

# MODEL KOEFISIEN BALISTIK SATELIT LEO SEBAGAI FUNGSI CUACA ANTARIKSA

S.L. Manurung dan Herl Sutastio  
*Peneliti Biding Mitahiri din Ungkwan Antarika, LAPAN*  
*t-mall nunurung@bdgJipin.goJd*

## ABSTRACT

The long term, 1996-2003, of star or modified ballistic coefficients,  $B^*$ , of five Low Earth Orbiting satellites, solar flux, F10.7 and geomagnetic planetary index  $A_p$  were analyzed to find out the effects of space weather on the ballistic coefficient of space craft. The daily variation and 81 days per moving average of ballistic coefficients and F10.7 were in phase, while both variation and  $A_p$  index were often out of phase. Eventhough the mechanism of ballistic coefficient generated by space weather is still not known clearly, there is a statistically closed relation between ballistic coefficient and solar flux. The relationship, called model, is a second order polinomial function with different constants. Using before and after 2003 data of both parameter the models were verified. The range and the average relative errors were 1 - 25% and 15% respectively. The relative errors are less then the relative error of predicted ballistic coefficient of Bepposax satellite obtained by NASA/JFC a month before the satellite reentry.

## ABSTRAK

Data koefisien balistik bintang,  $B^*$ , dari lima satelit LEO ketinggian 578 - 740 km, solar *fluks*, F10.7, dan indeks medan magnetik planetari  $A_p$  dari 1996-2003 dianalisis untuk mendapatkan hubungan koefisien balistik wahana antariksa dengan cuaca antariksa. Berdasarkan pola data harian dan penghalusan 81 harian dari ketiga parameter itu diperoleh hubungan grafis yang jelas antara koefisien balistik dengan F10.7. Sedangkan hubungan koefisien balistik dengan  $A_p$  tidak. Oleh karena itu dalam skala waktu panjang faktor penentu koefisien balistik adalah F10.7. Hubungan koefisien balistik dari kelima satelit LEO dengan F10.7, disebut model koefisien balistik sebagai fungsi dari solar *fluks*, berbentuk polinom orde dua dengan konstanta yang berbeda-beda. Model telah diuji-coba dengan menggunakan data koefisien balistik dari lima satelit LEO dan F10.7 sebelum dan sesudah 2003. Kesalahan model antara 1% - 25% dan kesalahan rerata 15%. Kesalahan rerata ini lebih kecil dari kesalahan prediksi koefisien balistik satelit Bepposax yang dihitung oleh NASA/JFC sebulan sebelum satelit itu reentri.

Kata kunci: *Koefisien balistik, Cuaca antariksa. Solar fluks dan Indeks medan magnetik planetari*

# 1 PENDAHULUAN

Laju peluruhan orbit dari satelit buatan orbit rendah di ketinggian kurang dari 1000 km bergantung pada ketinggian, koefisien drag atmosfer, luas penampang dan massa satelit. Perkalian dari koefisien drag atmosfer dengan perbandingan luas penampang dengan massa disebut koefisien balistik. Koefisien balistik memegang peranan penting pada laju peluruhan orbit dan dalam menentukan reentri sebuah satelit. Untuk menentukan reentri diperlukan koefisien balistik prediksi seperti dilakukan dalam penentuan reentri satelit Bepposax, (Luciano, 2003; Bowman, 2002; Kennewell,1999).

Prediksi koefisien balistik satelit Bepposax dilakukan berdasarkan perkiraan luas penampang, massa dan prediksi kerapatan atmosfer pada ketinggian orbit. Bowman (2002) menentukan koefisien balistik dengan metoda pendekatan model HADSM (*High Accuracy Density Software Model*), dan koefisien balistik TLE NORAD, OIG [*Two Line Element, North American Aerospace Defence, Orbital Information Group*], dan diperoleh koefisien balistik dengan kesalahan sekitar 25%.

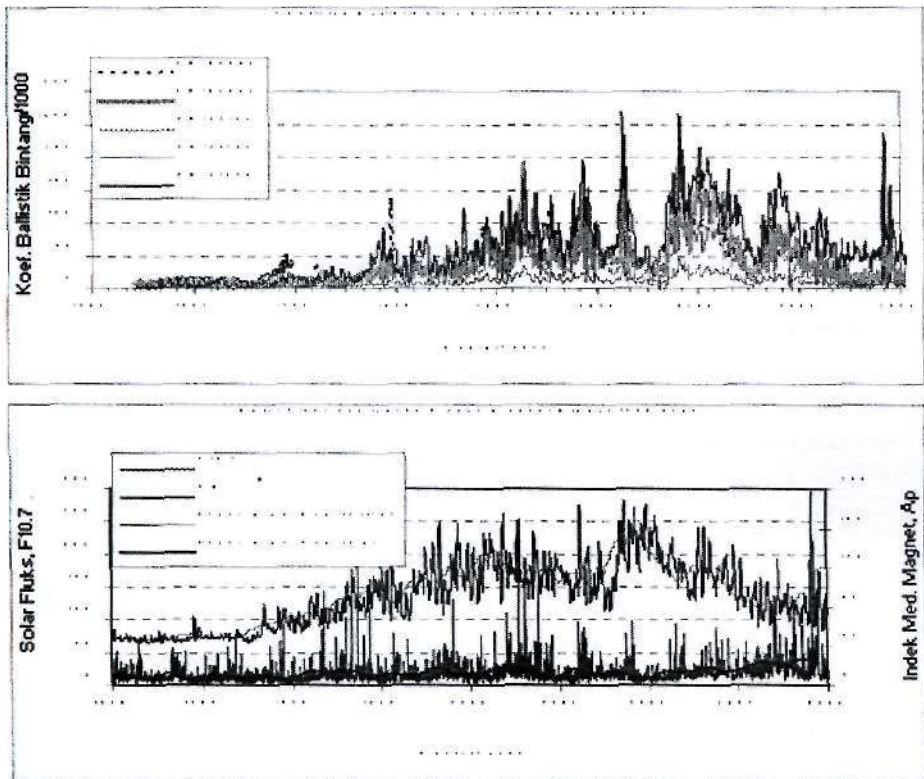
Menurut teori astrodinamika tidak terdapat hubungan yang jelas antara koefisien balistik dengan kerapatan dan ketinggian. Namun dari perilaku ketinggian deret waktu dari sebuah satelit orbit rendah terlihat hubungan grafis laju peluruhan orbit dengan aktivitas matahari, (Djamaluddin dkk, 2004). Aktivitas matahari secara tidak langsung berpengaruh pada kerapatan atmosfer. Dari pernyataan dan keadaan empirik di atas digambarkan koefisien balistik bintang deret waktu (yang terdapat dalam TLE NORAD) dari lima buah satelit LEO dengan nomor katalog 21701, 21694, 22109, 23940 dan 23547, profil *fluks* matahari F10.7 dan indeks medan magnetik planetari Ap, 1996-2003. Perilaku deret waktu koefisien balistik bintang dan F10.7 mem-perlihatkan kesamaan pola variasi skala waktu pendek dan panjang namun koefisien balistik bintang dan indeks medan magnetik planetari tidak, bahkan sering berlawanan fasa. Oleh karena itu terdapat hubungan yang signifikan dari koefisien balistik dengan F10.7

Dari konversi koefisien balistik bintang dengan koefisien balistik dan analisis seksama perilaku koefisien balistik satelit LEO dan *fluks* matahari diperoleh hubungan koefisien balistik dengan F10.7 berbentuk polinom orde dua dengan konstanta yang berbeda. Koefisien korelasi dari koefisien balistik dengan F10.7 dari kelima satelit lebih besar dari 0,90 dan kesalahan model (kesalahan koefisien balistik model dan koefisien balistik sebelum dan sesudah Desember 2003) pada kisaran 1 - 25 % dan kesalahan rerata sekitar 15%. Kesalahan relatif koefisien balistik model sama dengan kesalahan relatif prediksi koefisien balistik satelit LEO Bepposax yang diperoleh oleh JFC/OIG, NASA, (Luciano, 2003).

## 2 DATA DAN PENGOLAHANNYA

Koefisien balistik bintang (*star ballistic coefficient*,  $B^*$ , atau *modified ballistic coefficient*) dari lima satelit LEO yang diperoleh dari TLE NORAD OIG, dan proksi cuaca antariksa atau aktivitas matahari, solar *fluks* (F10.7) dan indeks medan magnetik planetari ( $A_p$ ) yang diekstrak dari website NOAA selama siklus matahari ke-23, 1996-2003, serta beberapa bulan dari 2004 diperlihatkan pada Gambar 2-1. Koefisien balistik bintang dapat mewakili koefisien balistik ( $B$ ), karena kedua besaran itu sebanding, (Hammons, 2001).

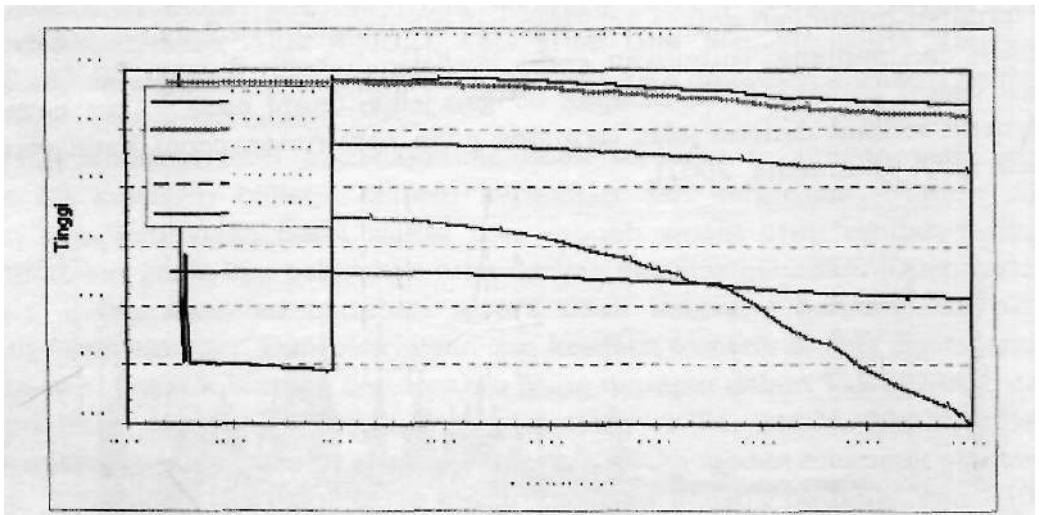
Koefisien balistik, F10.7 dan  $A_p$  harian pada interval waktu di atas sangat variatif. Meskipun demikian terlihat pola grafis yang hampir sama yakni pola koefisien balistik dan solar *fluks* dalam perioda pendek dan panjang. Namun pola grafis dari indeks medan magnetik planetari harian dan pola grafis penghalusan 81 harian dari F10.7 dan  $A_p$  tidak sama. Oleh karena itu terdapat hubungan antara koefisien balistik dengan F10.7 dalam perioda pendek dan panjang. Hubungan grafis koefisien balistik dengan  $A_p$  dalam skala waktu panjang tidak nampak dengan jelas, tetapi pada waktu badai magnetik terlihat dengan jelas terutama pada penurunan cepat ketinggian satelit LEO, (Hammons, 2001).



Gambar 2-1: Koefisien balistik bintang lima satelit LEO, (legenda, atas) serta solar *fluks*, indeks medan magnet global dan penghalusan 81 harian (bawah), 1996-2003

Ketinggian satelit LEO tidak terdapat dalam TLE, tetapi dapat diturunkan dari hubungan ketinggian dengan jumlah putaran rerata harian. Perilaku ketinggian harian kelima satelit LEO diperlihatkan oleh Gambar 2-2. Ketinggian dan beberapa elemen orbit kelima satelit LEO yang diperoleh dari OIG, NASA, diperlihatkan pada Tabel 2-1.

Pada umumnya koefisien balistik bintang dari satelit LEO 21694 lebih besar dibandingkan dengan koefisien balistik lainnya (Gambar 2-1). Koefisien balistik itu semakin besar seiring dengan penurunan ketinggian dari 628 km menjadi 451 km (Ah = 176 km selama 8 tahun, dibandingkan dengan perubahan ketinggian satelit lainnya yang relatif kecil). Pada umumnya satelit LEO di ketinggian lebih besar dari 500 km, perubahan ketinggiannya sangat lambat atau dengan perkataan lain usia edarnya lama, dapat mencapai puluhan tahun.



Gambar 2-2: Ketinggian lima satelit LEO, 1996-2003

Tabel 2-1: KETINGGIAN DAN BEBERAPA ELEMEN ORBIT LIMA SATELIT LEO

No. Katalog Satelit	Ketinggian, km		Inklinasi derajat	RCS m <sup>2</sup>
	Awal	Akhir		
23940	730	720	98,3	1,8474
23547	740	710	70	0,529
22109	689	665	19,8	14,718
21694	628	451	31,3	2,6487
21701	578	556	57	23,602

RCS\*\* Radar Cross Section, luas penampang tangkapan radar

Berdasarkan Gambar 2-1 dan data Tabel 2-1 besarnya variasi perioda pendek dan panjang koefisien balistik bintang tidak berhubungan dengan inklinasi dan luas penampang tangkapan radar (*radar cross section*). Yang

jelas adalah kecenderungan perubahan koefisien balistik bintang yang mengikuti perubahan *fluks* emisi radio pada panjang gelombang 10.7 cm. Hubungan matematis kedua parameter itu akan diperlihatkan pada bagian berikutnya.

### 3 HASIL

Koefisien balistik bintang,  $B^*$ , dalam TLE NORAD dinyatakan dengan  $(C_p A/m) p_0 R_e$  (Forbes, 2002). Dengan demikian koefisien balistik,  $B$  menjadi,  $2 B^*/\{ p_0 R_e\}$ . Parameter di atas adalah  $C_0$  = koefisien drag atmosfer,  $A$  dan  $m$  masing-masing adalah luas penampang dan massa satelit,  $p_0$  = kerapatan atmosfer acuan di ketinggian 120 km =  $2,438 \times 10^{-8}$  kg/m<sup>3</sup> dan  $R_e$  = jejari ekuator bumi - 6378,135 km, (Rhoden, 2000). Berdasarkan hubungan ini perilaku harian koefisien balistik kelima satelit LEO menyerupai perilaku koefisien balistik bintang harian seperti diperlihatkan pada Gambar 2-1.

Data waktu pengamatan koefisien balistik bintang dalam TLE dan solar *fluks* tidak sama. Selain itu koefisien balistik dan F10.7 sangat variatif. Perilaku data demikian menimbulkan kesulitan menentukan hubungan satu-satu deret waktu kedua parameter. Untuk mengatasi keadaan demikian dilakukan penghalusan 81 harian atau 3 kali perioda rotasi matahari, 27 hari, (Vallado 2001 dan Luciano 2003). Hal serupa juga dilakukan untuk menggambarkan siklus aktivitas matahari ke-23, (NOAA/SEC.2005). Untuk mendapatkan hubungan satu-satu pada deret waktu dilakukan digitasi secara grafis. Dengan metoda ini, dari 1996 - 2003 diperoleh 38 - 40 pasangan data acuan bagi setiap satelit. Koefisien balistik satelit LEO 21701 (koefisien balistik terkecil) dan satelit LEO 21694 (koefisien balistik terbesar) dan *fluks* matahari F10.7 serta penghalusannya diperlihatkan oleh Gambar 3-1a, 3-1b, dan 3-2. Pasangan data digitasi dari  $B$  dan F10.7 diperlihatkan oleh Gambar 3-3 dan 3-4. Berdasarkan pasangan data koefisien balistik dengan F10.7 diturunkan hubungan matematis kedua parameter, disingkat model dan koefisien korelasinya untuk kelima satelit LEO dengan nomor katalog 21701, 22109, 23547, 23940, dan 21694 masing-masing adalah

$$B \sim 0,00011 F^* - 0,0113F + 0,3277 \quad (3-1)$$

$r = 0,95$

$$B^* 0,00029F^* - 0,0103F - 1,0774 \quad (3-2)$$

$r = 0,98$

$$B^* 0,0008 F^* - 0,0888 F + 2,5703 \quad (3-3)$$

$r = 0,98$

$$B \sim 0,0008 F^* - 0,1494 F + 8,1331 \quad (3-4)$$

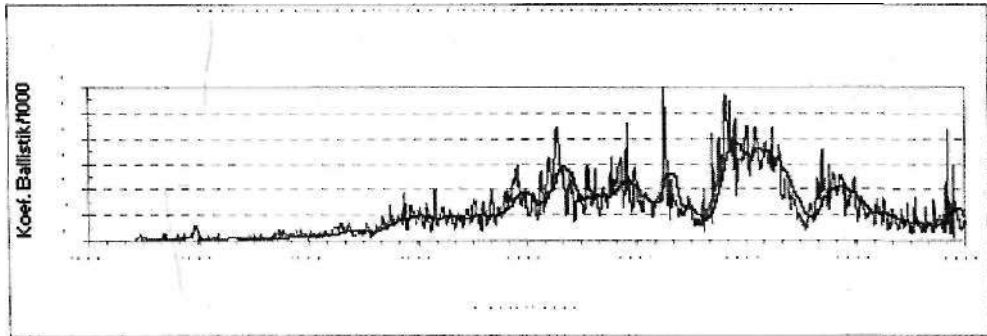
$r = 0,95$

$$B^* 0,0007F^* - 0,0821 F + 3,4365 \quad (3-5)$$

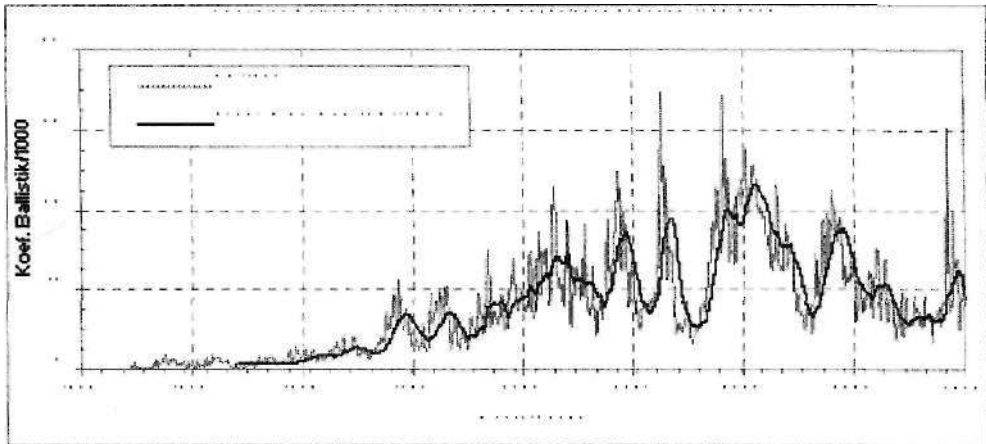
$r = 0,93$

dengan  $B$  adalah koefisien balistik dan  $F$  menyatakan *fluks* matahari F10.7

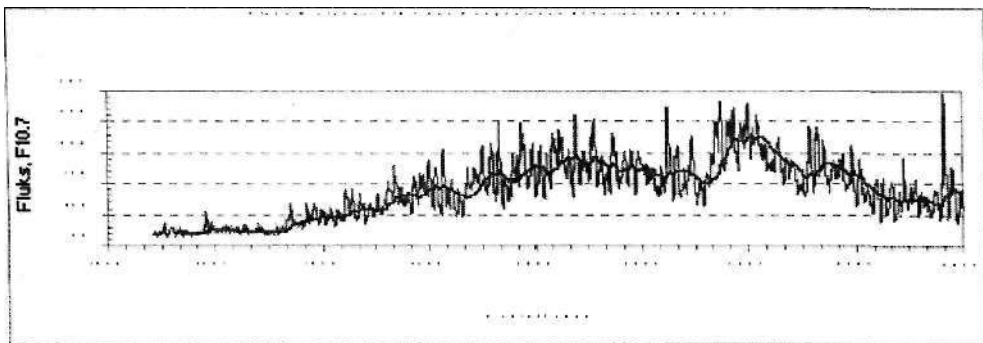
Hubungan  $B$  dan  $F$  bagi setiap satelit adalah persamaan polinom orde dua dengan konstanta yang berbeda. Akurasi model diperoleh dari nilai koefisien balistik model dibandingkan dengan koefisien balistik turunan dari koefisien balistik bintang yang terdapat dalam TLE dan F10.7 sebelum dan sesudah 2003 seperti diperlihatkan pada Tabel 3-1 dan 3-2.



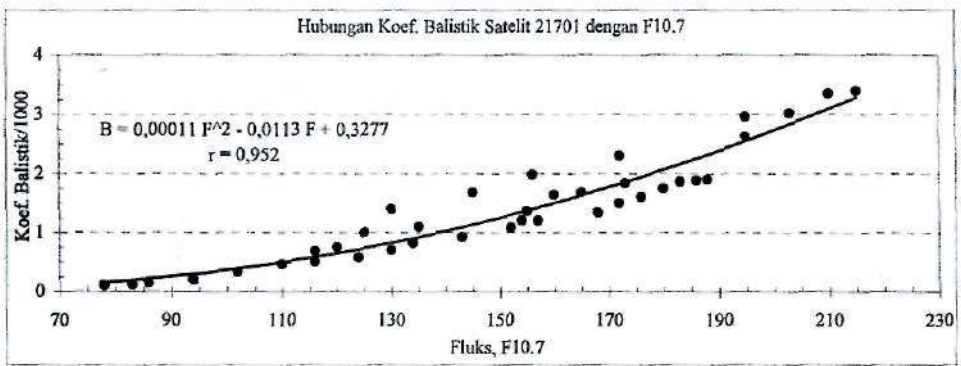
Gambar 3-1a: Koefisien balistik 21701 (atas) dan 21694 (bawah), 1996-2003, dan penghalusan 81 harian



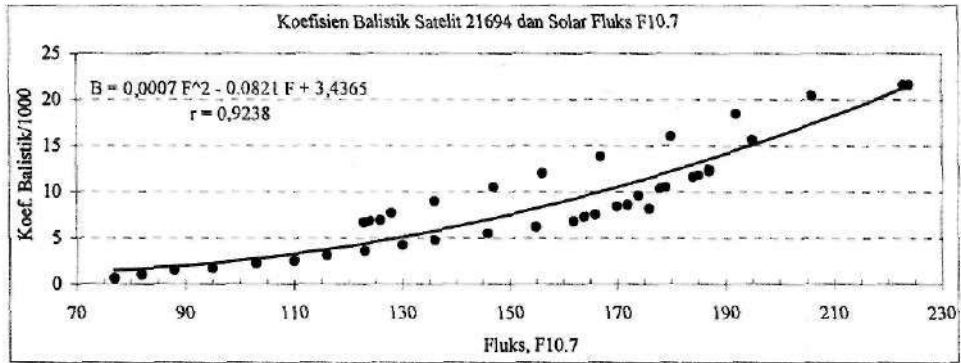
Gambar 3-1b: Koefisien balistik 21701 (atas) dan 21694 (bawah), 1996-2003, dan penghalusan 81 harian



Gambar 3-2: Solar *Fluks*, F10.7 harian, 1996-2003, dan penghalusan 81 harian



Gambar 3-3: Hubungan koefisien balistik satelit 21701 dengan *Solar Fluks*, F10.7



Gambar 3-4: Hubungan Koefisien Balistik Satelit LEO 21694 dengan *Solar Fluks*, F10.7

Tabel3-1: KESALAHAN RELATIF MODEL KOEFISIEN BALISTIK SATELIT LEO 21701

No	F10.7	Bmod	Btle	Kes, %
1	95	0,2470	0,20	23,4752
2	120	0,5557	0,45	23,4889
3	140	0,9017	0,98	7,9898
4	160	1,3357	1,65	19,0485
5	180	1,8577	1,92	3,2448
6	175	1,7190	2,10	18,1452
7	225	3,3540	3,45	2,7841
8	135	0,8070	0,92	12,2880
9	115	0,4830	0,58	16,7328
10	100	0,2977	0,38	21,6578
<b>Kesalahan Rerata</b>				<b>14,8855</b>

Tabel 3-2: KESALAHAN RELATIF MODEL KOEFISIEN BALISTIK SATELIT LEO 21694

No	F10.7	Bmod	Btle	Kes %
1	70	1,1195	0,98	14,2347
2	95	1,9545	1,7	14,9706
3	120	3,6645	3,1	18,2097
4	150	6,8715	7,5	8,38120
5	190	13,1075	13,2	0,7008
6	220	19,2545	21,8	11,6766
7	177	10,8351	13,88	21,9373
8	135	5,1105	6,8	24,8456
9	110	2,8755	3,1	7,24194
10	96	2,0061	2,6	22,8423
<b>Kesalahan Rerata</b>				<b>14,5040</b>

Catatan: Bmod= Koefisien balistik model, Btle - Koefisien balistik turunan dari TLE

Dengan cara yang saraa diperoleh hubungan koefisien balistik dari ketiga satelit LEO lainnya dengan F10.7. Model koefisien balistik kelima satelit LEO dan akurasinya diperlihatkan pada Tabel 3-3.

Tabel 3-3: MODEL KOEFISIEN BALISTIK DAN PERBANDINGANNYA DENGAN KOEFISIEN BALISTIK TLE NORAD DARI LIMA SATELIT LEO

Satelit	Model B,F	Koef. Korelasi	Kesalahan (%)	
			Kisaran	Rerata
21701	$B = 0,00011 F^2 - 0,0113F + 0,3277$	0,95	3,24-23,48	14,89
22109	$B = 0,00029 F^2 - 0,0103F - 1,0774$	0,98	0,47-24,17	12,74
23547	$B = 0,0008 F^2 - 0,0888 F + 2,8703$	0,98	2,38-23,99	15,08
23940	$B = 0,0008 F^2 - 0,1494 F + 8,1331$	0,95	0,62-21,89	14,47
21694	$B = 0,0007 F^2 - 0,0821 F + 3,4365$	0,93	0,71-24,85	14,50

#### 4 PEMBAHASAN

Proksi cuaca antariksa yang dapat diamati di bumi adalah *solar fluks* F10.7 dan indeks geomagnet Ap. Nilai harian deret waktu F10.7, 1996 - 2003 dan beberapa bulan pada 2004 sangat variatif tetapi polanya memperlihatkan suatu siklus. Siklus itu semakin jelas dari pola penghalusan 81 harian (per 81 moving average) yang dikenal dengan siklus ke 23 aktivitas matahari, yang akan berakhir pada 2006-2007, Gambar 2-1. Demikian juga dengan nilai harian deret waktu indeks geomagnet, namun perilaku penghalusan 81 harian memperlihatkan kecenderungan naik mulai dari tahun 1996 hingga awal 2004.

Nilai harian deret waktu koefisien balistik bintang atau koefisien balistik juga sangat variatif. Pola koefisien balistik yang dihaluskan per 81 harian dari ke lima satelit LEO mengikuti pola dari fluks matahari F10.7, mulai dari 1996-2003, yakni bila *fluks* matahari naik koefisien balistik juga naik dan sebaliknya.

Nilai koefisien balistik dari kelima satelit pada masa matahari aktif hampir 30 - 40 kali nilai koefisien balistik pada matahari tenang, pada hal ketinggian satelit pada 1996 dan 2003 tidak jauh berbeda kecuali ketinggian satelit 21694. Menurut Bowman, koefisien drag berhubungan dengan jenis atom atau unsur (*constituent!* di atmosfer atas yang berbeda menurut ketinggian. Koefisien drag menurut konstituent menurut ketinggian hanya berbeda dengan faktor 2. Perbedaan kerapatan atmosfer pada ketinggian 500-800 km dalam kisaran interval 20 km dinyatakan oleh faktor 1,5-2 pada masa matahari tenang dan aktif. Luas penampang dan massa satelit dapat dianggap konstan selama satelit mengorbit bumi. Dengan demikian faktor yang menimbulkan peningkatan koefisien balistik seiring dengan naiknya aktivitas matahari demikian juga sebaliknya belum diketahui dengan jelas. Tetapi yang diketahui adalah apabila matahari semakin aktif, aliran partikel dari matahari semakin



banyak menuju lingkungan antariksa, dan terjadi transfer energi besar, pemanasan *joule*, (interaksi dan *joule heating*) dari partikel energetik dan gelombang elektromagnetik dari matahari ke lingkungan antariksa, (Bergreaves, 1979, Harrison, 1990).

Proksi dari aktivitas matahari di antaranya adalah F10.7 dan indeks geomagnet, Ap. Narnun pola perilaku deret waktu koefisien balistik dan F10.7 udak saraa dengan Ap, bahkan sering berlawanan fase. Oleh karena itu dan belum jelasnya mekanisme pembangkitan koefisien balistik oleh cuaca antariksa maka untuk menyederhanakan masalah dicari hubungan matematis atau model koefisien balistik dengan F10.7.

Hubungan matematis B dengan F10.7 berbentuk polinom orde dua. Model koefisien balistik setiap satelit berbeda, demikian juga dengan konstanta-konstantanya. Hubungan linier koefisien balistik dengan F10.7 telah dicoba. Namun untuk F10.7 lebih kecil dari 80 sfu, hubungan linier menghasilkan koefisien balistik kelima satelit ada yang berharga negatif yang bertentangan dengan koefisien balistik yang selalu positif. Oleh karena nilai *fluks* matahari minimum adalah sekitar 80 sfu, berbeda sekitar 10 sfu *daxijluks* rerata dari matahari tenang.

Koefisien balistik sebagai fungsi dari F10.7 atau model koefisien balistik diuji-coba terhadap koefisien balistik sebelum dan sesudah 2003 sesuai dengan data B\* atau B yang tersedia dalam TLE. Kisaran kesalahan model adalah dari 1% - 25%. Sedangkan kesalahan rerata model sekitar 15%. Kesalahan ini sama dengan kesalahan koefisien balistik satelit Bepposax yang reentri pada 29 April 2003, yang diprediksi oleh NASA/JFC sebulan sebelum satelit reentri (Luciano, 2003).

## 5 KESIMPULAN

Koefisien balistik bervariasi seiring dengan variasi *fluks* matahari F10.7 tetapi udak bervariasi sama dengan indeks medan magnetik planetari. Hubungan koefisien balistik dengan F10.7 berbentuk polinom orde dua dengan kesalahan rerata 15% dan kesalahan maksimum kurang dari 25%. Dibandingkan dengan kesalahan prediksi yang telah dibuat oleh NASA, maka model ini dapat digunakan untuk memprediksi koefisien balistik dan selanjutnya digunakan sebagai salah satu masukan bagi model reentri satelit LEO. Oleh karena koefisien balistik setiap satelit berbeda, maka untuk mengetahui hubungan koefisien balistik dengan F10.7 harus ditentukan dari deret waktu kedua parameter itu.

## DAFTAR RUJUKAN

Bowman, B. R., 2001. *Atmospheric Density Variation at 1500-4000 km Height Determined from Long Term Orbit Perturbation Analysis*. AAS-2001-132, AAS/AIAA, Astrodynamics Specialists Conference, Santa Barbara, California, February.

- Bowman B.R., 2005. *True Satellite Ballistic Coefficient Determination for HASDM*, [www.tech.org/coretech](http://www.tech.org/coretech) 2002, download 11 Mei.
- Djamaluddin, T., L. Manurung, S. Wilson, dan S. Herry, 2004. *Model Integrasi Gangguan Orbit Satelit dan Cuaca Antariksa*. Program Penelitian Pufatsainsa, LAPAN.
- Forbes F.B., 2002. *Satellite Drag and Density Variability*, Asen 5335 Aerospace Environment Homework Assignment #7 [www.uar.colorado.edu/asen5335/](http://www.uar.colorado.edu/asen5335/), download Desember.
- Hammons C, 2001. *A Study Effects of Large Solar Flare Events on Atmospheric Drag of Low Earth Orbiting Satellites*, [www.uar.colorado.edu/asen5050/](http://www.uar.colorado.edu/asen5050/), download Desember.
- Harrison, R. A., 1990. *The SourceRegions of Solar Coronal Mass Ejections*, Solar Phys. 126, 185.
- Hergreaves, J.K., 1979. *The Upper Atmosphere and Solar Terrestrial Relations*, Van Nostrand Reinhold Company.
- Kennewell, J., 1999. *Satellite Orbital Decay Calculations*, IPS Radio and Space Services, The Australian Space Weather Agency, Sydney, Australia.
- Luciano, A., 2003. *Bepposax Reentry Predictions*, *Bulletin Bepposax Reentry Prediction'*, No. 7, 27 March.
- Manurung S.L., 2005. *Perhitungan Laju Peluruhan Orbit ISS pada waktu Badai Magnetik 14 Juli 2000*, Laporan penelitian dampak cuaca antariksa pada satelit LEO, Juli.
- Rhoden, E.A., 2000. *The Influence of Geomagnetic and Solar Variabilities on Lower Thermosphere Density*. Journal of Atymospheric - Terrestrial Physics 62, 999-1013.
- Vallado D.A., 2001. *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, Kluwer Academic Publisher.
- [http://www.sec.noaa.gov/ftpmenu/indices/old\\_\\_indices.html](http://www.sec.noaa.gov/ftpmenu/indices/old__indices.html), 2004. *The 23rd Solar Cycle Predictions*, download November.