

TELAAH AWAL KEUBAHAN SETENGAH SUMBU PANJANG AKIBAT EFEK YARKOVSKY PADA ASTEROID 3362 KHUFU (1984 QA)

E. Soegiartini, dan S. Siregar

Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, ITB
e-mail: endang@as.itb.ac.id, e-mail: suryadi@as.itb.ac.id

ABSTRACT

Yarkovsky effect is a non-gravitational force that works on the object because of anisotropic photon thermal emission, which brings the momentum to this object. Usually, this effect works in a small meteoroids or asteroids (the diameter about 10 cm to 10 km). In this paper, we try to address the Yarkovsky effect that works on 3362 Khufu (1984 QA) asteroid. Diameter of 3362 Khufu (1984 QA) is 0.7 km, with Bond-albedo is 0.17. Yarkovsky effect will changes the semi major axis of the orbits and then changes the eccentricity. The changing of asteroid's orbital element will bring asteroid into the Earth's orbit. This study shows the changes of the amplitude of semi major axis which is caused by diurnal and seasonal components. The maximum amplitude of each components are 1.3×10^{-5} m/s and -3.7×10^{-9} m/s.

ABSTRAK

Efek Yarkovsky adalah gaya non-gravitasional yang bekerja pada benda yang disebabkan oleh emisi anisotropik foton termal, yang memberi momentum bagi benda tersebut. Efek ini biasanya terjadi pada meteoroid atau asteroid berukuran kecil (dengan diameter 10 cm sampai 10 km). Tulisan ini mencoba meninjau efek Yarkovsky tersebut bagi asteroid 3362 Khufu (1984 QA) yang berdiameter 0.7 km, serta Bond-albedo 0.17. Efek Yarkovsky menyebabkan keubahan pada setengah sumbu panjang orbit, akibatnya eksentrisitas orbit juga berubah. Terjadinya perubahan pada elemen orbit memberikan peluang asteroid tersebut bergerak mendekati Bumi. Telaah ini menunjukkan amplitudo keubahan setengah sumbu panjang orbit terhadap waktu akibat komponen harian dan musiman, masing-masing maksimal adalah 1.3×10^{-5} m/detik dan -3.7×10^{-9} m/detik.

Kata kunci: *Efek Yarkovsky, Asteroid, Orbit*

1 PENDAHULUAN

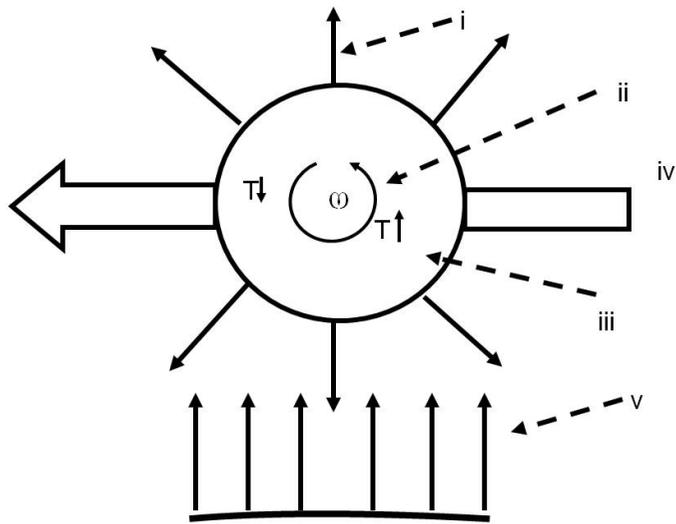
Dari sekitar satu juta objek asteroid yang berada di sabuk utama sangat mungkin untuk terlempar keluar dari tempatnya, baik oleh proses tumbukan yang terjadi antar asteroid maupun perturbasi Jupiter yang berlangsung secara kontinu. Asteroid yang terlempar akan mendekati Bumi bila melalui daerah-daerah resonansi di sabuk itu. Tulisan ini memaparkan tentang keubahan setengah sumbu panjang orbit asteroid akibat efek Yarkovsky yang dialaminya.

Sampai satu dekade yang lalu, gaya tumbukan dan gaya gravitasi merupakan mekanisme utama dalam evolusi orbit asteroid dan meteoroid, keubahan populasi sabuk utama asteroid dan populasi '*inner solar system*' berlangsung lebih dari beberapa milyar tahun, teori ini dikenal sebagai model klasik. Tetapi model ini tidak bisa menjelaskan beberapa fenomena dinamis asteroid yang terjadi, misalnya tentang evolusi setengah sumbu panjang asteroid.

Hal yang bisa menjelaskan tentang ketidakcocokan antara prediksi model klasik dan hasil pengamatan adalah adanya efek non-gravitasional yang bekerja pada asteroid. Efek non-gravitasional ini antara lain adalah pengereman oleh ruang angkasa, medan magnet Matahari, dan tekanan radiasi Matahari. Pada tulisan ini, efek non-gravitasional yang ditinjau adalah yang disebabkan oleh interaksi dengan radiasi Matahari. Efek Yarkovsky adalah gaya non-gravitasional yang bekerja pada benda yang disebabkan oleh emisi anisotropik foton termal, dengan membawa momentum bagi benda tersebut. Efek ini biasanya terjadi pada meteoroid atau asteroid berukuran kecil, yaitu dengan diameter 10 cm sampai 10 km (Bottke et al. 2006).

Secara umum efek Yarkovsky terjadi akibat adanya perbedaan panas yang diterima oleh suatu benda dan panas yang dikeluarkan kembali oleh benda tersebut. Sebuah benda kecil yang menyerap panas Matahari, panas tersebut tidak langsung dikeluarkan lagi, tetapi ada jeda waktu antara absorpsi dan emisi panas tersebut. Akibatnya akan ada suatu gaya yang dihasilkan oleh benda itu yang dapat mengubah nilai setengah sumbu panjangnya setelah beberapa waktu.

Efek Yarkovsky memiliki dua macam komponen, yaitu komponen harian (*diurnal component*) dan komponen musiman (*seasonal component*). Tulisan ini meninjau efek tersebut yang bekerja pada asteroid berdiameter kurang dari 1 km untuk kasus rotasi *prograde*.



Gambar 1-1: Efek Yarkovsky: i. Radiasi dari permukaan asteroid, ii. Rotasi *prograde* dari asteroid, iii. Lokasi saat 'sore', dimana temperaturnya lebih tinggi ($T\uparrow$) dibanding lokasi lainnya ($T\downarrow$), iv. Arah orbit asteroid, v. Radiasi dari Matahari

1.1 Komponen Harian

Komponen harian memberi dampak pada objek yang memiliki ukuran 100 m sampai 10 km, dan didominasi benda yang memiliki konduktivitas termal rendah (Broz, 2002). Efek harian ini terjadi maksimal jika asteroid memiliki *obliquity* (kemiringan sumbu rotasi terhadap bidang orbit) $\gamma = 0^\circ$, yaitu jika sumbu rotasi asteroid tegak lurus bidang orbit, dan efek ini akan menghilang bila $\gamma = 90^\circ$. Bila dianggap orbit asteroid berupa lingkaran, maka Matahari ada di ekuator asteroid. Panas Matahari yang diserap akan dipancarkan kembali dalam bentuk infra merah. Foto infra merah ini akan memberikan momentum ke luar, dan momen inersia akan berlangsung selama selang waktu tertentu, selama asteroid itu berotasi. Setelah selang waktu tersebut berlalu, panas yang ada dalam asteroid akan diradiasikan kembali yang menyebabkan kecepatan orbit bertambah, fenomena ini berlaku untuk gerak *retrograde* maupun *prograde*.

1.2 Komponen Musiman

Komponen musiman dominan bagi asteroid yang berukuran kecil, sekitar 1 m sampai 100 m (Broz, 2006). Efek musiman ini terjadi jika asteroid memiliki $\gamma = 90^\circ$, terbalik dengan komponen harian, dimana sumbu rotasi asteroid berada di bidang orbit. Asteroid akan mengorbit dan berguling. Panas yang diserap di satu bagian kutub, tidak semuanya langsung diradiasikan, melainkan ada momen inersia termal yang menyebabkan selang waktu antara absorpsi dan emisi sinar Matahari. Komponen ini

menyebabkan *spiral-in*, dan berlaku sebagai penahan yang menyebabkan orbit semakin mendekati Matahari.

2 FORMULASI EFEK YARKOVSKY

Penghitungan gaya Yarkovsky dapat dibagi ke dalam 2 bagian, yaitu penurunan distribusi temperatur permukaan dan evaluasi dari radiasi termal (*torque*) menurut Vokrouhlicky dan Bottke (2001).

Untuk menghitung temperatur permukaan, digunakan persamaan difusi panas untuk aliran energi yang masuk ke dalam benda berdasarkan Bottke et al. (2002):

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \tag{2-1}$$

atau yang keluar permukaan benda terse

$$(K \nabla T \cdot \mathbf{n}_\perp) + \epsilon \sigma T^4 = \alpha \mathcal{E} \tag{2-2}$$

Keterangan:

T = temperatur,

t = waktu,

K = konduktivitas panas,

C = panas spesifik pada tekanan tetap,

ρ = kerapatan materi,

ϵ = emisivitas panas permukaan,

σ = konstanta Stefan-Boltzmann,

$\alpha = 1-A$, dengan A adalah Bond-albedo.

Persamaan (2-2) menunjukkan elemen permukaan dimana \mathbf{n}_\perp adalah vektor normal dan \mathcal{E} = fluks radiasi Matahari yang jatuh ke permukaan asteroid tersebut. Kedua persamaan di atas diselesaikan secara numerik, karena itu diperlukan parameter untuk menurunkan skala ukuran dan waktu.

Untuk memformulasikan problem, perlu dilakukan analisa dimensional, yaitu kedalaman penjalaran panas (*thermal penetration depth*, τ_v yang merupakan gelombang panas) dan parameter termal, Θ_v . Kedalaman penjalaran panas menurut Farinella et al. (1998) dapat dinyatakan sebagai:

$$\tau_v = \sqrt{\frac{K}{\rho C v}} \tag{2-3}$$

Parameter termal yang merupakan perbandingan antara skala waktu emisi panas dengan skala waktu rotasi dinyatakan dengan:

$$\Theta_v = \frac{\sqrt{K\rho C v}}{(\epsilon\sigma T^3)} \quad (2-4)$$

dimana T adalah temperatur rata-rata asteroid.
Temperatur rata-rata diperoleh dari hubungan:

$$\pi R^2(1 - A)S = 4\pi R^2 \epsilon\sigma T^4 \quad (2-5)$$

dengan R adalah jari-jari asteroid dan

$$\epsilon\sigma T^4 = \alpha\epsilon \quad (2-6)$$

Temperatur asteroid dihitung dari hubungan:

$$T^4 = \frac{(1 - A)S}{4\epsilon\sigma} \quad (2-7)$$

dimana S adalah *cross section* asteroid tersebut.

Efek Yarkovsky akan mengubah setengah sumbu panjang a sebuah objek. Karena perubahannya kecil, maka perata-rataan variasi nilai a didapat lebih dari satu kali revolusi. Bila diasumsikan asteroid adalah benda berbentuk bola sempurna dengan jari-jari R , dan eksentrisitasnya diabaikan, dalam arti orbitnya berbentuk lingkaran, maka keubahan a akibat efek diurnal dan musiman dapat dinyatakan sebagai (Bottke et al. 2006):

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{diurnal} = -\frac{8\alpha\Phi}{9n} F_\omega(R', \Theta) \cos \gamma \quad (2-8)$$

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal} = \frac{4\alpha\Phi}{9n} F_n(R', \Theta) \sin^2 \gamma \quad (2-9)$$

dengan Φ adalah koefisien tekanan radiasi yang dinyatakan dengan:

$$\Phi = \frac{\pi R^2 \epsilon_0}{mc} \quad (2-10)$$

Fungsi $F_v(R', \Theta)$ bergantung pada radius benda R , kedalaman penjalaran panas ℓ_v bagi gelombang termal $\left(R' = \frac{R}{\ell_v}\right)$, dan parameter termal Θ_v .

$F_v(R', \Theta)$ dinyatakan dengan hubungan:

$$F_{1v}(R', \Theta) = -(\kappa_1 1 (R') \Theta_{1v}) / (1 + 2\kappa_2 (R') \Theta_{1v} + \kappa_3 (R') \Theta_{1v}^2) \quad (2-11)$$

dengan κ_1 , κ_2 , dan κ_3 adalah fungsi analitik dari R' . Untuk komponen harian (diurnal), v adalah ω yang merupakan frekuensi rotasi, sedangkan untuk komponen musiman (seasonal), v adalah n , yaitu nilai *mean motion*.

3 DATA FISIK 3362 KHUFU

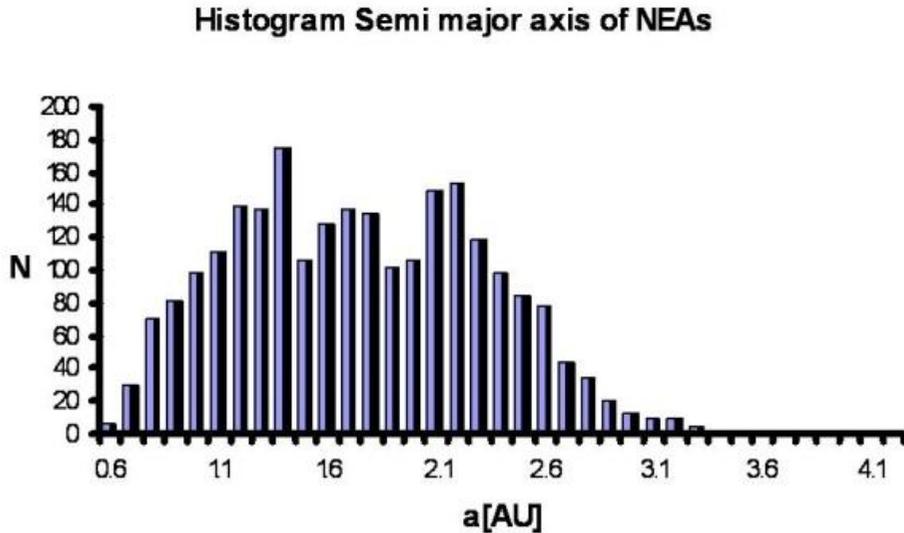
Asteroid 3362 Khufu (1984 QA) merupakan salah satu anggota *Near Earth Asteroid* (NEA), dengan setengah sumbu panjang mendekati 1 AU. Elemen orbit asteroid ini diperlihatkan pada Tabel 3-1 berikut.

Tabel 3-1: ELEMEN ORBIT 3362 KHUFU (1984 QA), PADA EPOCH T = 1 FEBRUARI 2008 (NASA. JPL.2008)

No.	Besaran	Simbol	Nilai
1.	Setengah sumbu panjang	a [AU]	0.989
2.	Eksentrisitas orbit	e [.]	0.469
3.	Inklinasi orbit	i [deg]	9.918
4.	Argumen perihelium	ω [deg]	54.996
5.	Titik simpul naik	Ω [deg]	152.499
6.	Periode sideris	P [year]	0.984
7.	Anomali menengah	M [deg]	8.684

Tabel 3-1 di atas memperlihatkan bahwa orbit 3362 Khufu (1984 QA) mirip orbit komet, ia dikelompokkan sebagai *comet-like asteroid*, yaitu objek dengan sifat fisik asteroid, namun secara dinamik lebih menyerupai komet. Objek dengan lintasan yang tidak stabil dan *chaos* sangat boleh jadi merupakan kandidat *Potentially Hazardous Asteroids* (PHA). Telaah keubahan setengah sumbu panjang orbit dari berbagai aspek dapat memberi kontribusi dalam pekerjaan selanjutnya.

Profil distribusi setengah sumbu panjang *Near Earth Asteroid*, dimana 3362 Khufu (1984 QA) merupakan salah satu anggotanya, diperlihatkan dalam Gambar 3-1 berikut.

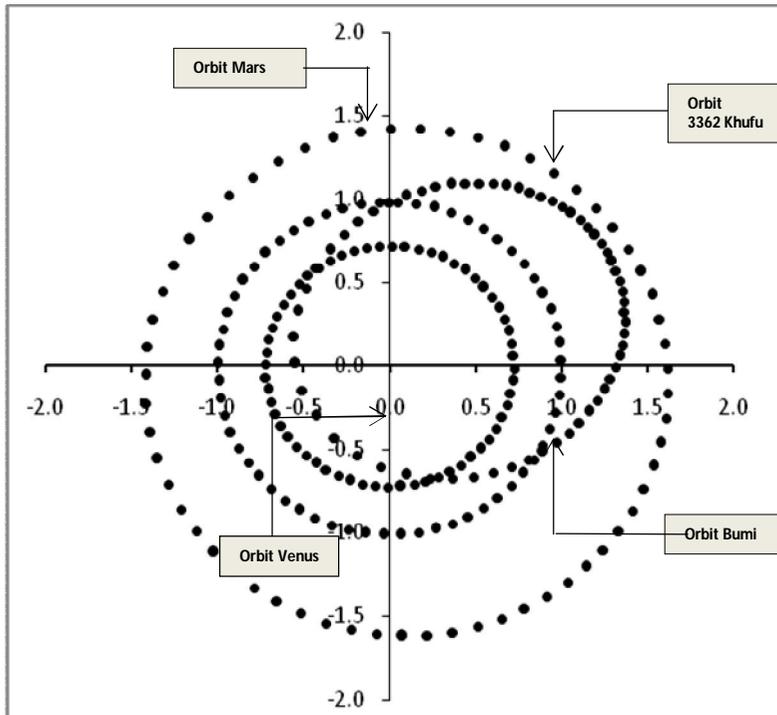


Gambar 3-1: Distribusi setengah sumbu panjang asteroid NEA (Siregar, 2004)

Asteroid 3362 Khufu (1984 QA) merupakan kelompok asteroid Aten, yang merupakan satu dari tiga kelompok asteroid dekat Bumi, dengan setengah sumbu panjang kurang dari 1.0 AU, karena itu orbitnya bisa mencapai orbit Bumi. Konfigurasi orbit asteroid ini dan tiga planet di sekitarnya untuk epoch 1 Februari 2008 diperlihatkan pada Gambar 3-2.

Asteroid dalam kelompok Aten tampak lebih bercahaya dibanding kelompok lainnya, karena sebagian besar komposisinya terdiri dari mineral silikat (termasuk kelas S), albedonya berkisar antara 0.10 sampai 0.22. Asteroid kelas S biasanya menempati bagian dalam sabuk asteroid (Klasifikasi Purdue University, 2008).

Hingga saat ini, periode rotasi 3362 Khufu belum diketahui, yang telah didapat adalah kurva cahaya 3362 Khufu yang dikemukakan oleh Wisniewski et al. (1997). Dari kurva cahaya tersebut, orang memperkirakan bahwa periode rotasi sekitar 5 jam (18000 detik). Tabel 3-2 berikut adalah besaran fisika yang diperlukan dalam perhitungan, dan Tabel 3-3 adalah data fisik asteroid 3362 Khufu pada epoch $t = 1$ Februari 2008.



Gambar 3-2: Orbit 3362 Khufu terhadap Venus, Bumi, dan Mars dengan Matahari sebagai pusat sistem. Jarak dari pusat sistem dinyatakan dalam AU

Tabel 3-2: BEBERAPA BESARAN FISIKA

No	Besaran fisika	Simbol	Nilai
1.	Konduktivitas Panas	K [W/m/K]	2.65
2.	Panas spesifik pada tekanan tetap	C [J/kg/K]	680
3.	Kerapatan materi (silika)	P [g/cm ³]	3.5
4.	Emisivitas panas permukaan	ϵ [.]	0.85
5.	Konstanta Stefan-Boltzmann	σ [W/m ² /K ⁴]	5.6704×10^{-8}
6.	Fluks Matahari	L_{\odot} [W]	3.846×10^{26}
7.	Kecepatan cahaya	c [m/detik]	2.9979×10^8

Tabel 3-3: DATA FISIK ASTEROID 3362 KHUFU (NASA. JPL.2008)

No.	Besaran fisik	Simbol	Nilai
1.	Diameter	d [m]	700
2.	Massa	m [kg]	6.3×10^{11}
3.	Bond albedo	A [.]	0.17
4.	Fluks Matahari yang diterima asteroid	ϵ [kg/s ³]	1397
5.	Periode revolusi	P [hari]	359.47
6.	Periode rotasi ditaksir dari kurva cahaya 3362 Khufu (Wisniewski et al. 1997)	ω [detik]	18000

4 HASIL PERHITUNGAN

Dari formulasi (2-7) didapat bahwa temperatur asteroid 3362 Khufu adalah 252 K, sementara temperatur asteroid Vyshešlavia berada pada rentang 160 K sampai 220 K (Broz, 2006). Dari persamaan (2-10), didapat koefisien tekanan radiasi bagi 3362 Khufu adalah 3.6×10^{-12} m/detik².

Dalam tulisan ini, dianggap $k_1 = k_2 = k_3 = k$, ini bisa terjadi kalau jarak asteroid dari Matahari tidak berevolusi, artinya baik setengah sumbu panjang a maupun eksentrisitasnya, e , dianggap tidak berubah. Vokrouhlicky dan Farinella (1998), mendapatkan $k^{-1} \cong 40 \times 10^6$ tahun untuk asteroid dengan jarak < 1 AU, dan $a = 0.9$. Dalam hal ini mereka menentukan k dari hubungan:

$$\kappa = \frac{4\alpha \mathcal{A}_r}{3n R} \quad (4-1)$$

dengan \mathcal{A}_r adalah karakteristik skala waktu, yang besarnya $\cong 2 \times 10^{-11}$ m/detik² untuk $\rho = 3.5 \frac{g}{cm^3}$ (Vokrouhlicky, 1998). Karena tidak ada informasi bagi 3362 Khufu, maka 3362 Khufu yang memiliki $a = 0.9894$ AU dan $\alpha = 0.83$ dianggap mempunyai nilai $\mathcal{A}_r \cong 2 \times 10^{-11}$ m/detik². Dari hubungan (4-1) di atas, maka untuk 3362 Khufu didapat $\kappa = 1.7 \times 10^{15}$ (detik)⁻¹ atau $\kappa^{-1} \cong 5.25 \times 10^6$ tahun.

Dengan mengacu kepada persamaan (2-11), maka persamaan (2-8) dan (2-9) untuk 3362 Khufu menjadi:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{diurnal} = 5.19 \times 10^{-6} \cos y \quad \text{m/detik} \quad (4-2)$$

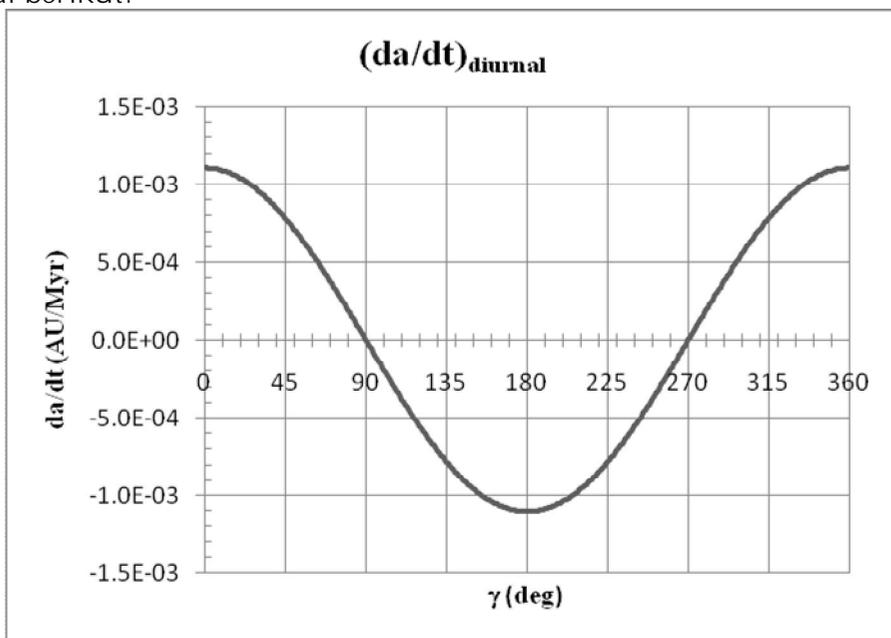
$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{seasonal}} = -1.48 \times 10^{-9} \sin^2 \gamma \text{ m/detik} \tag{4-3}$$

atau

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{diurnal}} = 1.12 \times 10^{-3} \cos \gamma \text{ AU/Myr} \tag{4-4}$$

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{seasonal}} = -3.15 \times 10^{-7} \sin^2 \gamma \text{ AU/Myr} \tag{4-5}$$

Persamaan (4-4) dan (4-5) di atas, dapat digambarkan dalam grafik sebagai berikut:



Gambar 4-1: Fungsi $\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{diurnal}}$ sebagai fungsi γ

Nilai maksimum $\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{diurnal}}$ untuk 3362 Khufu dicapai bila γ berada pada

nilai 0° dan 360° , dan maksimal negatif pada nilai $\gamma = 180^\circ$. Selain itu

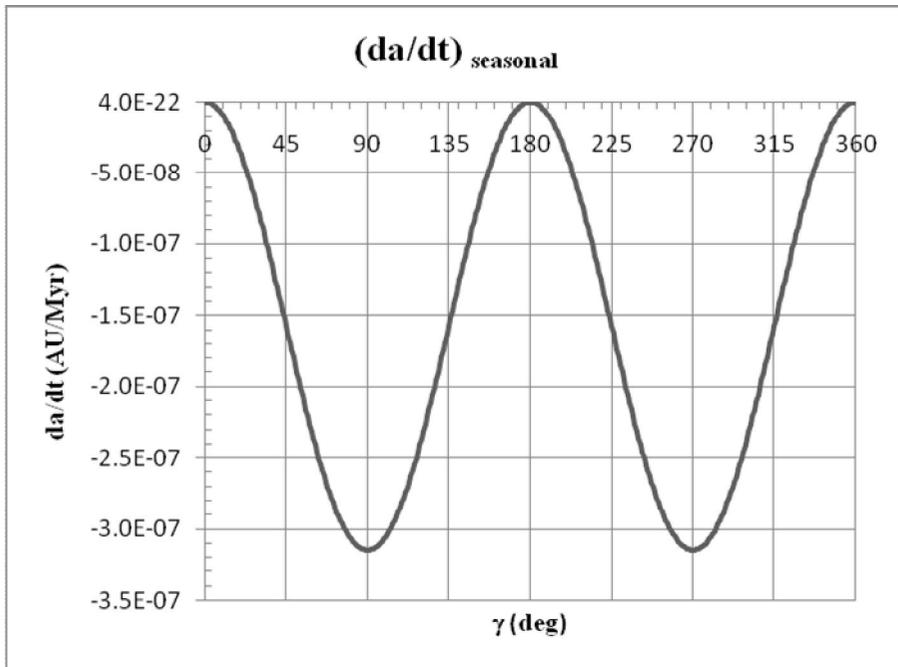
$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{diurnal}}$ bernilai 0 bila γ berada pada nilai 90° dan 270° . Artinya, pada

$\gamma = 0^\circ$ dan 360° , orbit asteroid tergeser menjauhi orbit Bumi dengan keubahan terbesar, sebaliknya bila bernilai maksimal negatif, berarti orbit asteroid tergeser masuk mendekati orbit Bumi dengan keubahan terbesar

pula. γ dengan nilai 0° dan 360° , berarti sumbu rotasi asteroid tegak lurus bidang orbitnya, sementara bila $\gamma = 90^\circ$ berarti sumbu rotasi asteroid berada pada bidang orbitnya. Sedangkan nilai maksimum positif (atau negatif) $\left(\frac{da}{dt}\right)_{diurnal} = 5.19 \times 10^{-6}$ AU/Myr atau 1.12×10^{-3} m/detik. Vokrouhlicky

dan Farinella (1998), mendapatkan $\left(\frac{da}{dt}\right)_{diurnal} = 0.004$ AU/Myr dengan

$\gamma = 106^\circ$ bagi sebuah meteoroid regolit berdiameter sekitar 10 m yang berasal dari asteroid 6 Hebe.



Gambar 4-2: Fungsi $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal}$ sebagai fungsi γ

Nilai maksimum negatif $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal}$ dicapai bila γ berada pada nilai 90°

dan 270° , sedangkan $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal}$ bernilai 0 bila γ berada pada nilai 0° ,

180° , dan 360° . Selain itu $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal}$ yang bernilai negatif memberi arti

bahwa orbit asteroid secara musiman akan terus tergeser mendekati orbit Bumi. Nilai negatif maksimum 3362 Khufu $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal} = -3.15 \times 10^{-7}$

AU/Myr = -1.48×10^{-9} m/detik. Hingga saat ini, belum ditemukan nilai $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal}$ bagi asteroid lain.

5 KESIMPULAN

Masih banyaknya informasi tentang 3362 Khufu (1984 QA) yang belum diketahui, membuat pekerjaan ini masih perlu dilakukan, diperbaiki, dan ditelaah ulang. Informasi tentang periode rotasi, rapat massa asteroid, *obliquity*, serta simpangan nilai dari masing-masing besaran tersebut, membuat banyak besaran menjadi tidak bisa dihitung dan ditentukan dengan baik, sehingga banyak besaran yang hanya merupakan asumsi atau berdasar kepada asteroid lain. Dengan demikian $\left(\frac{da}{dt}\right)_{diurnal}$ dan $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal}$ yang diperoleh tidak memberikan nilai pasti, karena nilai γ bagi 3362 Khufu saat ini tidak diketahui.

Nilai keubahan setengah sumbu panjang, $\left(\frac{da}{dt}\right)_{diurnal} = 5.19 \times 10^{-6}$ AU/Myr = 1.12×10^{-9} m/detik dan $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal} = -3.15 \times 10^{-7}$ AU/Myr = -1.48×10^{-9} m/detik

bagi asteroid 3362 Khufu adalah nilai maksimum atau minimumnya, karena tidak diketahui nilai γ bagi asteroid 3362 Khufu saat ini. Jika Vokrouhlicky dan Farinella (1998) mendapatkan $\left(\frac{da}{dt}\right)_{diurnal} = 0.004$ AU/Myr dengan $\gamma = 106^{\circ}$ bagi sebuah meteoroid regolit berdiameter sekitar 10 m yang berasal dari asteroid 6 Hebe, maka nilai itu masih berada pada rentang hasil perhitungan 3362 Khufu. Tetapi, informasi nilai $\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal}$ bagi benda kecil lain sebagai pembanding hasil perhitungan ini belum didapatkan.

Asteroid 3362 Khufu, merupakan salah satu kelompok Aten, perlu mendapat perhatian karena memiliki kemungkinan mendekati orbit Bumi, eksentrisitasnya yang besar ($e = 0.469$), serta setengah sumbu panjang $a = 0.989$, dalam simulasi orbitnya (Gambar 3-2) memperlihatkan sebagai asteroid yang berpotensi masuk ke dalam orbit Bumi. Masih diperlukan lebih banyak data lagi untuk mengetahui kapan asteroid tersebut masuk ke dalam orbit Bumi. Pekerjaan ini belum meninjau keberadaan efek lain yang akan mempengaruhi evolusi orbitnya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Budi Dermawan (Staf pengajar pada Program Studi Astronomi FMIPA-ITB) atas diskusi, masukan, dan sarannya dalam menentukan elemen orbit Asteroid 3362 Khufu (1984 QA), Venus, Bumi, dan Mars.

DAFTAR RUJUKAN

- Bottke, W. F.; Vokrouhlicky, D.; Rubincam, DP.; and Nesvorny, D., 2006. *The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics*, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 34, 157–191.
- Bottke, W. F.; Vokrouhlicky, D.; Rubincam, DP.; and Broz, M., 2002. *The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids*, in Bottke, W.F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel., R.P (eds.). *Asteroids III*, <http://www.uapress.arizona.edu/books/bid1468.htm>.
- Broz, M., 2006. *Yarkovsky Effect and the Dynamics of Solar System*, PhD Thesis, Charles University, Faculty of Mathematics and Physics Astronomical Institut, Prague.
- Farinella, P.; Vokrouhlicky, D.; and Hartmann., W.K., 1998. *Meteorite Delivery via Yarkovsky Orbital Drift*, *Icarus* 132, 378-387.
- NASA JPL, 2008. *Solar System Dynamics*, <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>.
- Purdue University, College of Science Department of Physics, 2008. *ASTR263L, Descriptive Astronomy: The Solar System Laboratory*, <http://www.physics.purdue.edu/astr263l/SStour/asteroids/asteroids.html>.
- Siregar, S., 2004. *On Near-Earth Asteroid Study at Department of Astronomy, Bandung Institute of Technology*, Proceeding Seminar MIPA IV, p. 224, Penerbit ITB.
- Vokrouhlicky, D., 1998. *Diurnal Yarkovsky Effect as A Source of Mobility of Meter-sized Asteroidal Fragments: I. Linear Theory*, *A&A* . 335, 1093–1100.
- Vokrouhlicky, D. and Bottke, W. F., 2001. *The Yarkovsky Thermal Force on Small Asteroids and Their Fragments*, *A&A*. 371, 350-353.
- Vokrouhlicky, D. and Farinella, P., 1998. *The Yarkovsky Seasonal Effect on Asteroidal Fragments: A Nonlinearized Theory for the Plane-Parallel Case*, *AJ*. 116, 2032-2041.
- Wisniewski, W.Z.; Michalowski, T.M.; Harris, A.W.; and McMillan, R.S., 1997. *Photometric Observations of 125 Asteroids*, *Icarus* 126, 395–449.