

PENGARUH AKTIVITAS MATAHARI PADA KALA HIDUP SATELIT

Thomas DJamaluddin
Peneliti Bidang Matahari dan Antariksa, LAPAN

ABSTRACT

It has been known the effects of solar activities on satellite orbits. However, kinds and magnitude of the effects should be investigated for developing integrated model on space weather and satellite orbits. This paper reports the results of global analysis of about 19,000 decayed low orbit satellites and sample analysis of longterm orbiting satellite with lifetime several solar cycle. It is obtained that there is segregation on satellite's decay time indicating enhancement of satellite decay during active solar. Analysis results on some longterm orbiting satellites, covering several solar cycles, indicate a significant drop on orbital elements during maximum solar activity.

ABSTRAK

Pengaruh aktivitas matahari terhadap orbit satelit telah diketahui. Namun jenis dan tingkat besarnya pengaruh tersebut perlu dikaji untuk pengembangan model integrasi cuaca antariksa dan orbit satelit. Makalah ini melaporkan hasil analisis global dari sekitar 19.000 satelit orbit rendah yang telah jatuh dan analisis sampel satelit yang mengorbit dalam jangka waktu panjang dengan kala hidup beberapa siklus aktivitas matahari. Hasilnya menunjukkan bahwa ada pemisahan waktu jatuh satelit yang menunjukkan peningkatan jumlah satelit jatuh saat matahari aktif. Demikian juga analisis sampel beberapa satelit yang mengorbit dalam jangka waktu panjang mencakup beberapa siklus aktivitas matahari, hasilnya menunjukkan penurunan yang signifikan pada beberapa elemen orbitnya pada saat aktivitas maksimum.

Kata kunci: *aktivitas matahari, orbit satelit, kala hidup satelit*

1 PENDAHULUAN

Cuaca antariksa adalah kondisi dinamis lingkungan antariksa sekitar bumi terutama akibat aktivitas matahari dan hujan meteor. Aktivitas matahari adalah faktor dominan yang berpengaruh secara langsung dan tidak langsung pada orbit satelit dan gangguan operasionalnya. Pengaruhnya secara umum telah diketahui bahwa aktivitas matahari secara langsung (radiasi gelombang elektromagnetik dan partikel energetik) atau tidak langsung (aktivitas geomagnet) dapat meningkatkan kerapatan atmosfer yang berakibat pada peningkatan hambatan bagi satelit.

Sinar-X dari matahari secara umum diserap di termosfer bawah (sekitar 120 km). Efek pemanasan langsung ini dirambatkan ke atas. Di samping itu partikel-partikel energetik yang menghujani bumi mentransfer energinya yang memanaskan atmosfer. Banyaknya partikel energetik yang menghujani bumi dipengaruhi oleh medan magnetik bumi (Kennewell, 1999). Karenanya, efek pemanasan akibat pengaruh langsung aktivitas matahari maupun tidak langsung melalui variasi medan magnetik bumi tersebut akan meningkatkan kerapatan atmosfer dan hambatan atmosfer terhadap orbit satelit atau sampan antariksa. Hambatan atmosfer ini yang menyebabkan perubahan orbit satelit menjadi semakin rendah dan akhirnya jatuh. Untuk satelit orbit tinggi hambatan atmosfer tidak berarti. Namun radiasi partikel energetik matahari dapat mengganggu operasional satelit.

Penelitian ini bertujuan memformulasikan pengaruh cuaca antariksa pada kala hidup satelit pada orbitnya dengan menganalisis data satelit orbit rendah yang telah jatuh atau masih mengorbit dan membandingkannya dengan data aktivitas matahari. Pengaruh aktivitas matahari pada operasional satelit orbit tinggi (dalam kaitan kala hidup operasionalnya) tidak dibahas dalam makalah ini.

2 DATA DAN METODE PENGOLAHAN

Data orbit satelit diperoleh dari *Orbital Information Group*, NASA (<http://oigl.gsfc.nasa.gov>). Dari *Satellite Situation Reports* akhir Mei 2004 tercatat 19.000 objek telah jatuh. Untuk menganalisis pengaruh aktivitas matahari pada kala hidup satelit, seluruh data diplot antara tahun luncur [*launched*] ^ys tahun jatuh (*decayed*) dan antara ketinggian rata-rata (*mean height*) vs logaritme kala hidup (*log-lifetime*). Juga dianalisis beberapa sampel objek yang mengorbit dalam waktu beberapa siklus aktivitas matahari. Beberapa parameter orbit yang ditinjau adalah koefisien hambatan atmosfer B^* , setengah sumbu panjang a , eksentrisitas e , dan inklinasi i . Data aktivitas matahari fluks 10.7 cm diperoleh dari *Dominion Radio Astrophysical Observatory* (DRAO, <http://www.drao.nrc.ca>) dan data aktivitas matahari lainnya dari Solar Influence Data Center (SIDC) (<http://sidc.oma.be>) dan beberapa link di dalamnya. Data saat maksimum dan minimum aktivitas matahari juga diambil dari ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/maxmin.

3 HASIL

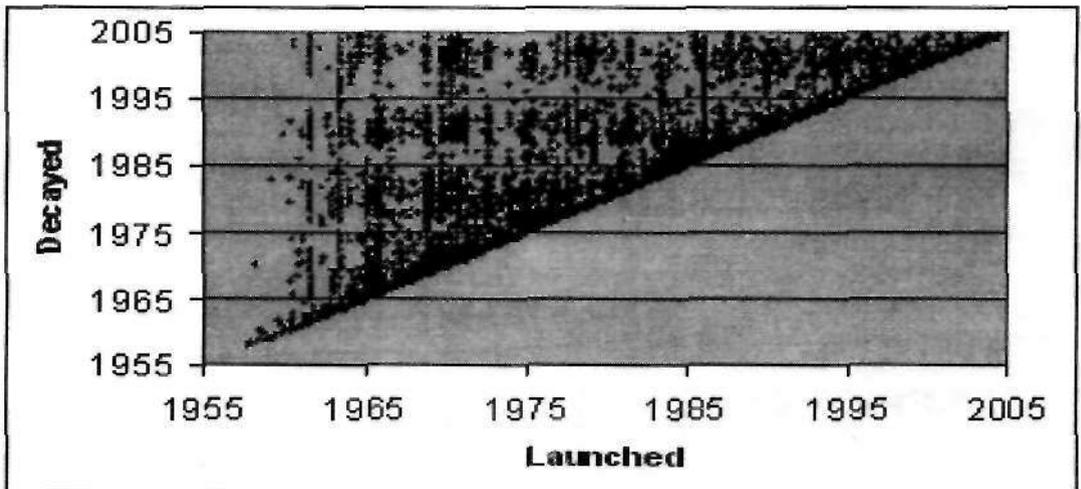
3.1 Hasil Analisis Global

Hasil analisis data orbit objek-objek yang telah jatuh sampai dengan Mei 2004 menunjukkan bahwa ada pola segregasi (pengelompokan) yang berkaitan dengan aktivitas matahari. Secara jelas pola tersebut terlihat pada diagram tahun luncur (*launched*) vs waktu jatuh (*decayed*) (Gambar 3-1). Pada masa matahari aktif, sekitar tahun 1970, 1980, 1990, dan 2000 jumlah

objek yang jatuh lebih banyak dari pada saat aktivitas matahari minimum sekitar tahun 1966, 1976, 1986, dan 1996.

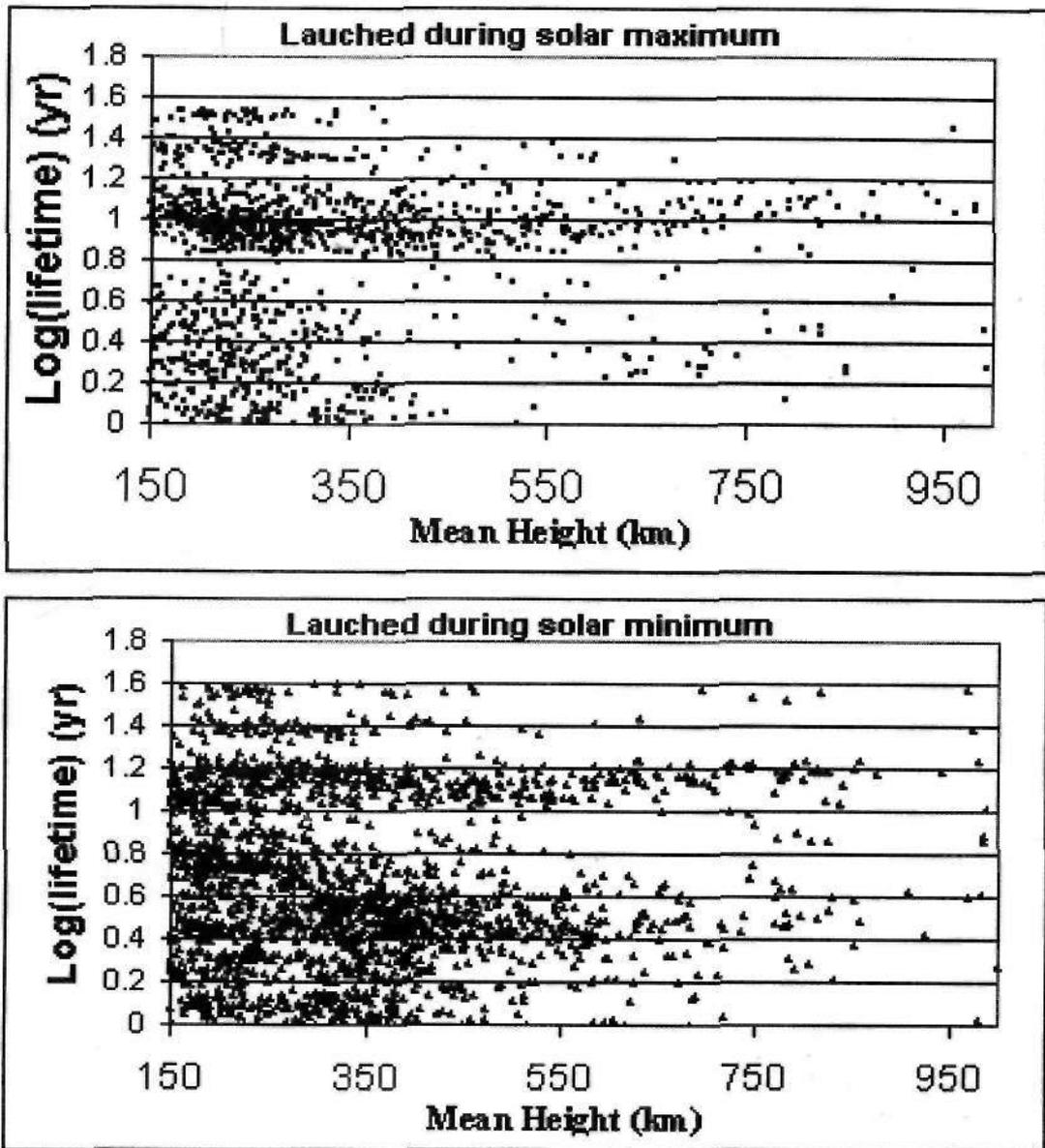
Tidak adanya pengelompokan yang jelas secara horizontal menunjukkan, secara umum waktu peluncuran kurang memperhatikan saat-saat matahari aktif dan tenang. Padahal, seperti ditunjukkan pada Gambar 3-2, objek-objek yang diluncurkan pada saat matahari aktif (± 1 tahun dari tahun maksimum) cenderung mempunyai kala hidup yang lebih pendek dari pada objek-objek yang diluncurkan pada saat matahari tenang (± 1 tahun dari tahun minimum). Terlihat pada gambar itu, adanya pengelompokan-pengelompokan, dan terlihat jelas bahwa kelompok dari tahun peluncuran saat matahari tenang relatif lebih tinggi (kala hidup lebih lama) dari pada kelompok tahun peluncuran saat matahari maksimum. Misalnya, pengelompokan objek pada panel atas (peluncuran saat matahari tenang) dengan log (*lifetime*) 1-1,2 (kala hidup 10 - 15,8 tahun) dibandingkan dengan pengelompokan objek pada panel bawah (peluncuran saat matahari aktif) dengan log (*lifetime*) 0,8 - 1,1 (kala hidup 6,3 - 12,6 tahun). Juga terlihat bahwa populasi objek pada ketinggian > 400 km terlihat bedanya. Objek-objek yang diluncurkan saat matahari minimum relatif banyak yang bertahan pada ketinggian >400 km.

Terkait dengan ketinggian asal objek, pada Gambar 3-3 ditunjukkan hubungan tahun jatuh dan ketinggian asal objek antariksa, baik *perigee* (jarak terdekat) maupun *apogee* (jarak terjauh). Terlihat jelas pada tahun-tahun matahari aktif objek dari ketinggian 400 - 1000 km lebih banyak jatuh dibandingkan dengan tahun-tahun lainnya. Makin rendah ketinggiannya, pengaruh aktivitas matahari pada kala hidup objek antariksa kurang tampak, karena kerapatan udara yang tinggi sudah cukup mempercepat kejatuhan objek tersebut. Sehingga jumlah objek antariksa yang jatuh dari ketinggian asal kurang dari 300 km relatif seragam sepanjang tahun.



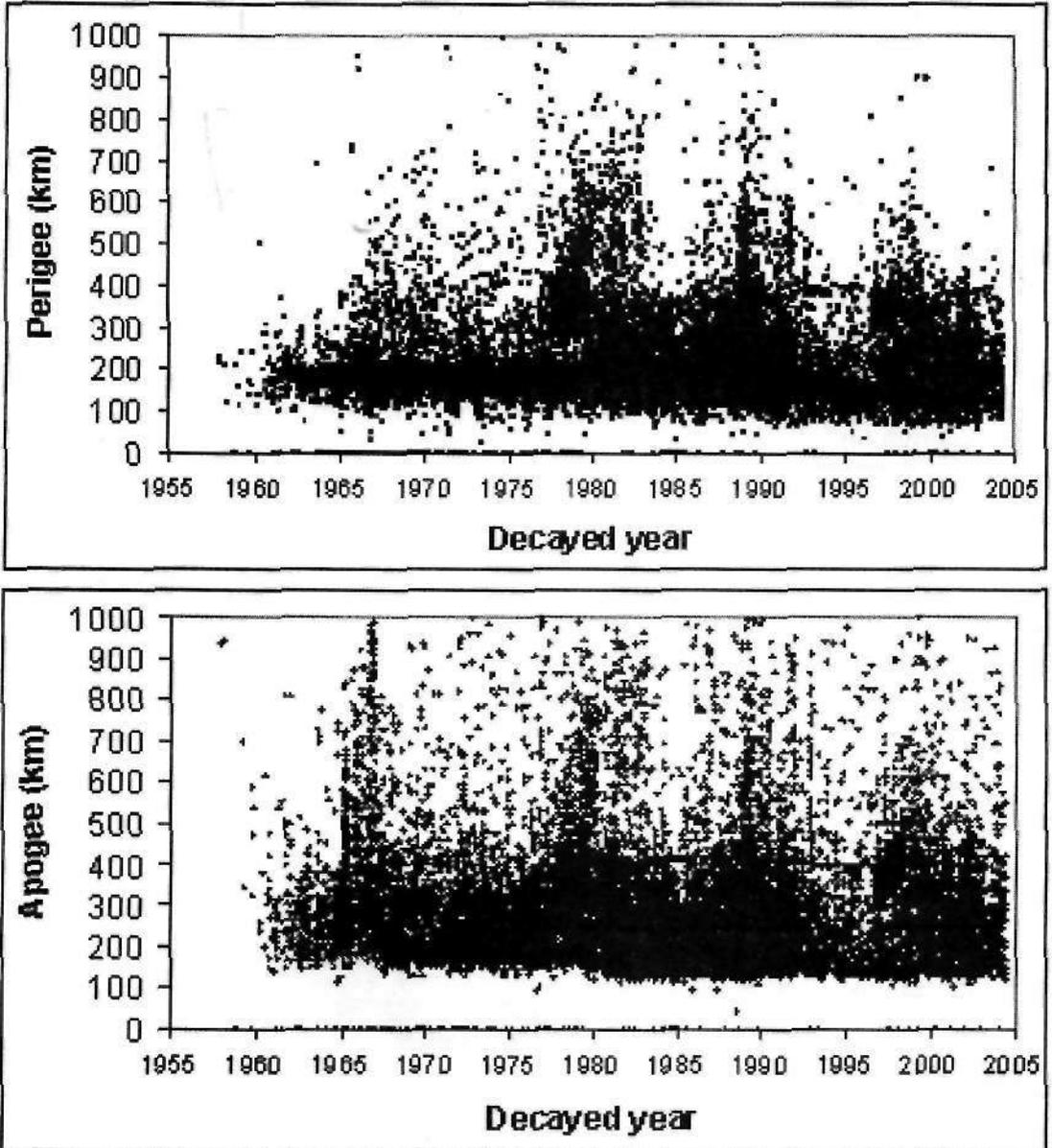
Gambar 3-1: Diagram tahun luncur dan tahun jatuh objek-objek pengorbit bumi

Terlihat ada pengelompokan tahun-tahun jatuhnya (*decayed*) yang terkait dengan aktivitas matahari. Pada tahun-tahun matahari aktif (*decayed* sekitar 1970, 1980, 1990, dan 2000, pada ordinat), jumlah objek yang jatuh lebih banyak. Tahun luncur (*absis*) tidak mengindikasikan adanya pertimbangan aktivitas matahari saat peluncuran.



Gambar 3-2: Hubungan Kala hidup (*lifetime*), ketinggian rata-rata (*mean height*), tahun peluncuran. (a) Simbol segitiga pada panel atas adalah objek-objek yang diluncurkan saat matahari tenang (± 1 tahun dari tahun aktivitas matahari minimum), (b) Simbol kotak pada panel bawah diluncurkan saat matahari aktif (± 1 tahun dari tahun aktivitas matahari maksimum)

Satelit yang diluncurkan saat aktivitas matahari tenang berkecenderungan memiliki kala hidup yang lebih lama (misalnya, $\log lifetime$ 1,0 - 1,2 pada panel atas) dibandingkan dengan yang diluncurkan pada saat matahari aktif ($\log lifetime$ 0,8 - 1,1 pada panel bawah) dan relatif lebih banyak bertahan pada ketinggian > 400 km (bandingkan untuk $\log lifetime$ sekitar 0,4 dan 1,0).



Gambar 3-3: Hubungan ketinggian asal dan tahun jatuhnya objek pengorbit bumi dilihat berdasarkan *perigee* (panel atas) dan *apogee* (panel bawah). Terlihat jelas adanya peningkatan objek jatuh pada tahun-tahun matahari aktif (sekitar 1970, 1980, 1990, dan 2000), khususnya untuk ketinggian *perigee* (jarak terdekat) atau *apogee* (jarak terjauh) > 400 km.

3.2 Hasil Analisis Sampel

Analisis juga dilakukan pada beberapa sampel data orbit satelit yang mempunyai kala hidup panjang, misalnya objek dengan nomor katalog 04814 dan 04393. Pada Gambar 3-4 ditunjukkan variasi koefisien balistik B^* terhadap parameter aktivitas matahari F10.7. B^* adalah suku hambatan udara yang didefinisikan

$$B^* = C_d A \rho / 2m, \dots\dots\dots (3-1)$$

Keterangan:

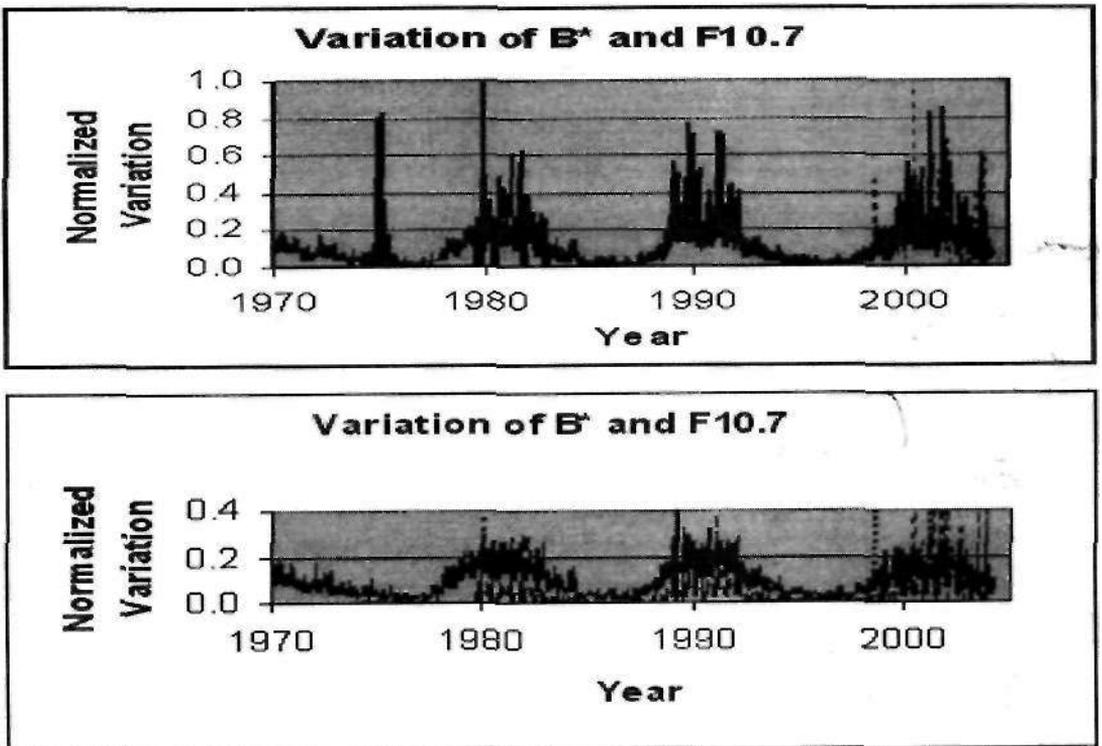
C_d = koefisien hambatan udara

ρ = kerapatan udara

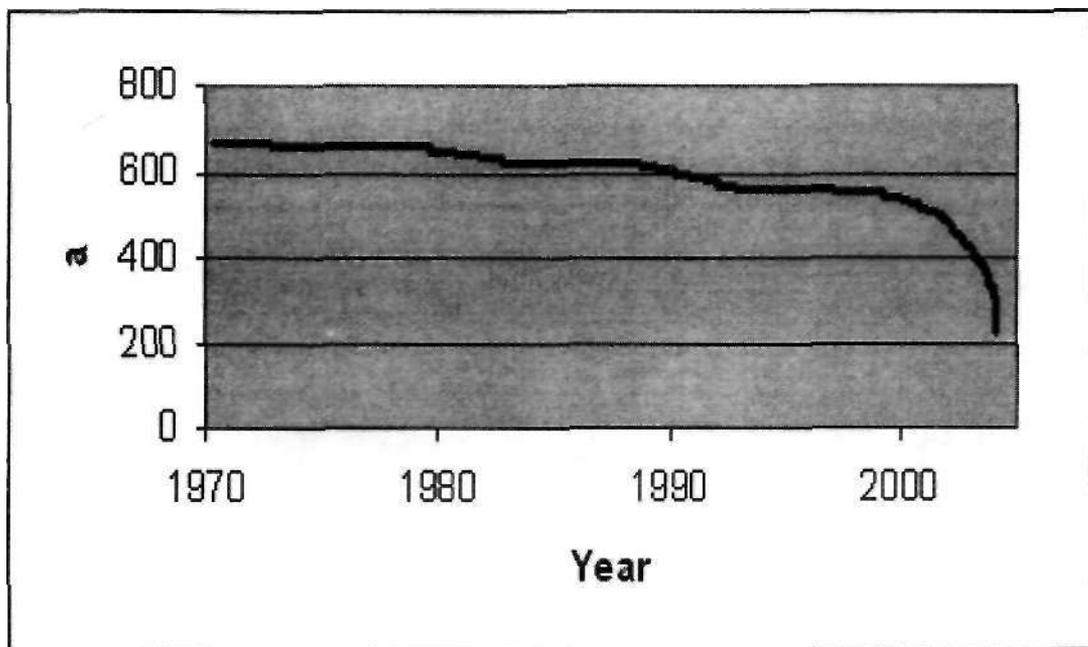
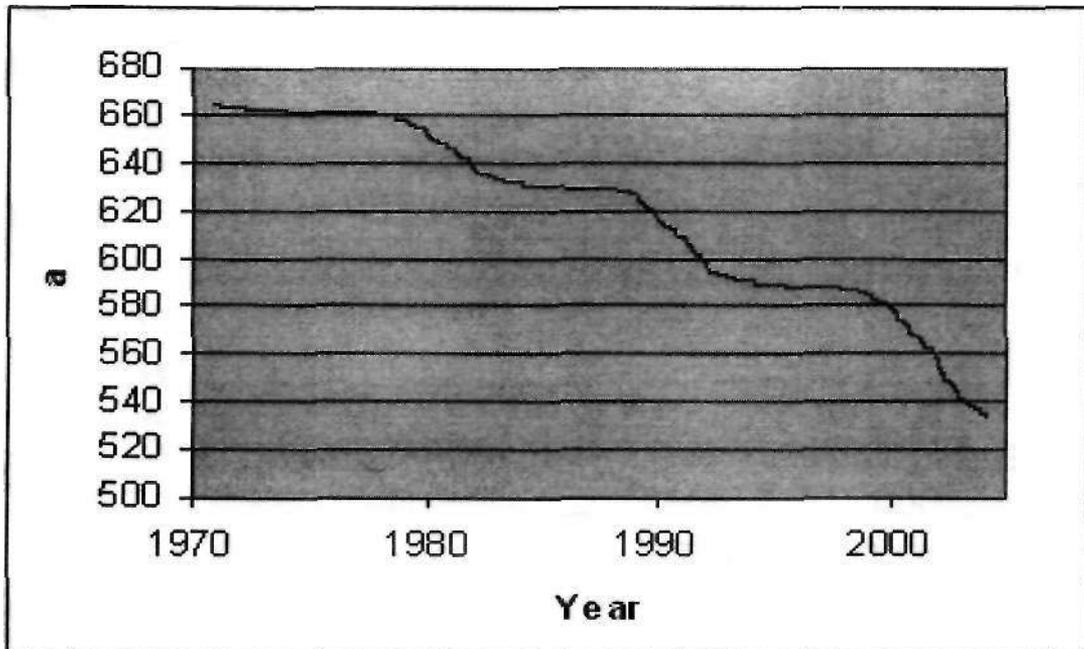
A = penampang objek yang tegak lurus arah gerak

m = massa objek.

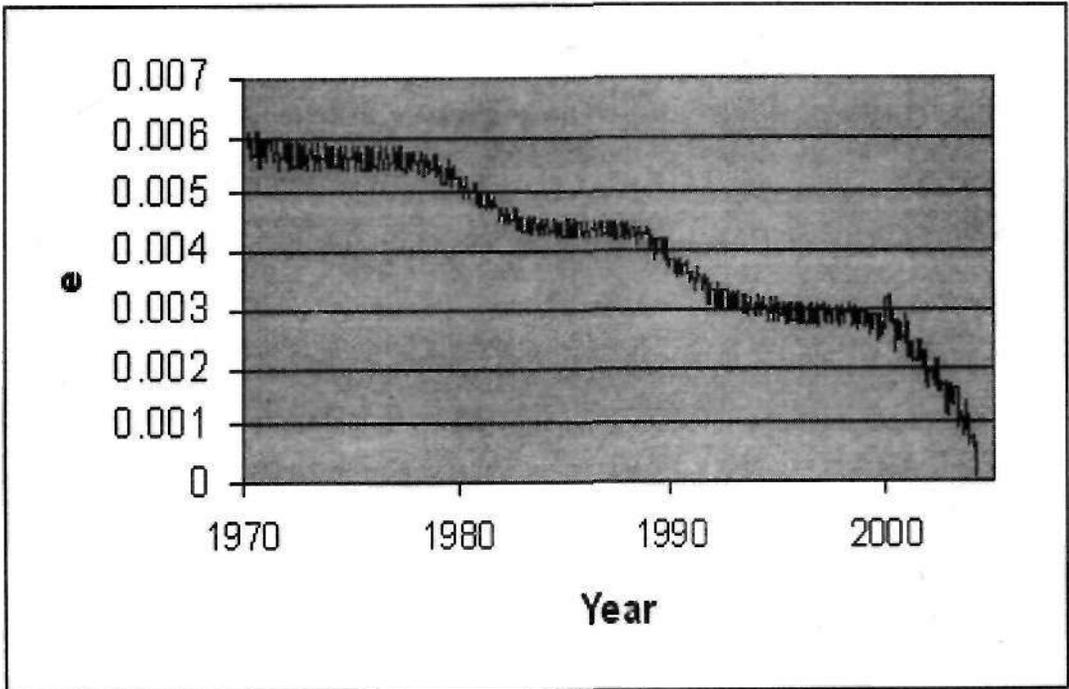
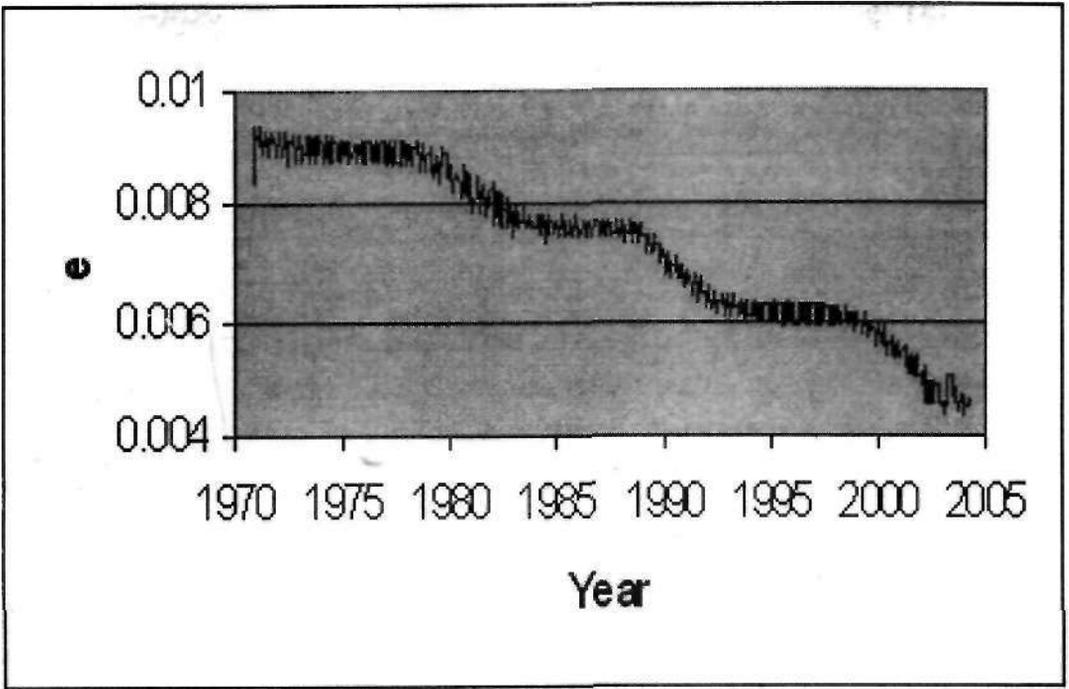
Dampaknya terlihat pada parameter orbit yang mengalami penurunan secara signifikan saat matahari aktif, sekitar 1970 (kurang tampak), 1980, 1990, dan 2000 (lihat Gambar 3-5 untuk setengah sumbu panjang orbitnya (a), Gambar 3-6. untuk eksentrisitasnya (e), dan Gambar 3-7 untuk inklinasinya (i)).



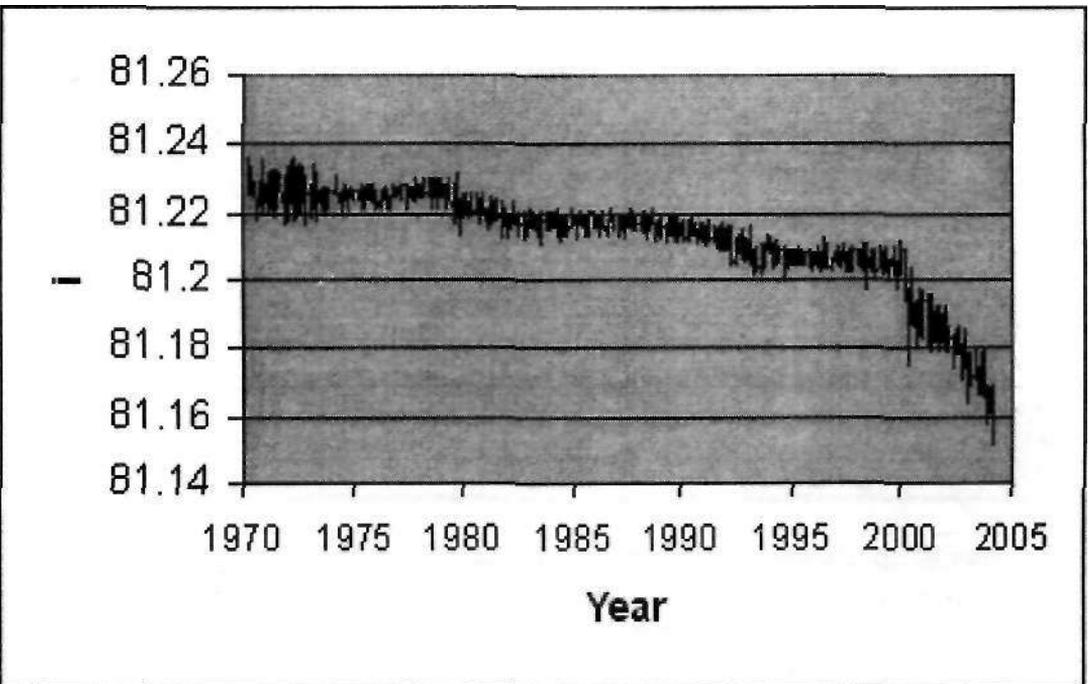
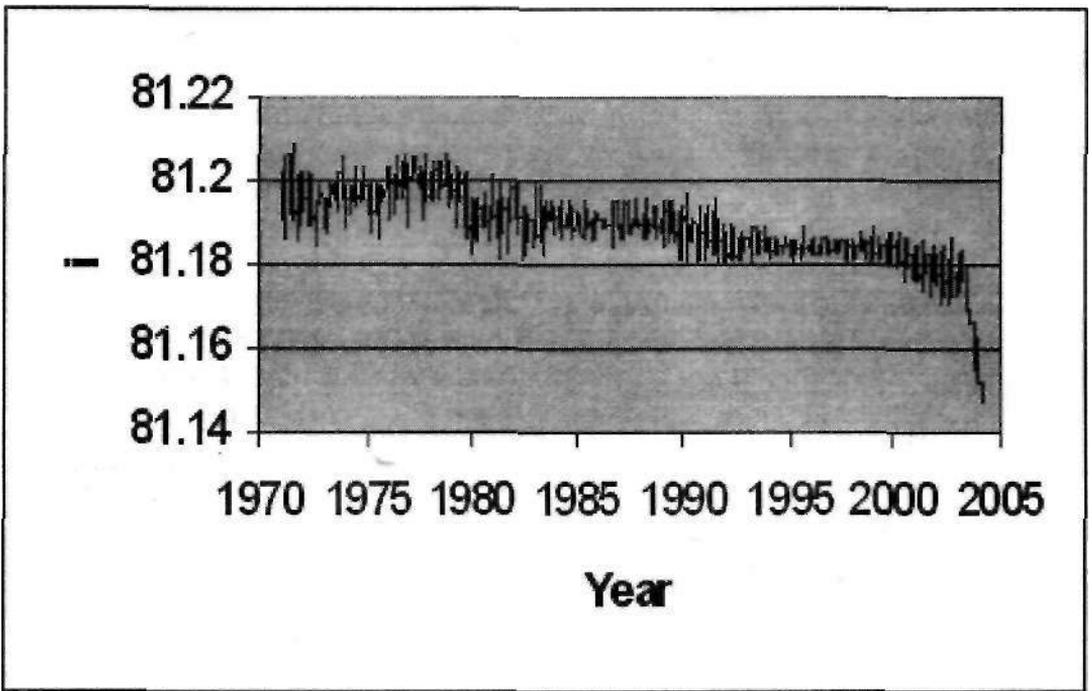
Gambar3-4: Pengaruh aktivitas matahari pada objek dengan nomor katalog 04814 (panel atas) dan 04393 (panel bawah). Parameter B^* kedua satelit tersebut bervariasi sesuai dengan parameter aktivitas matahari F10.7



Gambar 3-5: Pengaruh aktivitas matahari pada objek dengan nomor katalog 04814 (panel atas) dan 04393 (panel bawah). Parameter orbit a (setengah sumbu panjang orbit, km) berkurang secara signifikan setelah matahari aktif sekitar 1970 (kurang tampak), 1980, 1990, dan 2000



Gambar 3-6: Pengaruh aktivitas matahari pada objek dengan nomor katalog 04814 (panel atas) dan 04393 (panel bawah). Parameter orbit e (eksentrisitas objek) berkurang secara signifikan setelah matahari aktif sekitar 1970 (kurang tampak), 1980, 1990, dan 2000



Gambar 3-7: Pengaruh aktivitas matahari pada objek dengan nomor katalog 04814 (panel atas) dan 04393 (panel bawah). Parameter orbit i (inklinasi) berkurang secara signifikan setelah matahari aktif sekitar 1970 (kurang tampak), 1980, 1990, dan 2000

Pada Gambar 3-8 diperlihatkan hubungan perubahan ketinggian dan aktivitas matahari. Pada saat aktivitas matahari maksimum (sekitar tahun 1970, 1980, 1990, dan 2000), ketinggian orbit satelit 00005, 00012, 00022, 04814, dan 04393 (berurut dari atas ke bawah) menurun secara signifikan. Secara kualitatif terlihat bahwa tingkat aktivitas matahari (diindikasikan dengan amplitudo puncak siklus) berkait erat dengan perubahan ketinggian tersebut. Tampaknya bila puncak siklus lebih tinggi, kecepatan jatuhnya lebih cepat. Untuk analisis kuantitatif, dari data tersebut dihitung perubahan drastis ketinggian dari tinggi mula (h_1 km) ke tinggi berikutnya (h_2 km) dalam selang waktu antara tahun 1 (t_1) dan tahun 2 (t_2). Kemudian laju penurunan ketinggian yang dinyatakan dh/dt ($=abs(h_2-h_1)/(t_2-t_1)$) dikaitkan dengan bilangan *sunspot* maksimum (SSNmax) (lihat Tabel 3-1).

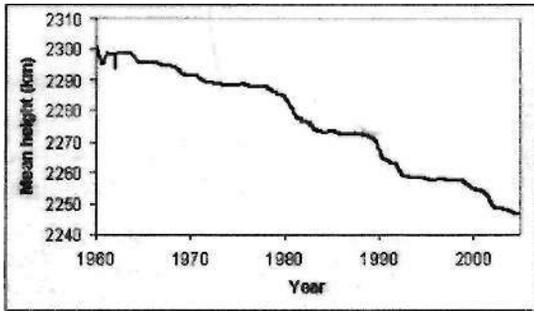
Tabel 3-1: LAJU PENURUNAN KETINGGIAN RATA-RATA BEBERAPA SATELIT

Nomor Katalog	Tahun 1	Tahun 2	h_1	h_2	SSNmax	dh/dt (km/thn)
00005	1968.55	1971.49	2293.70	2289.55	110.60	1.41
00005	1978.49	1984.70	2286.76	2273.20	164.50	2.18
00005	1989.76	1993.86	2269.65	2258.46	158.50	2.73
00005	1999.39	2002.71	2256.34	2248.49	120.80	2.36
00012	1967.15	1973.24	2105.60	2085.39	110.60	3.32
00012	1978.56	1983.54	2079.03	2039.42	164.50	7.95
00012	1989.22	1993.35	2029.23	1993.56	158.50	8.64
00012	2000.16	2003.63	1981.93	1960.33	120.80	6.22
00022	1967.84	1971.76	809.54	796.02	110.60	3.45
00022	1979.07	1983.58	786.28	746.13	164.50	8.90
00022	1989.21	1993.24	734.36	691.57	158.50	10.62
00022	1999.63	2003.99	679.33	631.70	120.80	10.92
04393	1979.22	1983.69	654.89	622.86	164.50	7.17
04393	1989.27	1993.59	611.52	560.87	158.50	11.72
04393	1999.81	2004.19	541.81	225.43	120.80	72.23
04814	1979.22	1983.28	656.54	632.73	164.50	5.86
04814	1989.02	1993.40	626.43	591.11	158.50	8.06
04814	1999.85	2003.83	580.34	536.19	120.80	11.09

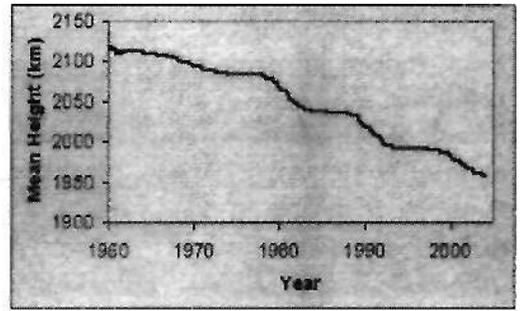
Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa pengaruh amplitudo maksimum aktivitas matahari (SSNmax) tidak selalu positif. Pada Tabel 3-2 ditunjukkan persamaan regresi untuk masing-masing satelit disertai *standard error* (se) dan koefisien korelasinya (r). Untuk ketinggian $h > 600$ km, dh/dt naik sesuai dengan kenaikan SSNmax. Tetapi untuk ketinggian $h < 600$ km dh/dt menurun berbanding terbalik dengan kenaikan SSNmax. Perbedaan sifat korelasinya tampaknya dipengaruhi oleh gradasi peningkatan kerapatan atmosfer yang lebih besar pada $h < 600$ km.

Tabel 3-2: PERSAMAAN REGRESI HUBUNGAN DH/DT DAN SSNMAX

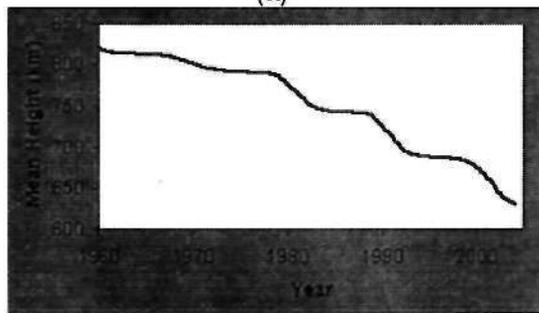
Nomor Katalog	h rata-rata (km)	Persamaan regresi	se	r
00005	2272	$dh/dt = 0.01 * SSN_{max} + 0.30$	0.5	0.7
00012	2034	$dh/dt = 0.08 * SSN_{max} - 4.60$	1.2	0.9
00022	734	$dh/dt = 0.07 * SSN_{max} - 1.17$	3.5	0.5
04393	536	$dh/dt = 1.53 * SSN_{max} + 256.7$	3.3	0.998
04814	604	$dh/dt = 0.106 * SSN_{max} + 23.98$	1.1	0.95



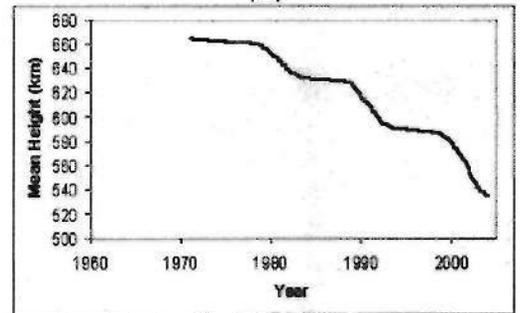
(a)



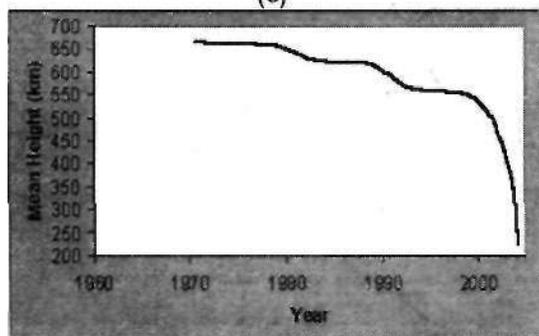
(b)



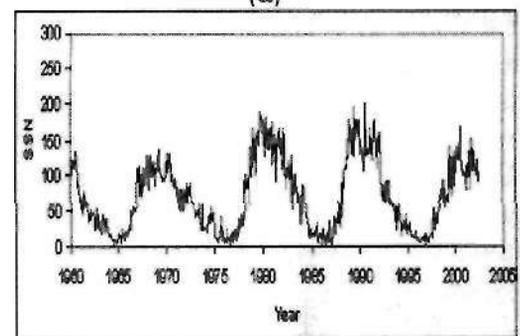
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 3-8: Kaitan ketinggian rata-rata satelit dengan siklus aktivitas matahari. Ketinggian orbit satelit (a) 00005, (b) 00012, (c) 00022, (d) 04814, dan (e) 04393 berkurang secara signifikan setelah matahari aktif sekitar 1970, 1980, 1990, dan 2000 yang ditunjukkan pada panel bawah

4 PEMBAHASAN

Secara teoritik tahun peluncuran terkait dengan umur satelit mengorbit (Gambar 4-1). Satelit-satelit yang diluncurkan pada saat matahari aktif cenderung mempunyai umur yang relatif pendek, tergantung pada ketinggian awal dan koefisien balistiknya. Hasil analisis yang ditunjukkan pada Gambar 3-2 membuktikannya, walaupun ditampilkan untuk analisis umum banyak objek. Pengelompokan pada Gambar 3-2 tampaknya menunjukkan pengelompokan berdasarkan koefisien balistiknya. Dengan demikian terlihat jelas pada Gambar 3-2, untuk satu kelompok koefisien balistik, objek yang diluncurkan pada saat matahari minimum mempunyai kala hidup yang lebih panjang dari pada objek yang diluncurkan saat matahari maksimum.

Hubungan aktivitas matahari dan kerapatan atmosfer atau parameter elemen orbit NORAD B' yang terkait dengan hambatan udara, seperti pada Gambar 3-4 ditunjukkan dengan beberapa persamaan empirik berikut ini (Kennewell. 1999):

$$\begin{aligned} T &= 900 + 2.5 (F10.7 - 70 + 1.5 A_p) && \text{(Kelvin)} \\ m &= 27 - 0.12 (h - 200) && 180 < h \text{ (km)} < 500 \\ H &= T/m && \text{(km)} \\ \rho &= 6 \times 10^{-10} \exp \{- (h - 175)/H\} && \text{(kg m}^{-3}\text{)} \end{aligned}$$

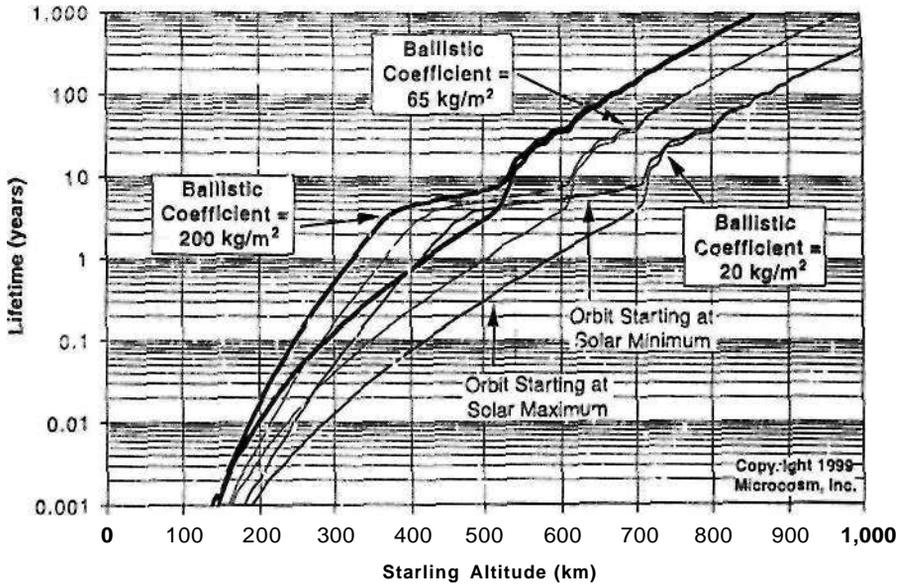
Keterangan:

T : temperatur atmosfer atas
m : massa molekul atmosfer
H : skala tinggi
 ρ : kerapatan atmosfer

Dari hubungan teoritik tersebut terlihat bahwa semakin tinggi aktivitas matahari (diindikasikan dengan peningkatan F10.7), kerapatan udara (ρ) juga meningkat sehingga B* juga meningkat.

Namun hubungan empirik tersebut nilai konstantanya sangat tergantung pada ketinggian. Hasil analisis kualitatif secara global pada bagian 3.1 menunjukkan bahwa makin rendah ketinggiannya, pengaruh aktivitas matahari pada kala hidup objek antariksa kurang tampak, karena dominasi pengaruh peningkatan kerapatan atmosfer yang mempercepat kejatuhan. Sehingga jumlah objek antariksa yang jatuh dari ketinggian asal kurang dari 300 km relatif tidak bervariasi sepanjang tahun. Demikian juga hasil analisis kuantitatif pada beberapa sampel yang dibahas pada bagian 3.2. menunjukkan bahwa makin rendah ketinggiannya, pengaruh peningkatan amplitudo aktivitas matahari (SSNmax) malah berbanding terbalik dengan laju penurunan satelit (dh/dt). Tampaknya peningkatan gradasi kerapatan udara lebih dominan mempercepat kejatuhan objek

tersebut, dibandingkan dengan peningkatan kerapatan atmosfernya sendiri akibat pengaruh aktivitas matahari.



. Satellite Lifetime as a Function of Altitude, Relationship to the Solar Cycle, and Representative Ballistic Coefficients. For each ballistic coefficient, the upper curve represents launch during solar minimum and the lower curve represents launch during solar maximum.

Gambar 4-1: Hubungan tahun luncur, ketinggian awal, dan kala hidup satelit. Kala hidup satelit makin lama bila diluncurkan saat aktivitas matahari minimum. (Dari Wertz, J. R. (2001), him. 75)

5 KESIMPULAN

Hasil analisis global objek-objek yang telah jatuh memperjelas pengaruh aktivitas matahari pada kala hidup satelit. Pada saat matahari aktif, lebih banyak objek yang jatuh dibandingkan pada saat matahari minimum. Analisis orbit objek-objek yang berkala hidup panjang menunjukkan pada saat matahari aktif ketinggiannya menurun tajam. Juga ditunjukkan bahwa objek yang diluncurkan pada saat matahari tenang, relatif lebih panjang kala hidupnya dibandingkan dengan objek yang diluncurkan pada saat matahari aktif. Beberapa hubungan kuantitatif untuk pengembangan model hubungan aktivitas matahari dan perubahan ketinggian (terkait dengan kala hidup satelit) juga diperoleh, tergantung pada ketinggian awalnya.

DAFTAR RUJUKAN

- Kennewell, J. 1999. *Satellite Orbital Decay Calculations*, di dalam <http://www.ips.gov.au>
- Wertz, J. R. 2001. *Mission Geometry; Orbit and Constellation Design and Management*, Kluwer Academic Publisher