



## Telaah Evolusi Orbit 42 Asteroid PHAs

Judhistira Aria Utama<sup>1\*</sup>, Waslaluddin<sup>1</sup>

Departemen Pendidikan Fisika, FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia  
\*j.aria.utama@upi.edu

### ABSTRAK

Selain empat kelas utama asteroid dekat-Bumi (ADB) yang dikenal saat ini, terdapat kelas lain yang disebut *potentially hazardous asteroids* (PHAs) dengan definisi tersendiri. Dengan statusnya tersebut, asteroid dalam kelas turunan ini perlu mendapat perhatian khusus karena berpotensi membahayakan Bumi pada masa depan. Dalam pekerjaan ini dilakukan simulasi numerik terhadap sampel *potentially hazardous asteroids* menurut kriteria tertentu untuk meninjau evolusi orbitalnya dalam kurun waktu  $10^6$  tahun ke depan. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa 9 dari 42 sampel asteroid terpilih mengalami eliminasi dari proses komputasi lebih lanjut. Dari 9 sampel asteroid yang tereliminasi, 2 diantaranya bertumbukan dengan Bumi, 2 terlempar keluar dari Tata Surya, sementara 5 lainnya berakhir dengan menumbuk Matahari (*Sun-grazing orbit*). Analisis terhadap sejarah evolusi orbital asteroid tersebut turut pula disajikan dalam makalah ini.

### ABSTRACT

Besides four main classes of Near-Earth Asteroids (NEAs) there is another class known as potentially hazardous asteroids (PHAs). Due to their orbital characteristic, asteroids in potentially hazardous category give special interest to astronomers because of their hazard for terrestrial planets especially the Earth. We did numerical simulation of potentially hazardous asteroids' samples to obtain orbital evolution up to  $10^6$  years. The numerical simulation results showed that 9 out of 42 samples were eliminated from computation due to collide with the Earth (2 samples), ejected from the Solar System (2 samples) and becoming Sun-grazer asteroids (5 samples). The analysis of orbital evolution history is also given in this paper.

© 2013 Jurusan Pendidikan Fisika FPMIPA UPI Bandung

**Kata kunci** : Asteroid Dekat-Bumi, Evolusi Orbit, Integrator Mercury, PHAs

### PENDAHULUAN

Objek dekat-Bumi (ODB) merupakan benda kecil Tata Surya berupa asteroid dan komet yang memiliki orbit sedemikian rupa sehingga dapat membawa mereka ke ruang dekat-Bumi. Karena mayoritas ODB berupa asteroid, maka dimunculkan istilah asteroid dekat-Bumi (ADB) yang terdiri atas empat kelas utama, yaitu Amor, Apollo, Aten, dan Atira (AAAA). Populasi ADB memberikan daya tarik tersendiri mengingat bahwa sebagiannya akan menjadi benda penumbuk planet-planet Terrestrial, termasuk Bumi.

Selain empat kelas utama ADB di atas, terdapat pula populasi kelas turunan yang disebut sebagai *potentially hazardous asteroids* (PHAs) yang saat ini diketahui berjumlah 1634 asteroid (data per 13 November 2015). Jumlah ini akan terus bertambah seiring keberhasilan survei langit berupa penemuan baru benda kecil di sekitar ruang dekat-Bumi. Nama kelas turunan ini tidak untuk memastikan bahwa akan terjadi tumbukan antara benda-benda kecil Tata Surya ini dengan Bumi, melainkan untuk menunjukkan potensi membahayakan Bumi pada masa depan berkaitan dengan karakteristik orbit yang dimilikinya.

Secara teknis kelompok asteroid yang memiliki *minimum orbit intersection distance* (MOID)  $\leq 0,05$  SA dengan Bumi (setara  $\sim 19,5x$  jarak rata-rata Bumi–Bulan; 1 SA didefinisikan sebagai jarak rata-rata Bumi–Matahari, yakni sebesar  $1,5 \times 10^{11}$  m) dan magnitudo mutlak  $H \leq 22$  (bersesuaian dengan diameter  $D \geq 110$  m) dikategorikan sebagai PHAs. Telaah dinamika orbit atas PHAs individual dapat dijumpai dalam literatur. Beberapa di antaranya adalah 101995 Benu (Wlodarczyk, 2014), 99942 Apophis (Bancelin et al., 2012), 4179 Toutatis (Siregar & Soegiartini, 2012), dan 1566 Icarus (Soegiartini et al., 2011).

Sesuai dengan definisi PHAs di atas, papasan dekat (*close encounter*) yang dialami asteroid dengan Bumi dapat membuat asteroid mengalami kehancuran akibat pengaruh gaya pasang-surut Bumi. Skenario lain yang mungkin terjadi seandainya pun asteroid selamat dari peristiwa katabolik tersebut adalah perubahan orbit secara signifikan. Perubahan menjadi benda langit dengan orbit yang baru ini perlu dicermati, apakah akan membuatnya menjadi terlempar menjauh dari ruang dekat–Bumi ataukah justru menjadi benda yang semakin berpotensi menjadi penumbuk Bumi pada masa depan. Karenanya, dengan mengetahui bilakah papasan dekat berikutnya terjadi (terutama papasan dekat yang dalam – *deep close encounter*) antara asteroid dengan Bumi, dapat dilakukan kampanye pengamatan terhadap benda yang bersangkutan guna memperoleh nilai-nilai elemen orbit yang baru pascapapasan dekatnya tersebut. Dari nilai elemen-elemen orbit yang baru ini selanjutnya dapat dilakukan rekonstruksi orbit baru asteroid.

Dalam pekerjaan yang dilakukan ini ingin diperoleh deskripsi umum perihal kondisi akhir PHAs dan mekanisme apakah yang berperan dalam menentukan kondisi akhir tersebut. Untuk mencapai tujuan di atas diterapkan metode numerik dalam memecahkan perhitungan dinamika orbit yang mengambil bentuk masalah N-benda dengan memandang sistem N-benda yang ditinjau sebagai sistem tertutup.

## METODE

Data awal populasi dan elemen orbit PHAs diperoleh dari laman NASA ([http://ssd.](http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi)

[jpl.nasa.gov/sbdb\\_query.cgi](http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi)) yang pada saat diakses memberikan total populasi sebanyak 1634 asteroid. Jumlah ini mengalami penyusutan melalui mekanisme penyeleksian berikut ini: 1) hanya meloloskan PHAs dengan informasi elemen orbit yang sudah diketahui dengan baik (*condition code* = 0) dan 2) terbatas hanya untuk PHAs yang memiliki  $D \geq 100$  m. Melalui seleksi di atas diperoleh 42 PHAs yang selanjutnya akan diikuti evolusi orbitnya hingga kurun waktu  $10^6$  tahun ke depan menggunakan paket integrator Mercury (Chambers, 1999). Prosedur mempersiapkan masukan untuk proses integrasi orbit mengikuti Utama et al. (2015).

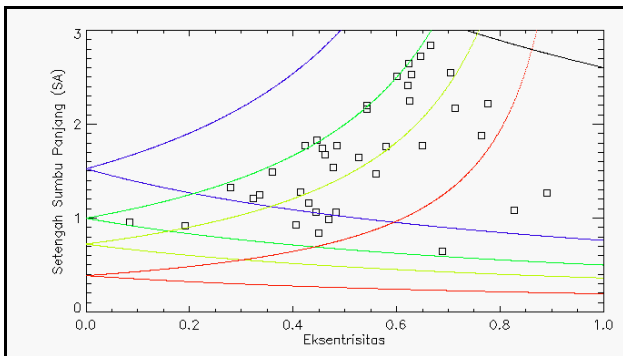
Integrasi orbit yang dilakukan mengimplementasikan algoritma Bulirsch–Stoer (BS) umum dengan pengaturan langkah waktu (*time step*) perhitungan 1/1000 tahun yang dicuplik setiap 100 tahun. Dalam perhitungan orbit PHAs disertakan pula gangguan dari benda-benda masif lain di Tata Surya, yaitu planet-planet (Merkurius hingga Neptunus) dan Bulan yang diperlakukan sebagai benda mandiri. Untuk mempercepat waktu komputasi, PHAs yang orbitnya mengalami evolusi hingga mencapai nilai setengah sumbu panjang orbit  $a > 100$  SA tidak lagi disertakan dalam proses komputasi lebih lanjut. Terdapat empat skenario pada akhir integrasi orbit, yaitu: PHAs berevolusi menjadi asteroid penumbuk Matahari (*Sun-grazer*), menjadi penumbuk planet Terrestrial (termasuk Bumi), terlempar keluar dari Tata Surya, atau tetap berada dalam orbit mengitari Matahari.

Dalam pekerjaan ini efek relativistik dan efek termal (efek Yarkovsky) tidak diperhitungkan. Dari 42 sampel PHAs hanya terdapat 3 asteroid (3200 Phaethon, 1566 Icarus, dan 1999 KW4) yang memiliki jarak perihelion (jarak terdekat ke Matahari)  $<$  jarak perihelion planet Merkurius ( $q_{\text{Merkurius}} = 0,308$  SA); kondisi yang memicu terjadinya presesi jarak perihelion sebagai akibat efek relativitas umum. Dengan kata lain, mayoritas sampel mengorbit Matahari dengan nilai  $q > q_{\text{Merkurius}}$ . Sementara, tidak disertakannya efek Yarkovsky, yang justru diyakini berperan dalam membuat asteroid dengan  $D \leq 10$  km mengalami insut (*shift*) ke arah menjauh atau mendekati Matahari, adalah karena pengaruhnya yang minor terhadap asteroid dengan  $q < 1,3$  SA (Greenstreet et al., 2012).

Seluruh sampel PHAs diketahui memiliki  $q$  dalam rentang nilai  $0,14 \text{ SA} \leq q \leq 1,02 \text{ SA}$ .

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Proses integrasi orbit hingga kurun waktu  $10^6$  tahun ke depan sejak waktu  $t_0$  (epoch JD2457000,5 yang bersesuaian dengan 9 Desember 2014 pukul 00:00 UT) berakhir dengan tereliminasi 9 PHAs dari proses komputasi. Mayoritas PHAs yang tereliminasi (5 sampel) berakhir dengan menjadi asteroid penumbuk Matahari (*Sun-grazer*), selebihnya sebagai penumbuk Bumi (2 sampel), dan sisanya terlempar ke luar Tata Surya (2 sampel). Pada kondisi awal, seluruh sampel PHAs merupakan asteroid pelintas orbit seluruh planet–dalam (*inner planets*; Merkurius hingga Mars) sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1, yang mengindikasikan bahwa seluruh sampel PHAs berasal dari asteroid-asteroid di Sabuk Utama ( $2,0 \text{ SA} \leq a \leq 3,3 \text{ SA}$ ) alih-alih dari sumber di luar orbit planet Jupiter. Mayoritas merupakan pelintas orbit Bumi (*Earth-crosser*) dalam orbit yang eksentrik ( $e > 0,2$ ).



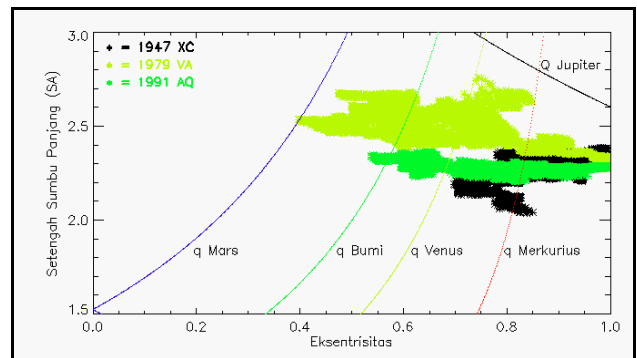
**Gambar 1.** Distribusi orbit 42 sampel PHAs dalam bidang  $a$  (setengah sumbu panjang)– $e$  (eksentrisitas). Kurva-kurva berwarna menyatakan batas daerah pelintas orbit planet, bersesuaian dengan perihelion  $q$  (kurva atas) dan aphelion  $Q$  (kurva bawah) masing-masing planet–dalam. Warna merah: Merkurius; kuning: Venus; hijau: Bumi; biru: Mars; dan hitam (terlihat sebagian): Jupiter.

Ulasan untuk masing-masing kelompok yang tereliminasi dari proses komputasi disajikan berikut ini.

**Penumbuk Matahari**

Kelima asteroid PHAs yang berakhir sebagai penumbuk Matahari adalah 1947 XC ( $a_{1947 \text{ XC}} = 2,17 \text{ SA}$ ), 1979 VA ( $a_{1979 \text{ VA}} = 2,64$

SA), 1998 ML14 ( $a_{1998 \text{ ML14}} = 2,41 \text{ SA}$ ), 1991 AQ ( $a_{1991 \text{ AQ}} = 2,22 \text{ SA}$ ), dan 1990 HA ( $a_{1990 \text{ HA}} = 2,55 \text{ SA}$ ). Meskipun seluruhnya merupakan asteroid penghuni wilayah–dalam (*inner main belt*) dan tengah (*central main belt*) dari kawasan Sabuk Utama, peristiwa papasan dekat terakhir yang dialami kelima asteroid tersebut sebelum menjadi penumbuk Matahari melibatkan planet yang berbeda. Untuk asteroid 1947 XC, 1998 ML14, dan 1990 HA peristiwa papasan dekat terakhirnya melibatkan planet Jupiter, sementara untuk asteroid 1991 AQ dan 1979 VA secara berturut-turut melibatkan planet Bumi dan Venus. Jelajah orbit selama kala dinamikanya untuk asteroid yang mengalami papasan dekat terakhir dengan planet Jupiter dan planet-planet Terrestrial diperlihatkan dalam Gambar 2.



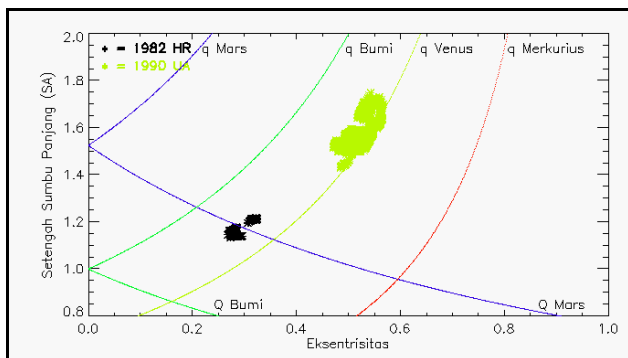
**Gambar 2.** Jelajah orbit sampel PHAs penumbuk Matahari selama kala dinamikanya dalam bidang  $a$  (setengah sumbu panjang)– $e$  (eksentrisitas). Kurva-kurva berwarna yang menandai jarak perihelion planet-planet Terrestrial dan jarak aphelion planet Jupiter turut diperlihatkan.

Ketiga sampel PHAs penumbuk Matahari dalam Gambar 2 memiliki posisi awal yang berada dekat dengan lokasi resonansi gerak merata dengan planet-planet; 1947 XC dengan resonansi 4:1 di  $a \approx 2,06 \text{ SA}$  (berasosiasi dengan planet Jupiter), 1991 AQ dengan resonansi 7:2 di  $a \approx 2,26 \text{ SA}$  (berasosiasi dengan planet Jupiter) dan resonansi 2:7 di  $a \approx 2,31 \text{ SA}$  (berasosiasi dengan planet Bumi), serta 1979 VA dengan resonansi 3:1  $a \approx 2,50 \text{ SA}$  (berasosiasi dengan planet Jupiter). Kedua asteroid lainnya (1998 ML14,  $a = 2,41 \text{ SA}$  dan 1990 HA,  $a = 2,55 \text{ SA}$ ) juga berada tidak jauh dari lokasi resonansi 3:1 di atas. Salah satu efek resonansi adalah menghadirkan gangguan

berulang yang dapat mempengaruhi nilai eksentrisitas  $e$  atau inklinasi  $i$  orbit asteroid. Pada akhir kala dinamikanya, ketiga asteroid di atas memiliki orbit yang sangat eksentrik yang membuat  $q$  bernilai lebih kecil daripada radius Matahari sehingga berakhir dengan menumbuk benda sentral ini. Pada akhir kala dinamikanya seluruh PHAs penumbuk Matahari juga mengalami peningkatan inklinasi ( $i > 20^\circ$ ) setelah papasan dekat terakhirnya dengan planet Jupiter, Bumi, dan Venus.

### Penumbuk Bumi

Dua asteroid PHAs yang berakhir sebagai penumbuk Bumi adalah 1982 HR ( $a_{1982 \text{ HR}} = 1,21 \text{ SA}$ ) dan 1990 UA ( $a_{1990 \text{ UA}} = 1,64 \text{ SA}$ ). Kedua asteroid berada di luar kawasan Sabuk Utama. Berdasarkan jelajah orbitnya, kedua PHAs ini merupakan asteroid pelintas orbit Bumi. Secara bersamaan, 1990 UA juga menjadi pelintas orbit Mars (*Mars-crosser*) dan senantiasa berada di sekitar jarak perihelion planet Venus. Berlawanan dengan 1990 UA, asteroid 1982 HR dengan jangkauan jelajah orbit yang lebih sempit selalu berada tidak jauh dari jarak aphelion planet Mars. Hal ini ditunjukkan dalam Gambar 3.

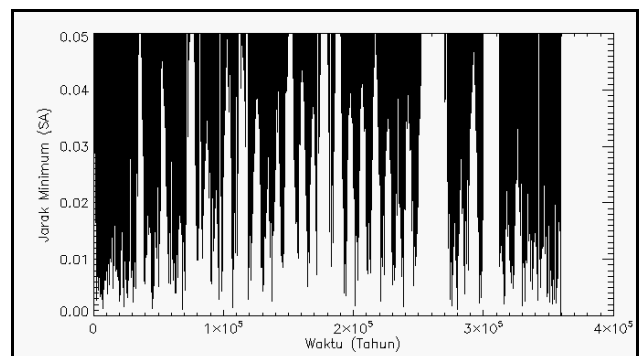


**Gambar 3.** Jelajah orbit sampel PHAs penumbuk Bumi selama kala dinamikanya dalam bidang  $a$  (setengah sumbu panjang)– $e$  (eksentrisitas). Kurva-kurva berwarna yang menandai jarak perihelion dan aphelion planet-planet Terestrial turut diperlihatkan.

Relatif terhadap orbit 1982 HR, orbit 1990 UA lebih eksentrik ( $e = 0,5$ ) dan lebih dekat dengan ekliptika ( $i = 0,9^\circ$ ). Posisi awal 1990 UA juga berdekatan dengan lokasi resonansi gerak merata dengan planet Bumi, yaitu resonansi 1:2 di  $a \approx 1,59 \text{ SA}$ . Dekatnya posisi awal 1990 UA dengan lokasi resonansi 1:2 membuat orbit asteroid ini relatif lebih

kaotik daripada 1982 HR, yang diindikasikan oleh luasnya jelajah orbit asteroid ini meskipun kala dinamik 1990 UA  $\sim 3,5x$  lebih panjang daripada 1982 HR.

Selama kala dinamikanya, kedua asteroid ini sering mengalami papasan dekat dengan planet Venus, Bumi, Bulan, dan Mars. Frekuensi tertinggi papasan dekat yang dialami 1982 HR dan 1990 UA terjadi dengan planet Bumi, yaitu masing-masing sebanyak 12.613x dan 24.752x. Catatan peristiwa papasan dekat antara 1990 UA dengan Bumi sepanjang kala dinamikanya ditunjukkan dalam Gambar 4. Asteroid ini bahkan terlihat cukup sering berada di jarak  $< 0,01 \text{ SA}$  ( $\sim 4x$  jarak rata-rata Bumi–Bulan) dari Bumi. Papasan dekat terakhir yang dialaminya pada waktu  $\sim 360.000$  tahun sejak waktu  $t_0$  membawa asteroid ini di jarak hanya  $\sim 5400 \text{ km}$ ! Kurang dari radius rata-rata Bumi sebesar 6370 km, yang membuatnya berakhir sebagai benda penumbuk Bumi.

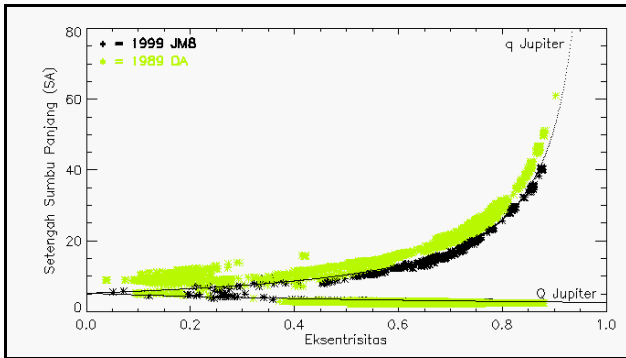


**Gambar 4.** Papasan dekat sepanjang kala dinamik di jarak  $< 0,05 \text{ SA}$  antara asteroid 1990 UA dan Bumi yang membuat asteroid ini dikategorikan sebagai kelas PHAs.

### Terlempar Keluar Tata Surya

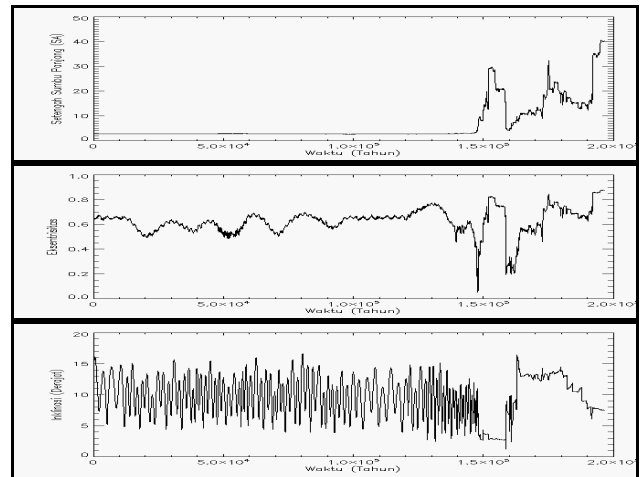
Skenario lain yang dialami oleh PHAs yang tereliminasi dari komputasi lebih lanjut adalah mencapai orbit di jarak rata-rata dari Matahari  $> 100 \text{ SA}$ , yang membuatnya secara otomatis dianggap keluar dari Tata Surya. Kedua sampel PHAs yang mengalami hal ini adalah 1999 JM8 ( $a_{1999 \text{ JM8}} = 2,72 \text{ SA}$ ) dan 1989 DA ( $a_{1989 \text{ DA}} = 2,16 \text{ SA}$ ). Jelajah orbit kedua asteroid ini selama kala dinamikanya ditunjukkan dalam Gambar 5. Dari Gambar 5 terlihat bahwa asteroid 1999 JM8 menghabiskan seluruh hidupnya dalam daerah pelintas planet Jupiter; senantiasa berada di dekat jarak perihelion dan aphelion planet ini. Kondisi yang hampir sama terjadi

pula untuk asteroid 1989 DA, meskipun lebih banyak menghabiskan kala hidupnya sedikit di luar daerah pelintas orbit Jupiter. Asteroid-asteroid pelintas orbit Jupiter (*Jupiter-crosser*) seringkali dilemparkan keluar dari Tata Surya (Nolan, 1994).

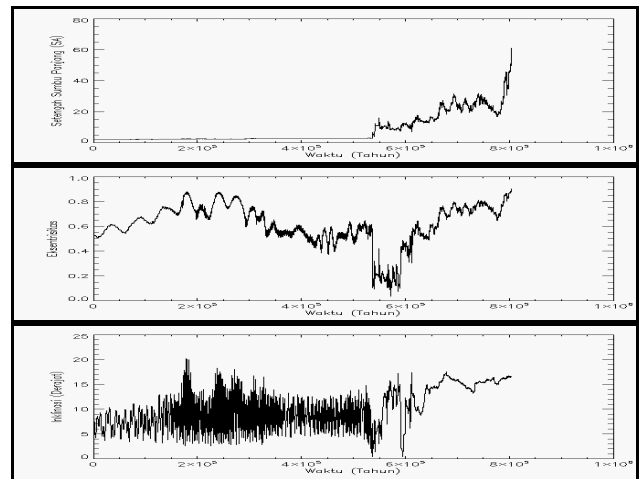


**Gambar 5.** Jelajah orbit sampel PHAs yang berakhir dengan terlempar keluar Tata Surya selama kala dinamikanya dalam bidang  $a$  (setengah sumbu panjang)– $e$  (eksentrisitas). Kurva yang menandai jarak perihelion dan aphelion planet Jupiter turut diperlihatkan.

Kedua PHAs ini memiliki sejarah evolusi yang mirip, yaitu keduanya mengalami evolusi orbit yang tenang dalam kurun waktu 150.000 tahun (untuk 1999 JM8) dan 540.000 tahun (untuk 1989 DA) sejak waktu  $t_0$ . Pada masing-masing rentang waktu di atas, kedua asteroid memiliki setengah sumbu panjang yang relatif konstan, sementara eksentrisitas dan inklinasi mengalami osilasi secara moderat. Hal ini ditunjukkan dalam Gambar 6 dan Gambar 7. Selama kurun waktu evolusi yang tenang tersebut, 1999 JM8 terjebak dalam resonansi 8:3 dengan planet Jupiter di  $a \approx 2,70$  SA, sebelum pertemuan dekatnya dengan planet ini di jarak 0,17 SA pada  $t \sim 149.800$  tahun sejak waktu  $t_0$  membuat asteroid mengalami lompatan orbit ke  $a \approx 12$  SA. Sementara itu kondisi resonansi 11:35 dengan planet Bumi di  $a \approx 2,16$  SA dialami oleh asteroid 1989 DA. Lompatan orbit ke  $a \approx 11$  SA terjadi setelah papasan dekatnya dengan planet Saturnus pada  $t = 541.700$  tahun sejak  $t_0$  hingga jarak sedekat 0,06 SA. Seluruh asteroid yang mengakhiri kala hidupnya dengan terlempar keluar dari Tata Surya, mengalami papasan dekat terakhirnya dengan planet Jupiter.



**Gambar 6.** Evolusi  $(a,e,i)$  asteroid 1999 JM8 sebagai fungsi waktu.



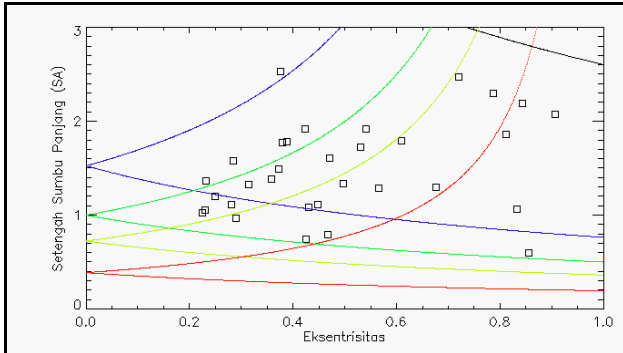
**Gambar 7.** Evolusi  $(a,e,i)$  asteroid 1989 DA sebagai fungsi waktu.

Selain ketiga kelompok yang dieliminasi di atas, mayoritas sampel PHAs masih berada dalam orbitnya hingga akhir integrasi. Gambar 8 memperlihatkan distribusi orbit sampel PHAs yang masih bertahan. Kondisi akhir ini terlihat relatif tidak jauh berbeda dengan yang ditunjukkan dalam Gambar 1, di mana seluruh sampel yang masih tersisa tetap merupakan asteroid pelintas orbit seluruh planet–dalam, selain bahwa jumlah sampel dengan orbit sangat eksentrik ( $e \geq 0,8$ ) bertambah pada akhir integrasi orbit.

Sebanyak 16 asteroid dari seluruh sampel PHAs yang bertahan hingga akhir integrasi diketahui memiliki inklinasi akhir yang tinggi ( $i > 10^\circ$ ). Jumlah ini relatif tidak berbeda dengan kondisi pada awal komputasi di mana terdapat 13 asteroid yang memiliki  $i > 10^\circ$ . Dari sembilan asteroid yang tereliminasi, hanya 1 sampel (1999 JM8) yang memiliki  $i > 10^\circ$ , yaitu sebesar  $13,9^\circ$ .

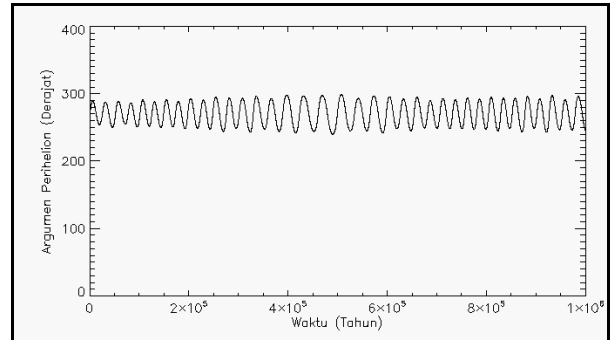


Kedelapan asteroid lainnya memiliki inklinasi dalam rentang  $0,9^\circ - 6,5^\circ$ . Terdapat kecenderungan bahwa sampel PHAs dengan inklinasi tinggi memiliki kala dinamik yang lebih panjang.



**Gambar 8.** Distribusi orbit sampel PHAs yang bertahan selama proses integrasi sepanjang  $10^6$  tahun. Penjelasan kurva-kurva berwarna sama dengan yang terdapat dalam Gambar 1.

Kestabilan orbit benda kecil di Tata Surya dapat dikaitkan dengan keberadaan resonansi sekuler yang dikenal sebagai resonansi Kozai (Michel & Thomas, 1996; Michel, 1998) di lokasi benda kecil tersebut berada. Resonansi Kozai dikenali dari pertukaran periodik antara eksentrisitas dan inklinasi yang mengakibatkan terjadinya librasi argumen perihelion  $\omega$  di sekitar  $90^\circ$  atau  $270^\circ$ . Efek penting dari resonansi ini adalah membuat orbit yang pada awalnya memiliki eksentrisitas kecil dapat menjadi sangat eksentrik. Dari 33 PHAs yang bertahan hingga akhir integrasi, resonansi Kozai terjadi di asteroid 1973 EA ( $a = 1,76$  SA) sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 9. Terlihat bahwa 1973 EA terjebak dalam resonansi ini sepanjang waktu integrasi ( $10^6$  tahun), yang membatasi nilai maksimal eksentrisitas dan inklinasi yang dapat dimiliki berturut-turut sebesar  $0,7^\circ$  dan  $55^\circ$ . Mengingat eksentrisitas orbit awal asteroid ini tergolong besar ( $e = 0,65$ ), peran proteksi resonansi Kozai terhadap papasan dekat dengan planet Terrestrial menjadi kurang efisien. Akibatnya papasan dekat dengan Bumi dan Mars kerap terjadi. Meskipun demikian, dengan tingginya nilai sudut inklinasi yang berakibat pada besarnya kecepatan relatif antara asteroid dan planet pada saat papasan dekat, maka hanya perubahan minor yang mungkin terjadi pada orbit asteroid ini.



**Gambar 9.** Evolusi argumen perihelion asteroid 1973 EA selama proses integrasi sepanjang  $10^6$  tahun.

## PENUTUP

Pada akhir integrasi, diperoleh mayoritas sampel PHAs berakhir sebagai penumbuk Matahari karena mengalami pemompaan (*pumping*) eksentrisitas dan inklinasi melalui mekanisme resonansi gerak merata yang kuat dengan planet Jupiter. Di sisi lain, resonansi gerak merata yang dialami asteroid dengan Bumi membuat orbit menjadi kaotik, seperti yang terjadi pada asteroid 1990 UA. Seringnya peristiwa papasan dekat dengan planet Bumi mendominasi terjadinya perubahan orbit yang berakhir dengan menumbuk Bumi. Untuk memperoleh probabilitas sampel PHAs yang menumbuk Bumi, disarankan untuk membangkitkan sekumpulan asteroid virtual dengan elemen-elemen orbit hasil variasi dari nilai nominalnya. Bersesuaian dengan hasil penelitian terdahulu, semua sampel PHAs yang berakhir dengan kondisi terlempar keluar Tata Surya merupakan asteroid pelintas orbit Jupiter atau berada di dekat batas daerah pelintas orbit planet ini. Selain itu, sampel PHAs dengan inklinasi yang tinggi ( $i > 10^\circ$ ) cenderung memiliki kala dinamik yang lebih panjang.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bancelin, D., Colas, F., Thuillot, W., Hestroffer, D., dan Assafin, M. "Asteroid (99942) Apophis: new predictions of Earth encounters for this potentially hazardous asteroid". *Astronomy & Astrophysics*. 2012, Vol. 544, A15, 1–5.
- Chambers, J.E. "A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies".

- Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1999, Vol. 304, 793–799.
- Greenstreet, S., Ngo, H., dan Gladman, B. “The orbital distribution of near-Earth objects inside Earth’s orbit”. *Icarus*. 2012, Vol. 217, 355–366.
- Michel, P., dan Thomas, F. “The Kozai Resonance for Near-Earth Asteroids with Semimajor Axes Smaller than 2 AU”. *Astron. Astrophys.* 1996, Vol. 307, 310–318.
- Michel, P. “Dynamical Behaviour of Near-Earth Asteroids in the Terrestrial Planet Region: The role of secular resonances”. *Planet. Space Sci.* 1998, Vol.46, No.8, 905–910.
- Nolan, M.C. 1994. “*Delivery of Meteorites from the Asteroid Belt*”. Disertasi Doktorat pada Department of Planetary Sciences, University of Arizona.
- Siregar, S. dan Soegiartini, E. “Orbital Evolution of 4179 Toutatis”. *Proceeding of the 4th Southeast Asia Astronomy Network Meeting*, Bandung 10–11 October 2012, Editor: D. Herdiwijaya. 26–30.
- Soegiartini, E., Radiman, I., dan Siregar, S. “Efek Relativitas Umum pada Evolusi Orbit Asteroid 1566 Icarus”. *Prosiding Seminar Himpunan Astronomi Indonesia*, Bandung 27 Oktober 2011, Editor: B. Dermawan dkk. 95–98.
- Utama, J.A., Dermawan, B., Hidayat, T., dan Fauzi, U. “Dinamika Orbit Asteroid 2012 DA14 Pascapapasan Dekat dengan Bumi”. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 2015, Vol. 16, No. 1, 1–5.
- Włodarczyk, I. “The Potentially Dangerous Asteroid (101955) Benu”. *Physics Research International*. 2014, 1–13.