

Dinamika Orbit Asteroid Dekat-Bumi dengan Jarak Perihelion yang Pendek

Siti Afifah Julfrikar Islamina, Judhistira Aria Utama, Mochamad Arifin, Wiendartun

Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Pendidikan Indonesia

*Email : sitiafifahji007@upi.edu

ABSTRAK

Asteroid dekat-Bumi (ADB) memiliki orbit yang cenderung mudah berubah karena dinamika di bagian dalam Tata Surya. Kondisi ini memungkinkan keadaan suatu asteroid di kelas tertentu hanya bersifat sementara. Dari berbagai komputasi orbit diketahui bahwa sebanyak ~70% populasi ADB berakhir sebagai asteroid penumbuk Matahari. Hal ini mengindikasikan bahwa orbit ADB telah berevolusi hingga memiliki jarak perihelion (q) yang sangat pendek. Di dalam penelitian ini digunakan sampel terbatas (14 asteroid dengan nilai q pendek yang mendefinisikan populasi asteroid dekat-Matahari (ADM)) dari populasi ADB nyata terseleksi sebanyak 3372 asteroid dengan orbit yang telah dikenal baik. Komputasi orbit dilakukan hingga 5×10^6 tahun ke masa depan dengan bantuan integrator *SWIFT-RMVS4* dengan menyertakan perhitungan efek Yarkovsky selain efek gravitasi. Hingga akhir integrasi, lima ADM berakhir sebagai penumbuk Matahari pada rentang waktu kurang dari 7×10^5 tahun untuk komputasi yang menyertakan perhitungan efek yarkovsky dan $1,1 \times 10^5$ tahun dalam komputasi komputasi yang hanya berada di bawah pengaruh gaya gravitasi. Tujuh ADM mengalami evolusi orbit yang cenderung stabil di kedua komputasi, dan dua ADM diketahui mengalami resonansi Kozai untuk nilai setengah sumbu panjang $a < 2$ sa.

Kata Kunci : Asteroid Dekat-Bumi, Asteroid Dekat-Matahari, Efek Yarkovsky, Jarak Perihelion Terpendek

Abstract

Near-Earth asteroids (NEAs) have orbits that tend to change easily because of the dynamics in the inner Solar System. This condition allows the state of an asteroid in a certain class to be temporary. From various orbital computations it is known that as much as ~ 70% of the NEAs population ends up as asteroids hitting the sun. This indicates that the NEAs orbit has evolved to have a very short perihelion (q) distance. This study used a limited sample (14 asteroids with short q values that define the near-sun asteroid (NSAs) population) from a selected real NEAs population of 3,372 asteroids with well-known orbits. The orbital computations were carried out up to 5×10^6 years into the future using *SWIFT-RMVS4* integrator with Yarkovsky effect inclusion in addition to the gravitational effect. By the end of the integration, five asteroids ended up as Sun impactor within time less than 7×10^5 years for computation that included the Yarkovsky effect and 1.1×10^5 years in computation only under the influence of gravitational force. Seven asteroids underwent stable orbital evolution in both computations, and two asteroids were known to experience Kozai resonance for semimajor axis a less than 2 au.

Keywords: Near-Earth Asteroids, Near-Sun Asteroids, Yarkovsky Effect, The Smallest Perihelion Distance

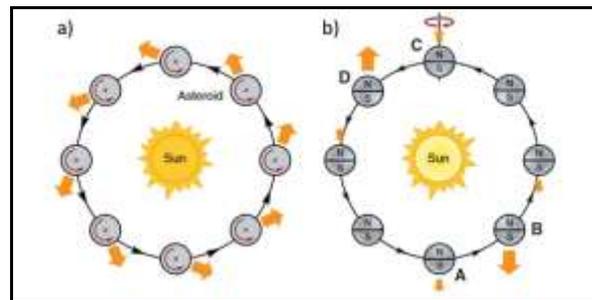
PENDAHULUAN

Asteroid dekat-Bumi memiliki ruang dengan nilai jarak dekat ke matahari (perihelion = q) $q < 1,3$ dalam satuan astronomi dan nilai jarak jauh ke matahari (aphelion = Q) $Q > 0,98$ sa (Bottke dkk., 2000). Asteroid dekat-bumi dikelompokkan menjadi empat kelas asteroid yaitu Apollo, Amor, Atens, dan Atira dengan masing-masing jarak perihelion, aphelion, dan setengah sumbu panjang (a dalam satuan astronomi) kelas asteroid seperti Apollo ($q \leq 1,0167$ sa dan $a \geq 1,0$ sa), Amor ($1,0167 < q \leq 1,3$ sa), Atens ($a < 1,0$ sa dan $Q \geq 0,983$ sa) dan Atira ($a < 1,0$ sa dan $Q < 0,983$ sa) (Morbidelli dkk., 2002). Asteroid dekat-Bumi mengalami perubahan orbit akibat dekatnya dengan planet-planet Terrestrial dan planet masif sehingga keanggotaan kelompok asteroid secara individual dapat berubah (Milani dkk., 1989). Dengan jarak perihelion yang dekat dengan Matahari, terdapat 70% asteroid dekat-Bumi mengalami tumbukan dengan Matahari (Marchi dkk., 2009). Asteroid yang mendapat paparan radiasi panas dari Matahari, untuk mengalami perpindahan orbit dibutuhkan waktu hingga ratusan bahkan ribuan tahun (Emel'yanenko, 2017).

Pada dinamika asteroid, gaya yang mempengaruhi yaitu gaya gravitasi. Gaya ini pada umumnya terjadi oleh interaksi dua benda atau N benda yang memiliki massa. Pada asteroid, interaksi dengan planet besar cenderung mengabaikan keadaan massa asteroid karena massanya relatif kecil. Dari interaksi ini, asteroid dapat berevolusi dari awal mula orbit umumnya berasal dari Sabuk Utama menjadi penghuni asteroid kelas dekat-Bumi akibat adanya perturbasi. Evolusi orbit asteroid dapat terjadi juga akibat dari adanya resonansi yang menyebabkan perubahan setengah sumbu panjang yang berkorelasi dengan perubahan nilai eksentrisitas (dan inklinasi). Resonansi ini merubah nilai eksentrisitas orbit dalam variasi resonansi yang terjadi. Resonansi yang sangat kuat yaitu resonansi u_6 pada sisi dalam sabuk asteroid, resonansi gerak merata dengan Jupiter dengan perbandingan 3:1, 5:2, dan 2:1 (Morbidelli dkk., 2002). Selain dari gaya gravitasi dan resonansi, terdapat gaya non-gravitasi yang juga mempengaruhi perubahan nilai setengah sumbu panjang yaitu efek Yarkovsky.

Efek Yarkovsky merupakan gaya non-gravitasi dari emisi isotropik termal

mengakibatkan asteroid atau meteoroid yang berotasi mengalami momentum (Bottke dkk., 2006). Efek ini memiliki dua mekanisme, komponen harian dan komponen musiman. Pada komponen harian, efek Yarkovsky dengan sumbu rotasi asteroid tegak lurus pada orbit dengan Matahari berada pada ekuator, asteroid yang terpapar panas Matahari akan diserap sebagian dan dipancarkan kembali. Pada selang waktu tertentu, asteroid akan mengalami momen inersia. Setelah berlalu, panas yang berada dalam asteroid akan memberikan pertambahan kecepatan orbit. Jika asteroid berotasi *prograde* maka arah rotasi akan keluar Matahari, sedangkan jika asteroid berotasi *retrograde* maka arah rotasinya ke dalam Matahari. Komponen musiman efek Yarkovsky terjadi jika sumbu rotasi berada di orbit. Pemanasan terjadi di salah satu sisi kutub tidak akan langsung diradiasikan, melainkan akan diserap. Ini dikarenakan adanya momen inersia termal. Berbeda dengan komponen harian, pada komponen musiman asteroid berotasi ke dalam Matahari.



Gambar 1. a) Komponen harian efek Yarkovsky akan terjadi pada asteroid yang berotasi tegak lurus dengan bidang orbit.

Asteroid akan mengalami penyerapan termal dari paparan panas Matahari kemudian akan dipancarkan kembali seperti siklus siang dan malam. b) Komponen musiman efek Yarkovsky akan terjadi pada asteroid dengan sumbu putar di bidang orbit mengalami pemanasan dan pendinginan pada bagian utara dan bagian selatan menghasilkan gaya termal. Bagian A dan C mengalami paparan panas Matahari secara maksimum maka bagian B dan D akan menghasilkan resultan gaya radiasi maksimum. Komponen musiman terjadi selama satu revolusi dengan Matahari.

Gaya efek Yarkovsky terdapat dua bagian, 1) mengukur pada penyebaran temperatur permukaan, 2) evaluasi dari radiasi termal (*torque*). Untuk menghitung temperatur permukaan dapat menggunakan persamaan

difusi panas untuk aliran energi dalam benda (Bottke dkk., 2006):

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Atau melalui permukaannya

$$(K \nabla T \cdot \mathbf{n}_\perp) + \varepsilon \sigma T^4 = \alpha E \quad (2)$$

Dengan keterangan:

T= Temperatur

K= Konduktivitas Termal

C= Kapasitas Panas Jenis Spesifik Pada Tekanan Konstan

σ =Konstantas Stefan Boltzmann

ρ = Densitas

ε = Emisivitas Termal pada Permukaan

$\alpha=1-A$ dengan A bond albedo.

Pada persamaan 2, \mathbf{n}_\perp merupakan vektor normal, E fluks radiasi Matahari yang jatuh ke asteroid. Jika keterangan diketahui, maka persamaan 1 dan 2 dapat diselesaikan secara numerik. Dengan ini dapat menurunkan skala ukuran dan waktu pada parameter minimum. Dua dasar parameter yaitu :

1) Penetrasi kedalaman dari gelombang panas

$$l_v = \sqrt{K/\rho C v} \quad (3)$$

2) Parameter Termal

$$\Theta_v = \sqrt{K \rho C v / (\varepsilon \sigma T_*^4)} \quad (4)$$

Efek Yarkovsky akan mengubah setengah sumbu panjang a sebuah objek. Karena perubahan yang kecil, dengan memvariasikan rata-rata a lebih dari satu kali revolusi. Dengan mengasumsikan berbentuk bola sempurna dengan jari-jari R , dan mengabaikan eksentrisitas e , rata-rata komponen harian dan komponen musiman pada da/dt (Bottke dkk., 2006).

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{diurnal}} = -\frac{8\alpha\Phi}{9n} F_\omega(R', \Theta) \cos \gamma \quad (5)$$

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{seasonal}} = -\frac{4\alpha\Phi}{9n} F_n(R', \Theta) \sin^2 \gamma \quad (6)$$

Dengan ϕ koefisien tekanan radiasi $\phi = \pi R^2 \varepsilon_0 / (mc)$ dan γ kemiringan dari sumbu rotasi.

Dari (Bottke dkk., 2006) memberikan beberapa pemahaman dasar bagaimana efek Yarkovsky mengalami perturbasi pada nilai setengah sumbu panjang bergantung pada parameter seperti ukuran dan obliquitas, konduktivitas permukaan dan jarak heliosentrik.

Pada jurnal ini bertujuan yaitu untuk mengetahui evolusi asteroid dekat-Bumi (ADB) dua juta tahun kedepan dengan jarak perihelion $q < 0,1$ satuan astronomi pada pengaruh dari

efek Yarkovsky dengan metode simulasi numerik.

METODE

Metode penelitian yang dilakukan dengan komputasi numerik masalah N -benda. Data diperoleh dari pangkalan data JPL-NASA *Small Bodies Database Search Engines* (https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi) dengan objek dekat-Bumi terdiri dari Amor, Apollo, Aten dan Atira dengan batas galat orbit 1"/dekade. Sebanyak 3372 sampel asteroid dekat-Bumi diperoleh dengan data yang terdiri dari besaran fisis (massa dan radius), vektor posisi, kecepatan untuk Matahari dan planet yang terlibat (termasuk dengan Bulan sebagai satelit Bumi). Untuk memperoleh besaran fisis termal yang belum terdapat pada laman, dapat diperoleh dengan mengestimasi besaran fisis termal yang merujuk pada (Dermawan dkk., 2015) untuk mempelajari dinamika asteroid dekat-Bumi jangka panjang. Dalam proses integrasi numerik, persamaan yang disimulasikan berdasarkan jurnal (Galushina & Letner, 2020) yaitu :

$$a = \frac{A_2}{r^2} \quad (7)$$

Dengan nilai a merupakan percepatan yang diakibatkan oleh efek Yarkovsky, A_2 koefisien karakterisasi efek Yarkovsky dan r merupakan jarak heliosentrik asteroid. Nilai A_2 ini dapat diperoleh dari pangkalan data JPL-NASA. r dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan irisan kerucut. Untuk memperoleh data evolusi orbit kemudian diproses dengan menggunakan paket integrator SWIFT RMVS4 *Yarkovsky Effect [Regularized Mixed-Variable Symplectic]* (Levison & Duncan, 1994) dengan kemampuan menghitung gaya gravitasi, efek termal serta papasan dekatnya dengan teliti dan SWIFT RMVS4 untuk menghitung gaya gravitasi dan papasan dekatnya dengan teliti dalam kurun waktu lima juta tahun ke depan.

Karena keterbatasan dari integrator untuk melakukan integrasi seluruh asteroid sekaligus, dapat diatasi dengan memecahkan 3372 sampel asteroid menjadi empat kelompok (*batch*). Untuk *batch* 1 sampai *batch* 3 masing-masing terdiri dari 1000 asteroid dan *batch* 4 terdapat 372 asteroid. Perhitungan langkah waktu yang digunakan untuk seluruh *batch* yaitu 1/1000 tahun (~9 jam) dicuplik setiap 1000 tahun. Dalam proses evolusi orbit asteroid di ikuti dengan asteroid menumbuk Matahari, menumbuk planet-planet dan terlempar keluar Tata Surya ($a > 100$ sa). Untuk mempersingkat

waktu dalam proses pengambilan data evolusi orbit, disertakan pula parameter yang nilai $a > 100$ sa akan tereliminasi dalam perhitungan. Sebanyak 14 sampel dari 3372 sampel asteroid dekat-Bumi tersseleksi dengan memenuhi nilai $q' < 0,1$ sa. Untuk menentukan nilai q' menggunakan metode dari (Emel'yanenko, 2017) yaitu:

$$q' = a(1 - \sqrt{1 - c^2}) \tag{8}$$

Dengan

$$c = \sqrt{1 - e^2} \cos i \tag{9}$$

Nilai q' ini menunjukkan keberadaan asteroid dekat-Bumi yang menghuni sebagai asteroid

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan integrasi numerik, terdapat 14 sampel dari 3372 asteroid dekat-Bumi terseleksi nilai $q' < 0,1$ sa dengan orbit elemen masing masing a, e, i, Ω, ω dan M . Asteroid yang memenuhi nilai $q' < 0,1$ SA dengan partikel ID asteroid (1697), (1703), (1971), (2163), (2196), (2301), (2343), (2364), (2515), (2826), (2867), (2869), (3109), dan (3224).

Nilai setengah sumbu panjang berada pada rentang $0,8 < a < 3,27$ sa. Nilai eksentrisitas dan nilai inklinasi cenderung besar ($e > \sim 0,4$ sa dan $i > \sim 20^\circ$) sejak awal evolusi. Material pada asteroid paling banyak merupakan

dekat-Matahari secara teoritik. Dengan proses integrasi numerik, boleh jadi yang nilai memenuhi q' masih berevolusi ataupun berakhir sebagai penumbuk Matahari.

Untuk memenuhi tujuan penelitian ini, di bentuk dengan dua keadaan. Keadaan I dengan memperhitungkan pengaruh gravitasi dan efek Yarkovsky sementara Keadaan II hanya pengaruh gaya gravitasi dari objek masif. Setelah diperoleh hasil data untuk kedua keadaan, dilakukan pengolahan data dengan menggunakan *spreadsheet* untuk memperoleh hasil yang dapat mencapai tujuan.

sebelas berbahan regolith, satu basalt (asteroid 2343), dan dua karbon (asteroid 2196 dan 2869). Ukuran asteroid memiliki diameter $0,6 < D < 2$ km dengan periode rotasi $\sim 5-6$ jam.

Dengan menggunakan model analitik (O'brien, 2004) dan mengasumsikan nilai oblikuitas pada keadaan maksimum (tidak diketahui nilai oblikuitas) diperoleh nilai gaya Yarkovsky dan nilai da/dt baik komponen harian dan komponen musiman untuk empat belas asteroid disajikan dalam tabel 1

Tabel 1. Gaya Yarkovsky (F_y) dan nilai da/dt untuk komponen harian dan komponen musiman.

Nilai da/dt pada tabel dalam keadaan nilai oblikuitas maksimum. Untuk komponen harian, nilai da/dt maksimum saat oblikuitas pada sudut 0° dan sudut 180° . Komponen musiman, nilai da/dt maksimum saat oblikuitas pada sudut 90° . Untuk keadaan minimum, nilai da/dt berada pada nol baik komponen harian maupun komponen musiman dengan nilai oblikuitas pada sudut 90° (komponen harian) dan sudut 0° dan sudut 180° (komponen musiman).

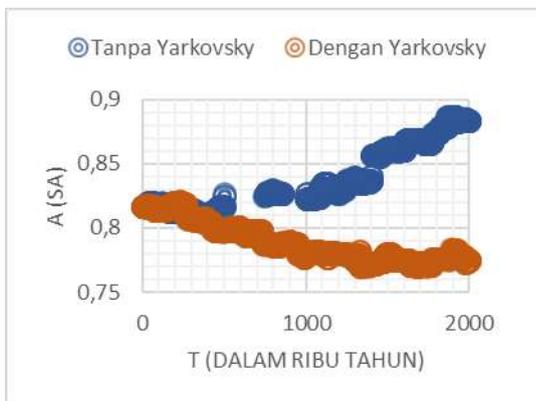
Partikel ID	F_y Komponen Harian (N/kg)	F_y Komponen Musiman (N/kg)	Nilai da/dt Komponen Harian (SA/Juta Tahun)	Nilai da/dt Komponen Musiman (SA/Juta Tahun)
1697	$5,78 \times 10^{-15}$	$1,83 \times 10^{-14}$	$1,75 \times 10^{-4}$	$5,55 \times 10^{-4}$
1703	$1,91 \times 10^{-14}$	$2,33 \times 10^{-14}$	$3,00 \times 10^{-4}$	$3,66 \times 10^{-4}$
1971	$1,63 \times 10^{-14}$	$9,76 \times 10^{-15}$	$1,38 \times 10^{-3}$	$8,26 \times 10^{-4}$
2163	$9,14 \times 10^{-15}$	$5,82 \times 10^{-15}$	$8,08 \times 10^{-4}$	$5,15 \times 10^{-4}$
2196	$2,05 \times 10^{-13}$	$1,13 \times 10^{-13}$	$2,57 \times 10^{-2}$	$1,42 \times 10^{-2}$
2301	$1,14 \times 10^{-14}$	$9,29 \times 10^{-15}$	$6,77 \times 10^{-4}$	$5,87 \times 10^{-4}$
2343	$1,31 \times 10^{-13}$	$8,62 \times 10^{-14}$	$1,19 \times 10^{-2}$	$7,81 \times 10^{-3}$
2364	$4,23 \times 10^{-15}$	$9,40 \times 10^{-15}$	$7,38 \times 10^{-5}$	$1,64 \times 10^{-4}$
2515	$7,39 \times 10^{-15}$	$8,26 \times 10^{-15}$	$2,86 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-4}$
2826	$7,57 \times 10^{-15}$	$6,58 \times 10^{-15}$	$4,79 \times 10^{-4}$	$4,16 \times 10^{-4}$
2867	$5,62 \times 10^{-15}$	$8,20 \times 10^{-15}$	$1,21 \times 10^{-4}$	$1,76 \times 10^{-4}$
2869	$7,90 \times 10^{-14}$	$5,73 \times 10^{-14}$	$7,04 \times 10^{-3}$	$5,11 \times 10^{-3}$
3109	$5,10 \times 10^{-15}$	$4,78 \times 10^{-15}$	$2,84 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-4}$
3224	$3,73 \times 10^{-15}$	$5,06 \times 10^{-15}$	$8,59 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-4}$

Perhitungan nilai da/dt dengan keadaan nilai oblikuitas maksimum yang disajikan pada tabel 1 mendekati pada hasil penelitian yang sudah dilakukan oleh (Chesley dkk., 2002; Nugent dkk., 2012).

A. Asteroid dengan nilai setengah sumbu panjang cenderung stabil.

Selama dua juta tahun, terdapat 7 asteroid (asteroid (1697), (1703), (2301), (2343), (2364), (2515), (3109)) yang masih berevolusi hingga lima juta tahun dengan keadaan efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan hanya gaya gravitasi. Sejak awal evolusi hingga dua juta tahun, nilai setengah sumbu panjang mengalami perubahan yang relatif kecil dengan nilai berada pada $\sim 0,8$ sa - $\sim 2,62$ sa. Nilai eksentrisitas untuk ketujuh asteroid cenderung eksentrik dan nilai inklinasi bernilai $\sim 20^\circ$ sejak awal evolusi hingga dua juta tahun yang boleh jadi diakibatkan adanya papasan dekat dengan planet Terrestrial dan terjadinya resonansi. Enam material merupakan regolith dan satu basalt (asteroid 2343).

Sebagai contoh pada gambar 2 menunjukkan nilai setengah sumbu panjang untuk asteroid (1703) terdapat perubahan yang relatif kecil selama dua juta tahun untuk dua keadaan (efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan hanya gaya gravitasi

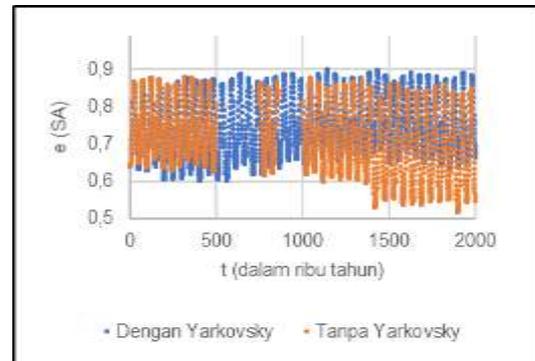


Gambar 2. Nilai setengah sumbu panjang untuk asteroid (1703). Warna biru menunjukkan efek Yarkovsky+gaya gravitasi, warna oranye menunjukkan gaya gravitasi.

Nilai da/dt pada asteroid (1703) menunjukkan orbit *prograde* sehingga nilai setengah sumbu panjang nya keluar/menjauhi Matahari. Namun pada grafik a terhadap waktu, perubahan nilai a menunjukkan ke dalam/mendekati Matahari.

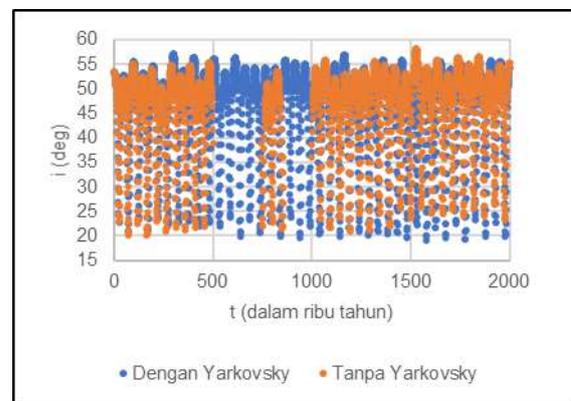
Pada gambar 3 menunjukkan nilai eksentrisitas untuk asteroid (1703) beresilasi dengan nilai

yang cenderung eksentrik selama dua juta tahun untuk dua keadaan (efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan hanya gaya gravitasi).



Gambar 3. Nilai eksentrisitas untuk asteroid (1703). Dengan warna biru menunjukkan efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan warna oranye menunjukkan gaya gravitasi.

Pada gambar 4 menunjukkan nilai inklinasi terhadap waktu untuk asteroid (1703) beresilasi $i > \sim 20^\circ$ selama dua juta tahun untuk dua keadaan (efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan hanya gaya gravitasi).

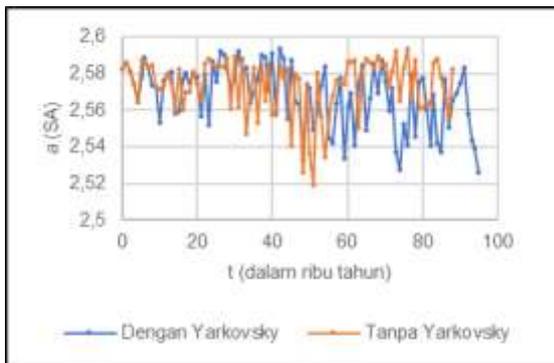


Gambar 4. Nilai Inklinasi untuk asteroid (1703). Warna biru menunjukkan efek Yarkovsky+gaya gravitasi, warna oranye menunjukkan gaya gravitasi

B. Asteroid sebagai penumbuk Matahari

Terdapat enam asteroid (1971), (2163), (2196), (2826), (2869) dan (3224) mengakhiri evolusi sebagai penumbuk Matahari dengan lama evolusi 7×10^5 tahun dalam keadaan efek Yarkovsky dan 11×10^4 tahun dalam keadaan pengaruh gaya gravitasi. Ukuran diameter untuk ke enam asteroid yaitu $0,75 < D < 1,491$ km. Mayoritas asteroid penumbuk matahari ini memiliki material regolith, dan terdapat dua asteroid (2196) dan (2869) memiliki material karbon.

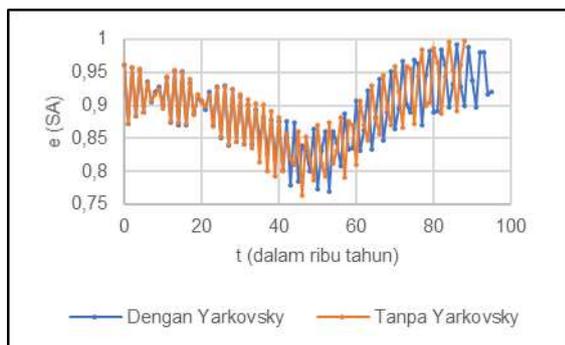
Sebelum mengakhiri evolusi dengan menumbuk Matahari, terjadi papasan dekat dengan planet Bumi sebagai contoh asteroid (1971), (2163), dan (2826). Dua asteroid (2869) dan (3224) mengalami papasan dekat dengan planet Venus dan satu asteroid (2196) planet Jupiter sebelum akhirnya menumbuk Matahari. Pada pengaruh efek Yarkovsky+gaya gravitasi, asteroid cenderung bertahan lebih lama dibandingkan hanya gaya gravitasi saja. Sebagai contoh asteroid (2163) dengan nilai a beresilasi disekitar $\sim 2,5$ sa ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Grafik setengah sumbu panjang terhadap waktu untuk asteroid (2163). Warna biru menunjukkan efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan warna oranye menunjukkan gaya gravitasi.

Sebelum berakhir menumbuk Matahari, asteroid (2163) mengalami papasan dekat dengan Bumi. Asteroid (2163) boleh jadi mengalami resonansi gerak rerata 3:1 dengan Jupiter ($\sim 2,5$ sa) yang mengakibatkan nilai eksentrisitas berubah.

Nilai eksentrisitas pada asteroid (2163) cenderung eksentrik sejak awal evolusi hingga akhir evolusi. Pada gambar 6 menunjukkan grafik eksentrisitas terhadap waktu untuk keadaan gaya gravitasi+efek Yarkovsky dan keadaan hanya gaya gravitasi.



Gambar 6. Grafik eksentrisitas terhadap waktu untuk asteroid (2163). Warna biru menunjukkan

efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan warna oranye menunjukkan gaya gravitasi

Nilai inklinasi beresilasi pada sekitar $\sim 10^0$ dan 80^0 yang ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik inklinasi terhadap waktu untuk asteroid (2163). Warna biru menunjukkan efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan warna oranye menunjukkan gaya gravitasi.

Pada keadaan dengan efek Yarkovsky+gaya gravitasi, asteroid (2163) berevolusi selama 95.000 tahun, sedangkan keadaan hanya gaya gravitasi berevolusi hingga 88.000 tahun. Dengan diameter 0,850 km dan bermaterial regolith, pada keadaan dengan efek Yarkovsky, asteroid (2163) dapat bertahan lebih lama selama 7.000 tahun dibandingkan dengan gaya gravitasi saja. Nilai da/dt pada asteroid bernilai positif yang menunjukkan orbit *prograde* (2163) dengan bergantung pada orientasi sumbu putar, sifat termal, dan ukuran. Pada pekerjaan (Bottke dkk., 2000) perubahan da/dt yang cepat dapat membuat asteroid loncat ke ruang resonansi yang lemah sehingga bergerak ke dalam atau ke luar dan terjebak pada ruang resonansi 3:1 atau u_6 .

C. Asteroid yang mengalami resonansi Kozai.

Dua asteroid mengalami resonansi Kozai untuk pengaruh dua keadaan (asteroid 2867) dan hanya gaya gravitasi (asteroid 3224). Menurut (Michel & Thomas, 1996) resonansi Kozai terjadi jika nilai eksentrisitas minimum, nilai inklinasi maksimum begitu pula sebaliknya secara periodik mengakibatkan argumen perihelion berlibrasi disekitar sudut 90^0 dan sudut 270^0 . Resonansi Kozai juga berperan untuk menghindari terjadinya papasan dekat dengan planet sehingga asteroid memiliki hidup yang lebih panjang.

Asteroid (2867) memiliki nilai setengah sumbu panjang $\sim 1,00$ sa. Jika dengan membandingkan nilai a yang dimiliki asteroid (2867) berada dekat Bumi.

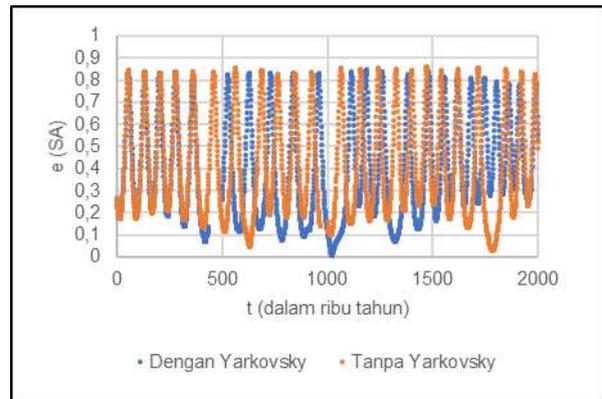
Asteroid ini mengalami resonansi Kozai dengan nilai eksentrisitas minimum $\sim 0,26$ sa dan nilai inklinasi maksimum $\sim 63^\circ$. Sejak awal evolusi, hingga dua juta tahun, asteroid (2867) perubahan nilai a cenderung berubah bertambah besar. Hal ini sesuai dengan nilai da/dt pada positif dan orbit *prograde* yang ditunjukkan pada tabel 1 bahwa nilai setengah sumbu panjang bertambah hingga mendekati $\sim 1,14$ sa pada pengaruh efek Yarkovsky. Sedangkan dengan keadaan hanya gaya gravitasi, nilai a pada awal evolusi hingga satu juta tahun mengalami penurunan nilai setengah sumbu panjang, kemudian bertambah hingga mendekati nilai a Bumi. Pada gambar 8 menunjukkan perubahan nilai setengah sumbu panjang pada keadaan dengan efek Yarkovsky+gravitasi dan keadaan hanya gaya gravitasi.



Gambar 8. Nilai setengah sumbu panjang untuk asteroid (2867) dengan warna biru keadaan efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan warna oranye menunjukkan hanya gaya gravitasi.

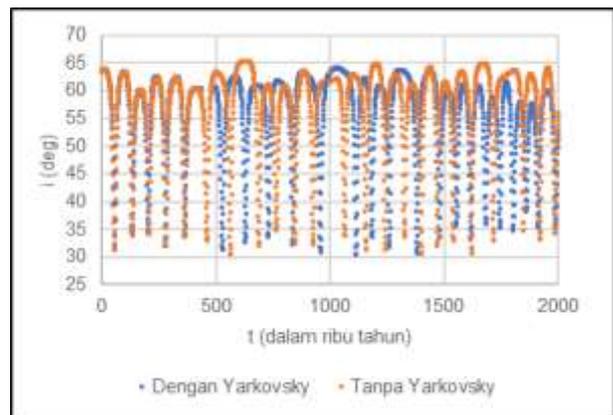
Pada gambar 9 menunjukkan nilai eksentrisitas yang beresilasi $\sim 0,26 < e < \sim 0,8$ sa sejak awal evolusi hingga dua juta tahun baik dalam keadaan efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan keadaan hanya gaya gravitasi

Yarkovsky+gaya gravitasi dan warna oranye hanya gaya gravitasi.



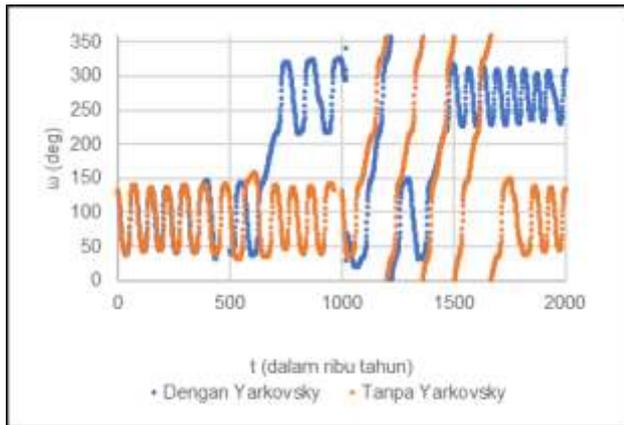
Gambar 9. Nilai eksentrisitas untuk asteroid (2867). Warna biru menunjukkan dengan efek

Pada gambar 10 menunjukkan nilai inklinasi beresilasi $\sim 30^\circ < i < \sim 63^\circ$. Pada awal evolusi nilai inklinasi cenderung besar.



Gambar 10. Nilai inklinasi terhadap waktu untuk asteroid (2867). Warna biru menunjukkan dengan efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan warna oranye hanya gaya gravitasi.

Pada gambar 11 menunjukkan nilai argumen perihelion berlibrasi pada sudut 90° atau sudut 270° yang membuktikan asteroid (2867) mengalami resonansi Kozai.



Gambar 11. Nilai argumen perihelion terhadap waktu untuk asteroid (2867). Warna biru menunjukkan dengan efek Yarkovsky+gaya gravitasi dan warna oranye hanya gaya gravitasi.

Material pada asteroid (2867) merupakan regolith dengan diameter asteroid 1,488 km. Sedangkan pada asteroid (3224) hanya dalam pengaruh gaya gravitasi mengalami resonansi Kozai. Sejak awal evolusi hingga dua juta tahun, nilai setengah sumbu panjang cenderung konstan. Nilai eksentrisitas dan nilai inklinasi yang beresilasi keterbalikan menunjukkan terjadinya resonansi. Nilai argumen perihelion asteroid (3224) berlibrasi sekitar sudut 270° selama dua juta tahun.

PENUTUP

Sebanyak 14 sampel dari 3372 asteroid dekat-Bumi yang terseleksi nilai $q' < 0,1$ sa. Berdasarkan integrasi numerik, lima diantaranya mengalami evolusi yang berakhir sebagai penumbuk Matahari. Mayoritas asteroid memiliki material regolith. Pada kasus ini efek Yarkosky cukup berperan besar dalam perubahan nilai setengah sumbu panjang dan asteroid sebagai penumbuk matahari memiliki umur yang cukup panjang dibandingkan dengan keadaan hanya gaya gravitasi saja.

Tujuh asteroid mengalami perubahan nilai setengah sumbu panjang yang relatif kecil atau cenderung stabil baik dengan keadaan efek Yarkovsky maupun hanya gaya gravitasi. nilai eksentrisitas dan nilai inklinasi masing masing memiliki nilai yang eksentrik dan nilai inklinasi yang cenderung besar.

Terdapat dua asteroid yang mengalami resonansi Kozai dengan nilai $a < 2$ sa. Pada asteroid (2867) dengan efek Yarkovsky mengalami perubahan nilai setengah sumbu panjang yang relatif kecil sehingga asteroid

berevolusi secara lambat dan berumur lebih panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia dengan kontrak bernomor 429/UN40.D/PT/2020.

DAFTAR PUSTAKA

- Bottke, J., Jedicke, R., Morbidelli, A., Petit, J. M., & Gladman, B. (2000). Understanding the distribution of near-earth asteroids. *Science*, 288(5474), 2190–2194. <https://doi.org/10.1126/science.288.5474.2190>
- Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., & Nesvorný, D. (2006). The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 157–191. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125154>
- Chesley, S. R., Ostro, S. J., Vokrouhlicky, D., & Chamberlin, A. B. (2002). *Direct Detection of the Yarkovsky Effect by Radar Ranging to Asteroid 6489 Golevka*. 3.
- Dermawan, B., Hidayat, T., Utama, J. A., Mandey, D., Wibowo, R. W., Huda, I. N., & Tampubolon, I. (2015). Estimation of unknown physical properties of near-Earth asteroids for dynamical study. *AIP Conference Proceedings*, 1677. <https://doi.org/10.1063/1.4930668>
- Emel'yanenko, V. V. (2017). Near-Sun asteroids. *Solar System Research*, 51(1), 59–63. <https://doi.org/10.1134/S0038094616060010>
- Galushina, T. Y., & Letner, O. N. (2020). Influence of the Yarkovsky Effect on Motion of Asteroids with Small Perihelion Distance. *Russian Physics Journal*, 63(1), 71–78. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-02004-8>
- Levison, H. F., & Duncan, M. J. (1994). The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets. In *Icarus* (Vol. 108, Issue 1, pp. 18–36). <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1039>
- Marchi, S., Delbo', M., Morbidelli, A., Paolicchi,

- P., & Lazzarin, M. (2009). Heating of near-Earth objects and meteoroids due to close approaches to the Sun. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400(1), 147–153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15459.x>
- Michel, P., & Thomas, F. (1996). The Kozai resonance for near-Earth asteroids with semimajor axes smaller than 2 AU. *Astronomy and Astrophysics*, 307(1), 310–318.
- Milani, A., Carpino, M., Hahn, G., & Nobili, A. M. (1989). Dynamics of planet-crossing asteroids: Classes of orbital behavior. Project SPACEGUARD. *Icarus*, 78(2), 212–269. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(89\)90174-7](https://doi.org/10.1016/0019-1035(89)90174-7)
- Morbidelli, A., Bottke, W. F., Froeschlé, C., & Michel, P. (2002). Origin and evolution of Near-Earth Objects. *Asteroids III*, 30, 409–422. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.362.6064&rep=rep1&type=pdf>
- Nugent, C. R., Margot, J. L., Chesley, S. R., & Vokrouhlick, D. (2012). Detection of semimajor axis drifts in 54 near-earth asteroids: New measurements of the Yarkovsky effect. *Astronomical Journal*, 144(2). <https://doi.org/10.1088/0004-6256/144/2/60>
- O'Brien, D. P. (2004). *THE COLLISIONAL AND DYNAMICAL EVOLUTION OF THE MAIN BELT, NEA AND TNO POPULATIONS*. https://pirlwww.lpl.arizona.edu/~obrien/PSI_WP/Dissertation/obriendissertation_small.pdf