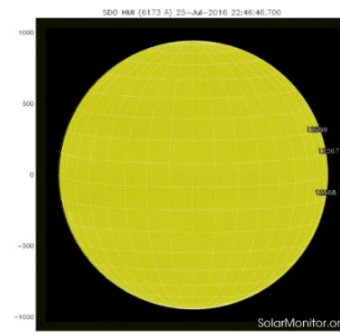
Gambar 4-3: Plot kerapatan atmosfer dari data posisi GPS (panel atas) disandingkan fluks sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES pada tanggal 9 Mei 2016 pukul 02:07:37 hingga 03:52:37 UT. Garis merah pada panel atas menunjukkan nilai rata-rata (*moving average*) setiap menit. Gambar inset pada panel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

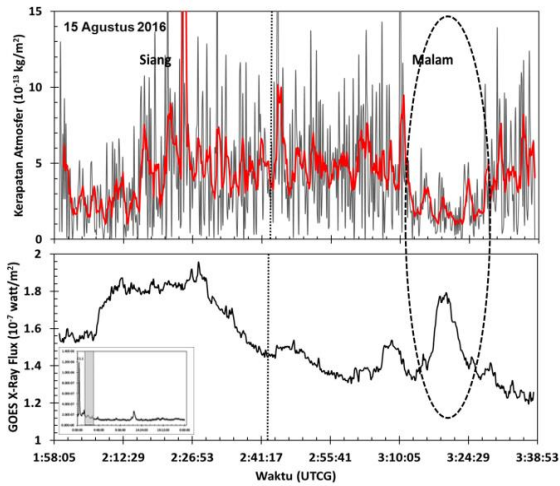
peningkatan yang berarti, kecuali pada akhir pengamatan terjadi peristiwa transien *flare* kelas C1.8 dari NOAA 12567. Kenaikan signifikan dari fluks sinar-X akibat *flare* ini tidak memberikan pengaruh terhadap peningkatan kerapatan atmosfer karena lokasi daerah aktif tersebut berada di tepi barat piringan 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



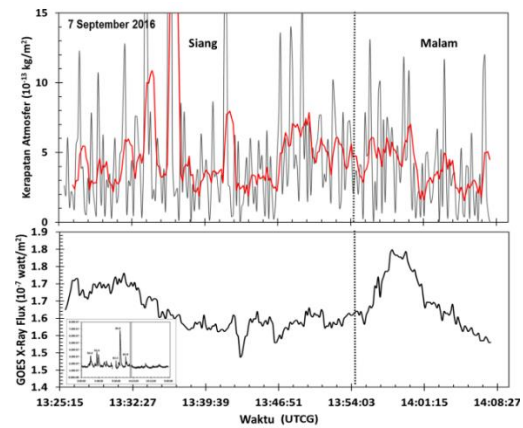
Gambar 4-5: Citra pengamatan Matahari dan daerah aktifnya pada tanggal 25 Juli 2016 dari satelit SDO. Sumber: Solarmonitor.org



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

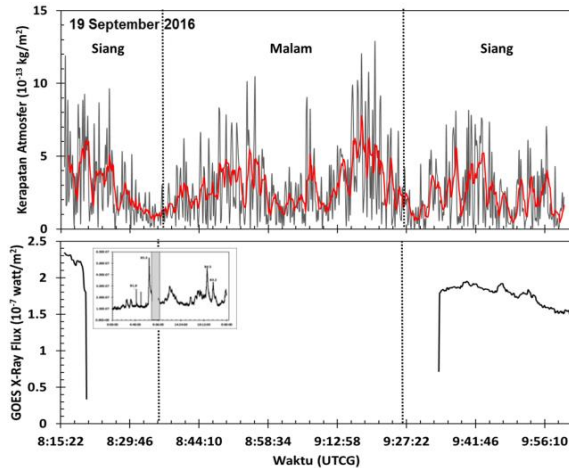
atmosfer yang stabil dan fluks sinar-X sedang mengalami penurunan setelah terjadi *flare* kelas B2.9. Nilai kerapatan atmosfer yang diperoleh sangat rendah sekali dibandingkan dengan data yang lain. Ini merupakan data terpendek yang diperoleh selama akuisisi data posisi GPS dari LAPAN-A2. Gambar inset 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.

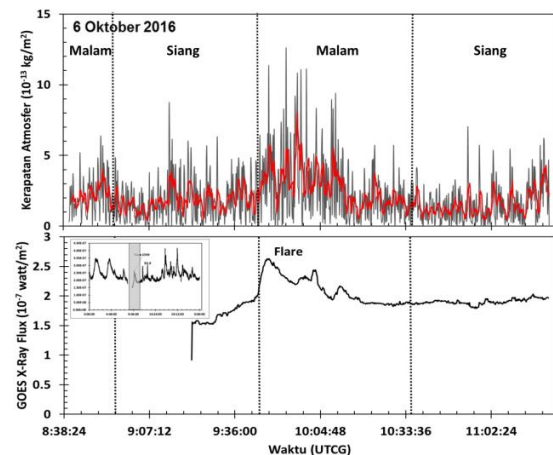


Gambar 4-8: Plot kerapatan atmosfer dari data posisi GPS (panel atas) disandingkan fluks sinar-X (panel bawah) dari satelit GOES pada tanggal 19 September 2016 pukul 08:16:07 hingga 10:11:27 UT. Garis merah pada panel atas menunjukkan nilai rata-rata (*moving average*) setiap menit. Gambar inset pada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