

PENGARUH RADIASI EUV MATAHARI DAN AKTIVITAS GEOMAGNET TERHADAP VARIASI KERAPATAN ATMOSFER DARI ELEMEN ORBIT LAPAN-TUBSAT

[INFLUENCE OF SOLAR EUV RADIATION AND GEOMAGNETIC ACTIVITY ON ATMOSPHERIC DENSITY VARIATION USING LAPAN-TUBSAT ORBITAL ELEMENTS]

Tiar Dani^{*,)} dan Abdul Rachman^{**)}**

***) Mahasiswa Pascasarjana Astronomi, ITB**

****) Peneliti Bidang Matahari dan Antariksa-Pusat Sains Antariksa, Lapan**

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

Diterima 14 Februari 2013; Disetujui 15 April 2013

ABSTRACT

Extreme condition of space environment due to solar activity cause serious effects on satellites, either the anomaly effect or orbital decay. Orbital decay is due to the increase of atmospheric density, especially for low earth orbit satellites. Lapan-Tubsat and Lapan's next generation satellites will be placed in LEO orbit, so it is necessary to determine the effect of EUV radiation and geomagnetic storm on atmospheric density variations passed by the satellites. Analysis of the effect on atmospheric density, it is obtained a correlation of about 83% between F10.7 as a proxy of EUV radiation and the atmospheric density variations, while the correlation with geomagnetic storms using Ap index as a proxy is of about 13%. The increase of average atmospheric density due to moderate and high solar activity is 4 times and 11 times, respectively, compared to the average during quiet solar activity. While the increase of average atmospheric density due to moderate geomagnetic storm is about 15% higher than during quiet geomagnetic conditions.

Keyword: Atmospheric density, EUV radiations, Geomagnetic storm, TLE, Lapan-Tubsat, F10.7, Ap index

ABSTRAK

Kondisi lingkungan antariksa yang sangat ekstrim akibat aktivitas matahari dapat menyebabkan efek yang serius bagi satelit, baik itu efek anomali ataupun peluruhan orbit. Peluruhan orbit disebabkan oleh peningkatan kerapatan atmosfer terutama pada satelit-satelit di orbit rendah. Lapan-Tubsat dan satelit-satelit Lapan generasi selanjutnya akan ditempatkan di orbit rendah sehingga perlu diketahui pengaruh radiasi EUV dan aktivitas geomagnet terhadap kerapatan atmosfer yang dilintasinya. Hasil analisis keterpengaruh kerapatan atmosfer, diperoleh korelasi sebesar 83% antara F10.7 sebagai proksi dari radiasi EUV dengan variasi kerapatan atmosfer, sedangkan korelasi dengan aktivitas geomagnet menggunakan indeks Ap sebagai proksi sebesar 13%. Kenaikan kerapatan atmosfer rata-rata akibat aktivitas matahari moderat dan tinggi masing-masing sebesar 4 kali dan 11 kali dibanding rata-ratanya saat aktivitas matahari tenang. Sedangkan aktivitas geomagnet moderat menyebabkan terjadinya kenaikan kerapatan atmosfer rata-rata sebesar 1 kali lebih tinggi dibanding saat keadaan geomagnet tenang.

Kata kunci: Kerapatan atmosfer, Radiasi EUV, Aktivitas geomagnet TLE, Lapan-Tubsat, F10.7, Indeks Ap.

1 PENDAHULUAN

Variasi kerapatan atmosfer merupakan kajian penting untuk mengetahui salah satu penyebab gangguan orbit satelit yang ditempatkan di orbit rendah. Peningkatan aktivitas matahari dapat menyebabkan peningkatan kerapatan atmosfer yang berimbas pada peningkatan gaya hambat pada satelit. Kerapatan atmosfer berubah-ubah akibat interaksi antara struktur molekul atmosfer dengan radiasi matahari dan geomagnet. Secara umum, parameter kerapatan atmosfer terdiri atas tiga hal dasar, yaitu kerapatan, temperatur dan komposisi. Parameter tersebut terpengaruh oleh berbagai faktor seperti waktu lokal, posisi lintang dan bujur, ketinggian, serta aktivitas matahari dan geomagnet. Pengaruh jangka pendek variasi kerapatan atmosfer ini adalah perubahan posisi orbit satelit, kesulitan penjejak satelit dan komunikasi terhadap satelit tersebut. Generasi satelit-satelit mikro milik Lapan merupakan satelit orbit rendah sehingga sangat dipengaruhi oleh kerapatan atmosfer. Oleh karenanya sangat penting untuk mempelajari pengaruh lingkungan antariksa untuk satelit-satelit Lapan generasi selanjutnya ditinjau dari variasi kerapatan atmosfer dalam rangka mendukung suksesnya misi yang diembannya.

Kim et al. (2006) dan Park et al. (2008) dengan menggunakan data akselerometer dari satelit KOMPSAT-1 menunjukkan adanya hubungan yang sangat signifikan antara peningkatan gaya hambat atmosfer dengan *flare* dan aktivitas geomagnet. Selain itu, dengan menggunakan model atmosfer yang telah ada, Knowles et al. (2001) menyimpulkan ada hubungan antara naiknya hambatan atmosfer akibat meningkatnya kerapatan atmosfer yang disebabkan aktivitas matahari dan aktivitas geomagnet. Semua penelitian tersebut mengandalkan model atmosfer yang telah ada (Jacchia, MSIS, HSDM, NRLMSISE-00). Picone et al (2005) mengajukan metode penggunaan elemen orbit dan propagator orbit (*general perturbation* maupun *special perturbation*) untuk menentukan kerapatan atmosfer tanpa tergantung pada model atmosfer yang telah ada. Metode ini mengurangi proses komputasi dan biaya sehingga keharusan untuk menganalisis orbit dari data mentah pengamatan serta penggunaan integrasi numerik untuk penentuan orbit tidak lagi menjadi halangan dalam studi kerapatan atmosfer dengan memanfaatkan data elemen orbit satelit (Picone, et al., 2005). Penjelasan lengkap mengenai cara untuk mengekstraksi kerapatan atmosfer dari data *Two-Line Element* (TLE) merujuk pada Picone et al. (2005). Adapun persamaan Picone et al. (2005) untuk mengekstraksi kerapatan atmosfer dari data elemen orbit satelit adalah sebagai berikut:

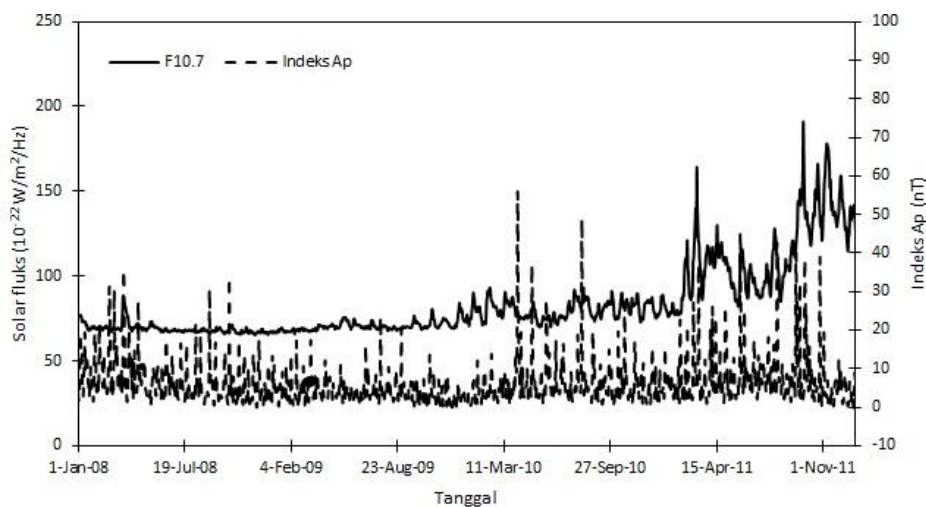
$$\rho_{\Delta t}^O(t_{ik}) \cong \frac{\frac{2}{3}\mu^{2/3}[n_M(t_{ik})]^{-1/3}\Delta_{ik}n_M}{B_{\Delta t}^{T*}(t_{ik})\phi_{tk}^{ti}v^3F dt} \quad (1-1)$$

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar variasi kerapatan atmosfer pada orbit LEO karena pengaruh dua sumber utama gangguan kerapatan atmosfer, yaitu radiasi EUV dari matahari dan peristiwa aktivitas geomagnet menggunakan data elemen orbit Lapan-Tubsat pada ketinggian 630 km dengan mempergunakan metode dari Picone et al. (2005). Selain itu, perlu juga diketahui seberapa besar pengaruh radiasi EUV dan aktivitas geomagnet terhadap perubahan kerapatan atmosfer. Lapan-Tubsat adalah satelit mikro pertama milik Lapan dan Indonesia yang diluncurkan pada tahun 2007 dan hingga kini masih mengorbit. Lapan-Tubsat merupakan satelit orbit polar yang mengorbit pada ketinggian sekitar 630 km. Terkait dengan rancangan generasi satelit mikro Lapan selanjutnya yang akan ditempatkan di orbit rendah, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan informasi perihal perubahan kerapatan atmosfer yang berbanding lurus dengan gaya hambat atmosfer pada ketinggian satelit akibat pengaruh cuaca antariksa, yaitu radiasi EUV dan aktivitas geomagnet.

2 DATA DAN METODOLOGI

2.1 Data Parameter Cuaca Antariksa

Data parameter aktivitas matahari yang digunakan adalah fluks matahari F10.7, yaitu emisi yang dipancarkan oleh matahari pada panjang gelombang 10.7 cm pada orbit Bumi yang merupakan proksi dari radiasi EUV (Delgado, 2008; King-Hele, 1987; Vallado, 2007). Sedangkan parameter untuk aktivitas geomagnet dipergunakan nilai dari indeks Ap, yaitu indeks planetari untuk mengukur besarnya gangguan yang dialami oleh medan magnet Bumi akibat pengaruh angin matahari dan partikel energi tinggi dari peristiwa *flare* dan CME. Data fluks F10.7 dan indeks Ap dalam skala harian diunduh dari *Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR) National Geophysics Data Center (NGDC) National Oceanic and Atmospheric Agency (NOAA)* pada situs <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>. Rentang data yang dipergunakan dari tahun 2008 hingga 2011. Gambar 2-1 berikut merupakan plot harian data F10.7 dan indeks Ap dari tahun 2008 hingga 2011.



Gambar 2-1: Plot data harian F10.7 dan indeks Ap tahun 2008 – 2011

2.2 Data Elemen Orbit LAPAN-Tubsat

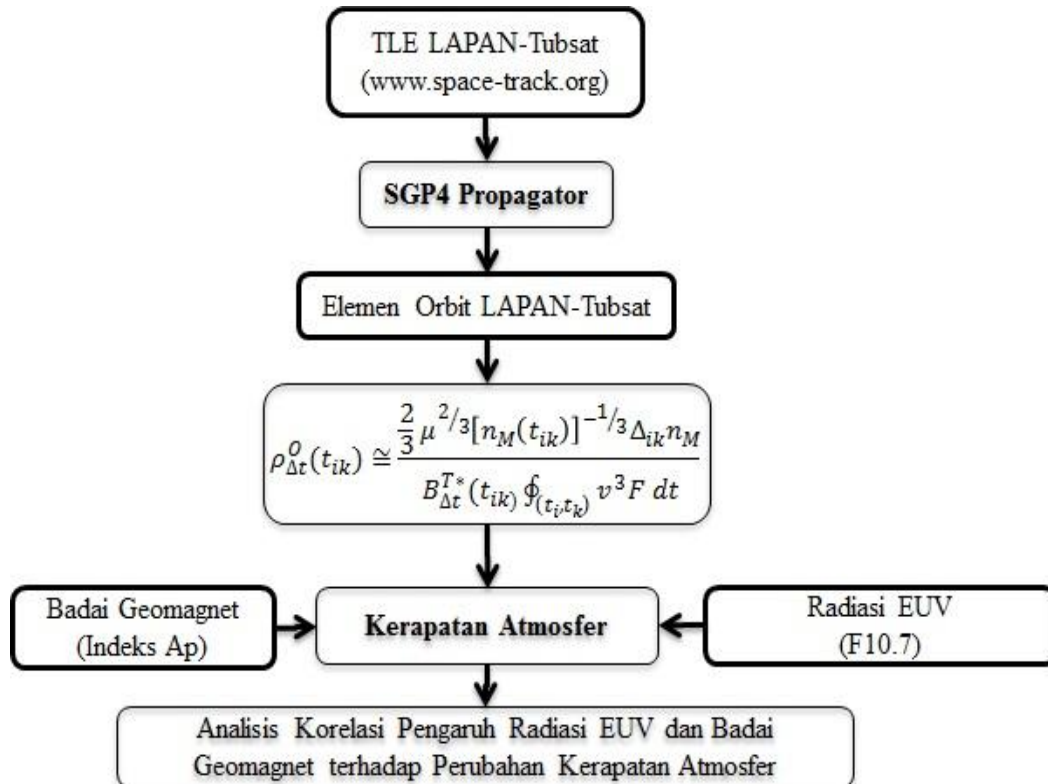
Data elemen orbit dalam bentuk *Two-Line Element (TLE)*, yaitu format data yang memuat set elemen orbit dari satelit yang mengorbit Bumi. TLE merupakan hasil *fitting* antara data pengamatan menggunakan teleskop dan radar dengan model propagasi orbit *Simplified General Perturbation 4 (SGP4)* yang dilakukan oleh *United States Space Command (USSPACECOM)* dengan jaringan pengamatan bernama *Space Surveillance Network (SSN)*. SGP4 sendiri adalah model matematis yang digunakan untuk menghitung vektor posisi orbit satelit dan sampah antariksa relatif terhadap sistem koordinat inersia Bumi. Data ini diunduh dari situs <https://www.space-track.org> untuk tahun 2008 hingga 2011. Penjelasan mengenai format data TLE dapat merujuk pada Rachman (2007). Berikut contoh data TLE LAPAN-Tubsat pada tanggal 13 Januari 2010:

```

1 29709U 07001A 10013.02150718 -.00000047 00000-0 56176-6 0 3407
2 29709 097.7846 067.7233 0012809 326.5509 033.4890 14.80276907162525
1 29709U 07001A 10013.29189179 -.00000045 00000-0 84377-6 0 3412
2 29709 097.7846 067.9856 0012805 325.6347 034.4040 14.80276945162568
1 29709U 07001A 10013.76506455 -.00000025 00000-0 34432-5 0 3429
2 29709 097.7847 068.4445 0012796 324.1481 035.8873 14.80277115162638
1 29709U 07001A 10013.90025678 -.00000028 +00000-0 +30176-5 0 03433
2 29709 097.7846 068.5756 0012777 323.6954 036.3387 14.80277079162658
    
```

2.3 Metodologi

Dengan mempergunakan *Simplified General Perturbation 4* (SGP4) yang kode programnya diunduh di www.celestrak.com, maka akan didapatkan elemen-elemen orbit dari *Two Line Element* (TLE) Lapan-Tubsat untuk setiap epochnya selama tahun 2008 hingga 2011. Dengan diketahuinya elemen-elemen orbit Lapan-Tubsat, maka dengan menggunakan persamaan (1) dari Picone et al. (2005) dapat diperoleh nilai kerapatan atmosfer untuk ketinggian 630 km. Nilai dari kerapatan atmosfer Lapan-Tubsat ini dianalisis untuk mencari korelasi antara besar pengaruh fluks matahari F10.7 dan indeks Ap dengan perubahan kerapatan atmosfer. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 2-2:



Gambar 2-2: Metodologi yang dipergunakan dalam penelitian ini

Data elemen orbit Lapan-Tubsat yang diunduh dari *Space-Track* diekstraksi elemen orbitnya dengan menggunakan propagator orbit SGP4. Elemen orbit tersebut dimasukkan kedalam persamaan (1-1) untuk diperoleh nilai kerapatan atmosfernya dengan penjelasan sebagai berikut:

- t_{ik} = selang waktu iterasi yang dipilih : $t_{ik} \equiv (t_i + t_k)/2$
- $\rho_{\Delta t}^0(t_{ik})$ = kerapatan atmosfer total dalam selang waktu t_{ik} (kg/m^3)
- $\mu = GM$, perkalian konstanta gravitasi dan massa Bumi ($3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$).
- $\Delta_{ik} n_M = n_M(t_k) - n_M(t_i)$, selisih *mean mean motion* antara selang waktu t_{ik} , nilai ini diperoleh langsung dari TLE
- $n_M(t_{ik})$ = perubahan *mean mean motion* dalam selang waktu t_{ik} , nilai ini diperoleh langsung dari TLE
- B = invers koefisien balistik (m^2/kg) dengan : $B = b^{-1} = \frac{c_D A}{m}$ dimana C_d = koefisien hambatan umumnya dianggap memiliki nilai 2,2 (Vallado, 2007), A = luas permukaan yang berhadapan langsung dengan arah gerak (*cross section area*- m^2), dan m = massa satelit (kg)
- v = kecepatan satelit (m/s), diperoleh dengan menggunakan propagator orbit SGP4

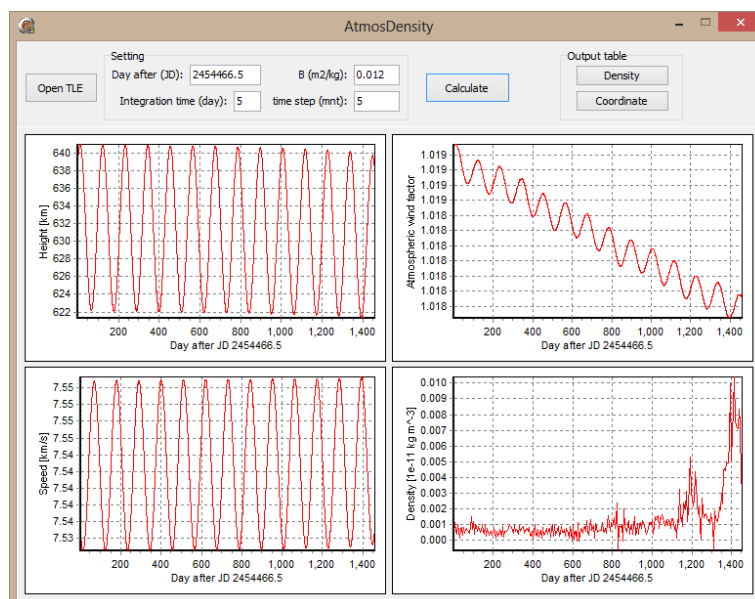
– $F = \text{wind factor}$ (tidak berdimensi) : $F \cong \left(1 - \frac{r\omega}{v} \cos i\right)^2$ (King-Hele, 1987) dimana $r =$ jarak satelit ke pusat Bumi (m), $\omega =$ kecepatan sudut rotasi Bumi (m/s), $i =$ sudut inklinasi satelit yang diperoleh dari propagator orbit SGP4

Nilai kerapatan atmosfer yang telah diperoleh kemudian dilakukan analisis korelasi terhadap parameter aktivitas matahari (F10.7) dan aktivitas geomagnet (indeks Ap). Selain itu dilakukan pula analisis untuk melihat seberapa besar peningkatan kerapatan atmosfer terhadap skala aktivitas matahari dan aktivitas geomagnet.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Ekstraksi Kerapatan Atmosfer dari Data TLE dan Perbandingannya dengan Model Atmosfer

Untuk mengekstraksi kerapatan atmosfer dari data TLE telah dibuat perangkat lunak bernama *AtmosDensity*. *AtmosDensity* berfungsi untuk mengekstraksi kerapatan atmosfer dari data elemen orbit suatu satelit berdasarkan metode dari Picone et al. (2005).



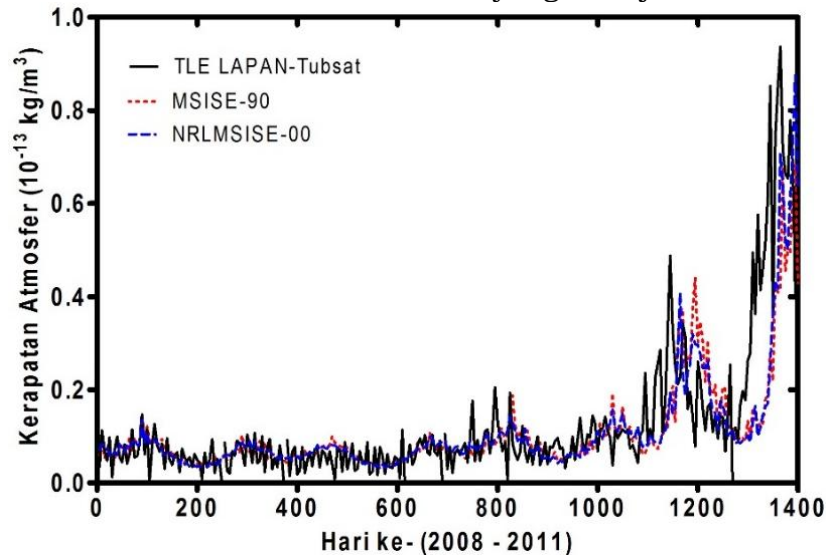
Gambar 3-1: Antarmuka tampilan perangkat lunak *AtmosDensity* untuk menghitung kerapatan atmosfer berdasarkan data TLE. Contoh di atas menggunakan data elemen orbit satelit Lapan-Tubsat dari tahun 2008 - 2011

AtmosDensity (Gambar 3-1) yang dikembangkan oleh Pusat Sains Antariksa Lapan membutuhkan masukan berupa set elemen orbit dari data TLE, waktu mulai pengolahan data dalam *Julian Day* (JD), invers koefisien balistik (B), selang waktu integrasi dalam hari, dan selang waktu iterasi pemrosesan dalam menit.

Keluaran yang dihasilkan berupa nilai kerapatan atmosfer (10^{-11} kg/m^3) dan grafik kecepatan (km/s), ketinggian (km), faktor angin, serta kerapatan atmosfer. Parameter penting yang harus ditentukan adalah selang waktu integrasi (t_{ik}) dan nilai invers koefisien balistik (B). Selang waktu integrasi (t_{ik}) dipilih 5 (lima) hari. Pemilihan resolusi temporal ini terkait dengan perubahan *mean motion*. Emmert (2009) menyebutkan bahwa penurunan dari *mean motion* mengindikasikan adanya manuver orbit atau *noise* dari skala waktu *mean motion* sehingga menyebabkan nilai kerapatan negatif. Nilai negatif ini tidak dapat dihindari sebagai akibat dari sebaran statistik (karena tingkat ketelitian yang terbatas) dari perubahan *mean motion* dan tetap harus disertakan dalam perhitungan rata-rata kerapatan untuk menghindari hasil yang tidak sesuai. Rata-rata resolusi temporal (selang waktu) untuk memperoleh kerapatan dari TLE untuk data TLE terbaru, menurut Emmert (2009), yang terbaik adalah 3 hari

tetapi jika menggunakan data TLE tahun 1967 – 1970, resolusi temporalnya adalah 6 – 8 hari dan data TLE setelah tahun 1970 adalah 4 hari. Sebagai akibat dari pemilihan selang waktu integrasi tersebut, maka model kerapatan atmosfer berbasis data TLE ini hanya mampu memperlihatkan variasi musiman walau tidak sebaik yang ditunjukkan oleh model NRLMSISE-00. Selain itu, model kerapatan atmosfer dari Picone et al. (2005) juga tidak mampu menunjukkan variasi kerapatan atmosfer harian serta variasi siang ke malam perubahan kerapatan atmosfer (*day to night variation*) (Rachman, 2012).

Parameter kedua yang harus ditentukan adalah invers koefisien balistik (B). Nilai B sangat penting dalam menentukan nilai sebenarnya dari kerapatan atmosfer walaupun estimasi yang presisi untuk nilai B belum dapat dilakukan hingga saat ini, dan untuk obyek yang rutin diamati, estimasi dari nilai rata-rata B sudah mencukupi untuk digunakan dalam perhitungan kerapatan atmosfer (Picone et al., 2005). Nilai B yang digunakan dalam penelitian ini adalah $0.012 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Rachman & Dani, 2012). Setelah menentukan kedua parameter tambahan tersebut maka diperoleh nilai kerapatan atmosfer dari data TLE LAPAN-Tubsat yang ditunjukkan Gambar 3-2.



Gambar 3-2: Plot kerapatan atmosfer total dari TLE LAPAN-Tubsat, model atmosfer MSISE-90 dan NRLMSISE-00 tahun 2008 - 2011

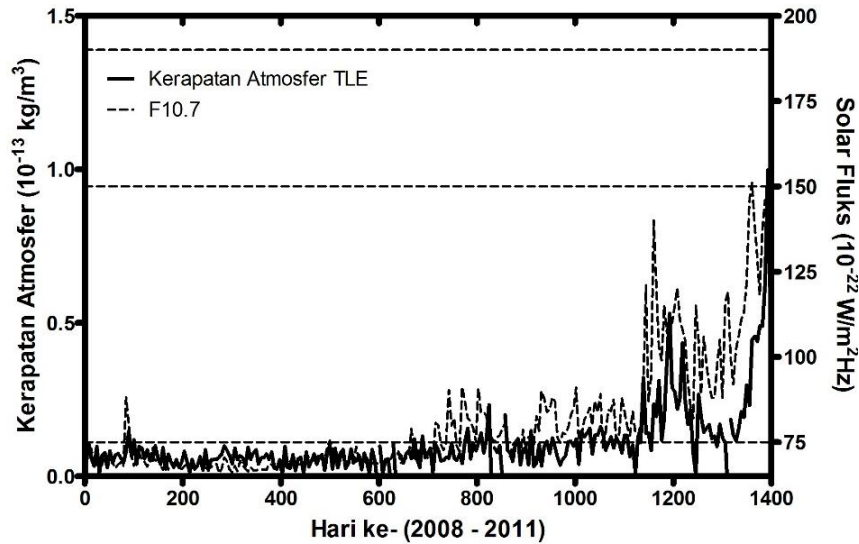
Gambar 3-2 menunjukkan pola variasi kerapatan atmosfer dari data TLE LAPAN-Tubsat telah sesuai dengan variasi kerapatan atmosfer yang diperoleh dari model atmosfer MSISE-90 dan NRLMSISE-00. Kesesuaian model atmosfer dari data TLE dengan model atmosfer MSISE90 dan NRLMSISE-00 menunjukkan bahwa data TLE telah mampu menunjukkan pola variasi jangka panjang, yaitu variasi musiman dan variasi siklus matahari yang sama dengan model atmosfer yang ada, sedangkan variasi jangka pendek (variasi harian dan variasi siang-malam) tidak dapat terlihat. Hal ini juga didukung oleh penelitian Rachman (2012). Selain itu, terlihat bahwa peningkatan kerapatan atmosfer setelah hari ke-1000 atau sekitar tanggal 27 September 2010 diakibatkan oleh dimulainya peningkatan aktivitas matahari (Gambar 2-1) pada siklus ke-24 dan nilai kerapatan tertinggi setelah hari ke-1300 atau pada September 2011 sebagai akibat semakin meningkatnya aktivitas matahari.

3.2 Pengaruh Radiasi EUV Terhadap Variasi Kerapatan Atmosfer

Gambar 3-3 merupakan plot kerapatan atmosfer yang diperoleh dari TLE LAPAN-Tubsat dan F10.7. Garis mendatar putus-putus menunjukkan skala aktivitas matahari berdasarkan nilai F10.7. Skala aktivitas matahari berdasarkan parameter F10.7 menurut Lechtenberg (2010) dibagi dalam klasifikasi sebagai berikut:

- Aktivitas matahari rendah : $F10.7 \leq 75$
- Aktivitas matahari sedang : $75 < F10.7 < 150$
- Aktivitas matahari tinggi : $150 < F10.7 < 190$
- Aktivitas matahari sangat tinggi : $190 \leq F10.7$

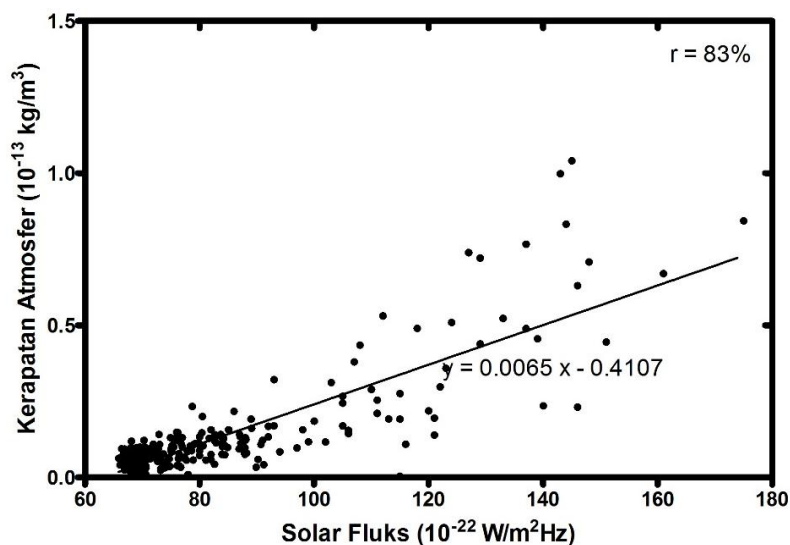
Terlihat bahwa sepanjang tahun 2008 - 2011, aktivitas matahari tidak pernah mencapai skala sangat tinggi ($F10.7 \geq 190$), saat mendekati hari ke-1400 aktivitas matahari hanya mencapai level tinggi yang menyebabkan terjadinya peningkatan kerapatan atmosfer.



Gambar 3-3: Plot kerapatan atmosfer dari TLE LAPAN-Tubsat dan fluks F10.7

Untuk meninjau variasi kerapatan atmosfer akibat radiasi EUV digunakan parameter fluks radio dari matahari (F10.7) yang merupakan parameter aktivitas matahari dalam panjang gelombang 10.7 cm atau frekuensi 2800 MHz. F10.7 merupakan indikator adanya peningkatan radiasi EUV yang memanaskan atmosfer atas Bumi. Pada Gambar 3-3 terlihat peningkatan aktivitas matahari menyebabkan peningkatan radiasi EUV berakibat terjadinya peningkatan kerapatan atmosfer total pada tahun 2010 dan 2011 (Hari ke-1100). Terjadinya peningkatan kerapatan ini akan menyebabkan peningkatan hambatan atmosfer yang diterima oleh LAPAN-Tubsat sehingga akan mempengaruhi kala hidup satelit tersebut di orbit.

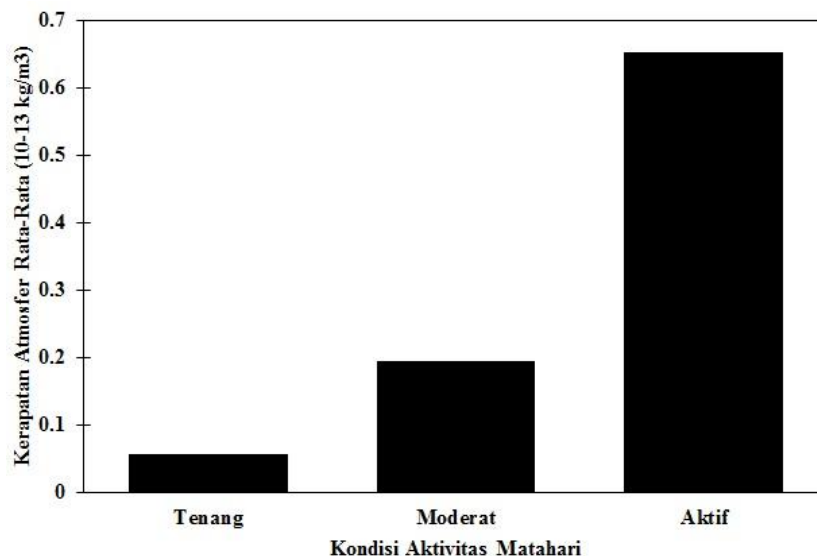
Untuk melihat pengaruh dari radiasi EUV terhadap perubahan kerapatan atmosfer dipergunakan analisis korelasi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3-4



Gambar 3-4: Korelasi F10.7 terhadap kerapatan atmosfer pada ketinggian Lapan-Tubsat (630 km)

Gambar 3-4 memperlihatkan korelasi F10.7 terhadap nilai kerapatan atmosfer pada ketinggian orbit Lapan-Tubsat, yaitu 630 km. Hasil yang diperoleh terdapat korelasi sebesar 83% antara radiasi EUV dan perubahan kerapatan atmosfer. Menurut beberapa literatur diketahui bahwa faktor terbesar penyumbang variasi kerapatan atmosfer adalah dari radiasi EUV matahari hingga sebesar 85% (Wertz, 2001; Vallado, 2007; Bowman et al., 2008; Delgado, 2008; Doornbos, 2011). Peningkatan energi radiasi dari matahari akan berinteraksi dengan atom oksigen dan helium yang dominan pada ketinggian 630 km (lapisan termosfer) yang menyebabkan peningkatan energi atom O dan He yang diikuti dengan meningkatnya kerapatan atmosfer (King-Hele, 1987). Variasi iradiansi ini akan menyebabkan terjadinya variasi pada komposisi, temperatur, kerapatan dan distribusi angin di termosfer Bumi.

Nilai kerapatan atmosfer rata-rata jika ditinjau dari skala aktivitas matahari berdasarkan parameter F10.7 menurut Lechtenberg (2010), diperlihatkan pada Gambar 3-5



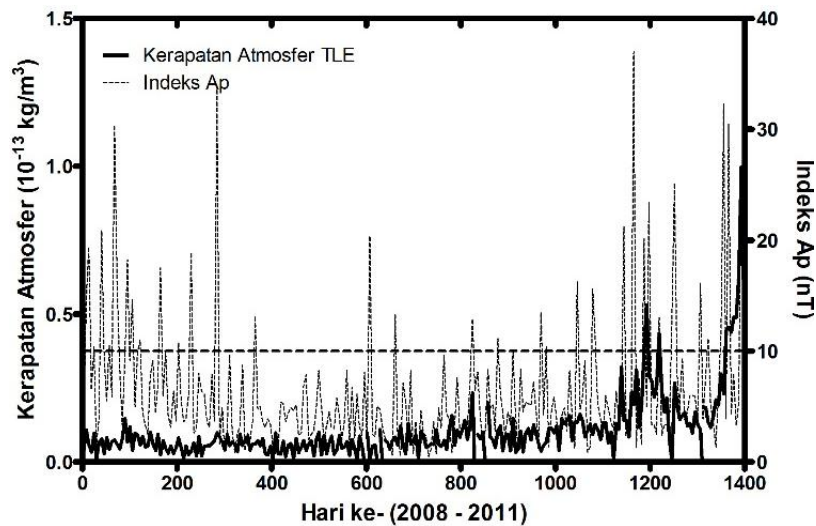
Gambar 3-5: Nilai kerapatan atmosfer rata-rata dari data TLE Lapan-Tubsat berdasarkan kondisi aktivitas matahari

Terjadi kenaikan kerapatan atmosfer rata-rata sebesar 4 kali saat aktivitas matahari moderat dibanding saat keadaan matahari tenang. Sedangkan saat aktivitas matahari tinggi terjadi peningkatan hingga 11 kali dibanding saat keadaan matahari tenang. Peningkatan lebih besar saat aktivitas matahari tinggi disebabkan energi oleh energi dari radiasi EUV matahari akan semakin besar saat matahari semakin aktif yang ditandai dengan semakin banyak terjadi *flare* atau CME.

3.3 Pengaruh Aktivitas Geomagnet Terhadap Variasi Kerapatan Atmosfer

Seperti yang sudah diketahui bahwa peningkatan kerapatan atmosfer disebabkan oleh dua proses fisis yang berperan utama, yaitu pemanasan atmosfer akibat radiasi *Extreme Ultra Violet (EUV)* dari matahari dan pemanasan Joule yang berasosiasi dengan peningkatan arus lokal (*local current*) akibat peristiwa aktivitas geomagnet. Pada Gambar 3-6 ditunjukkan plot kerapatan atmosfer dari data TLE Lapan-Tubsat dan indeks Ap yang merupakan proksi terjadinya aktivitas geomagnet. Garis mendatar putus-putus merupakan skala aktivitas geomagnet berdasarkan indeks Ap. Skala aktivitas geomagnet berdasarkan parameter indeks Ap menurut Lechtenberg (2010) dibagi dalam klasifikasi sebagai berikut:

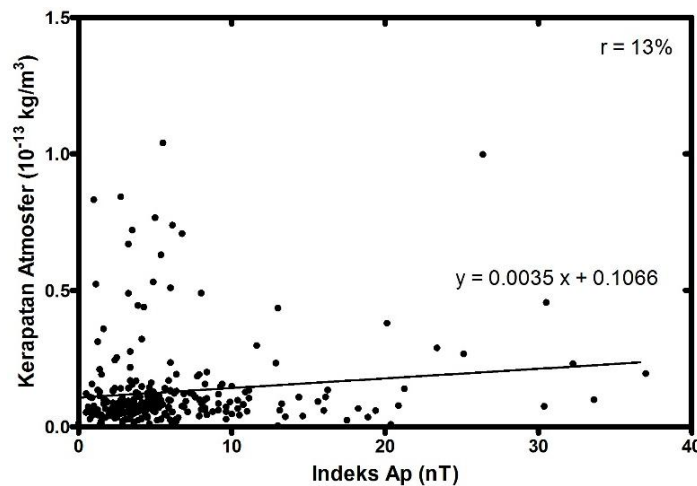
- Aktivitas geomagnet tenang : $Ap \leq 10$
- Aktivitas geomagnet sedang : $10 < Ap < 50$
- Aktivitas geomagnet tinggi : $Ap \geq 50$



Gambar 3-6: Plot kerapatan atmosfer dari TLE Lapan-Tubsat dan indeks Ap

Terlihat bahwa sepanjang tahun 2008 – 2011, tidak pernah terjadi aktivitas geomagnet skala tinggi ($A_p \geq 50$), hanya mencapai skala moderat. Selain itu, pola variasi nilai indeks A_p tidak sesuai dengan variasi kerapatan atmosfer. Hal ini disebabkan karena pengaruh aktivitas geomagnet terhadap kerapatan atmosfer bersifat transien, yaitu partikel-partikel dari angin matahari yang masuk lewat kutub-kutub Bumi. Partikel ini kemudian akan berinteraksi dengan partikel-partikel yang ada di kutub dan menyebabkan pemanasan atmosfer yang menyebar menuju ekuator jika energinya mencukupi. Indeks A_p akan meningkat saat terjadi peristiwa CME yang menyebabkan peningkatan densitas dan kecepatan angin matahari yang kemudian berinteraksi dengan medan magnet Bumi dan menyebabkan aktivitas geomagnet.

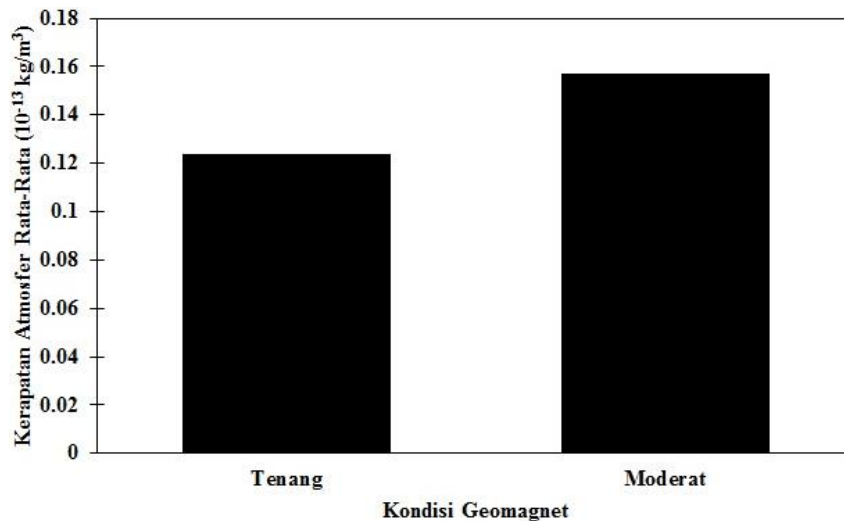
Untuk melihat pengaruh dari aktivitas geomagnet terhadap perubahan kerapatan atmosfer dipergunakan analisis korelasi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3-7



Gambar 3-7: Korelasi indeks A_p terhadap kerapatan atmosfer pada ketinggian Lapan-Tubsat (630 km)

Terlihat bahwa korelasi antara indeks A_p terhadap kerapatan atmosfer hanya bernilai 13%. Korelasi ini lebih disebabkan karena aktivitas geomagnet bersifat transien. Aktivitas geomagnet hanya berkontribusi sebesar 30% terhadap perubahan kerapatan atmosfer dan sifatnya hanya menguatkan nilai kerapatan atmosfer dari akibat radiasi EUV (Kim et al., 2006; Delgado, 2008).

Nilai kerapatan atmosfer rata-rata jika ditinjau dari skala aktivitas geomagnet berdasarkan parameter indeks A_p menurut Lechtenberg (2010), diperlihatkan pada Gambar 3-8



Gambar 3-8: Nilai kerapatan atmosfer rata-rata dari data TLE Lapan-Tubsat berdasarkan aktivitas geomagnet

Terjadi kenaikan kerapatan atmosfer rata-rata sebesar 15% saat keadaan geomagnet moderat dibanding saat keadaan geomagnet tenang. Peningkatan aktivitas geomagnet tidak memberikan dampak lebih besar dibanding akibat peningkatan aktivitas matahari dari radiasi EUV karena sifat dari aktivitas geomagnet yang transien dan efek terhadap kerapatan atmosfer hanya bersifat menguatkan.

4 KESIMPULAN

Nilai kerapatan atmosfer dengan menggunakan elemen orbit berupa data TLE Lapan-Tubsat dilakukan dengan membangun perangkat lunak AtmosDensity berdasarkan metode dari Picone et al. (2005) yang dapat menunjukkan adanya variasi musiman dan variasi akibat aktivitas matahari pada kerapatan atmosfernya. Kerapatan atmosfer pada ketinggian Lapan-Tubsat sangat dipengaruhi oleh radiasi EUV dari aktivitas matahari serta akibat dari aktivitas geomagnet. Analisis korelasi perubahan kerapatan atmosfer diketinggian Lapan-Tubsat akibat radiasi EUV matahari melalui proksi F10.7 memperoleh nilai sebesar 83%. Besarnya kenaikan kerapatan atmosfer diketinggian Lapan-Tubsat akibat aktivitas matahari moderat dan tinggi masing-masing sebesar 4 kali dan 11 kali dari nilai kerapatan atmosfer rata-rata saat aktivitas matahari tenang. Sedangkan perubahan kerapatan akibat pengaruh aktivitas geomagnet diketinggian Lapan-Tubsat dengan menggunakan analisis korelasi memperoleh nilai sebesar 13% dan terjadi kenaikan nilai kerapatan rata-rata sebesar 15% saat terjadi aktivitas geomagnet moderat dibandingkan kondisi saat geomagnet tenang.

Ucapan terima kasih

Terima kasih sebesar-besarnya kepada USSPACECOM atas data *Two-Line Element* (TLE) di situs Space-Track yang merupakan data utama yang dipergunakan dalam penelitian ini, terima kasih juga kepada Dr. T. S. Kelso atas kode program *Simplified General Perturbator 4* (SGP4) yang tersedia di situs Celestrak serta terima kasih juga sebesar-besarnya kepada NASA dan NOAA atas data cuaca antariksanya.

DAFTAR RUJUKAN

Bowman, B. R., Tobiska, W. K. & Kendra, M. J., 2008. *The Atmospheric Semiannual Density Response to Solar EUV Heating*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, p. 1482 – 1496.

- Delgado, M. R., 2008. *Atmospheric Drag: Modeling the Space Environment*, Course Material ed. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid, E.T.S.I. Aeronauticos.
- Doornbos, E., 2011. *Thermospheric Density and Wind Determination From Satellite Dynamics*, Dissertation ed. Delft: TU Delft, School of Aerospace Engineering.
- Emmert, J. T., 2009. *A Long Term Data Set of Globally Averaged Thermospheric Total Mass Density*, Journal of Geophysical Research, Volume 114.
- Kim, K. H., Moon, Y. J., Cho, K. S., Ki, H. D., and Park, J. Y., 2006. *Atmospheric Drag Effect on The KOMPSAT-1 Satellite During Geomagnetic Superstorms*, Earth Planet Space, pp. 25-28.
- King-Hele, D., 1987. *Satellite Orbits in An Atmosphere: Theory and Applications*, 1st ed. London: Blackie and Son Ltd.
- Knowles, S. H., Picone, J. M., Thonnard, S. E. & Nicholas, A., 2001. *The Effect of Atmospheric Drag on Satellite Orbits During the Bastille Day Event*, Solar Physics, Issue 204, pp. 387-397.
- Lechtenberg, T. F., 2010. *Derivation And Observability Of Upper Atmospheric Density Variations Utilizing Precision Orbit Ephemerides*, Master Theses ed. Kansas: University of Kansas, School of Aerospace Engineering.
- Park, J., Moon, Y. J., Kim, K. H., Cho, K. S., Kim, H. D., Kwak, Y. S., Kim, Y. H., Park, Y. D., and Yi, Y., 2008. *Comparison Between The KOMPSAT-1 Drag Derived Density And The MSISE Model Density During Strong Solar And/Or Geomagnetic Activities*, Earth Planet Space, Issue 60, pp. 601-606.
- Picone, J. M., Emmert, J. T. and Lean, J. L., 2005. *Thermospheric Densities Derived From Spacecraft Orbits : Accurate Processing of Two Line Element*, Journal of Geophysical Research, Volume 110.
- Rachman, A., 2007. *Karakteristik Data TLE dan Pengolahannya*, Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara, Volume 2, No.2, Hal.49-60.
- Rachman, A., 2012. *Kerapatan Atmosfer Hasil Pengolahan Data TLE: Perbandingannya Dengan Model NRLMSISE-00*, Buku Matahari dan Lingkungan Antariksa. Bandung: Andira Publishing.
- Rachman, A. & Dani, T., 2012. *Penentuan Koefisien Balistik Satelit Lapan-TUBSAT dari Two-Line Elements (TLE)*, Jakarta, Seminar Nasional Iptek Dirgantara XVI.
- Vallado, D. A., 2007. *Fundamental of Astrodynamics and Applications*, 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers Group.
- Wertz, J. R., 2001. *Spacecraft Orbit and Attitude Systems – Mission Geometry ; Orbit Constellation Design and Management*, s.l.:Kluwer Academic Publisher.

