

## Resonansi Kozai Asteroid Dekat-Bumi pada Orbit Komet

I. F. Imaniah<sup>1\*</sup> dan B. Dermawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Astronomi, FMIPA – ITB, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>KK Astronomi, FMIPA – ITB, Bandung, Indonesia

\*E-mail: if.imaniah@gmail.com

### ABSTRAK

Dinamika orbit benda-kecil yang terletak pada daerah dekat-Bumi (berjarak perihelion kurang dari 1.3 AU) tidak bisa dilepaskan dari gangguan planet Kebumian dan Jupiter. Dalam evolusinya dari Sabuk-Utama, asteroid dapat berada dalam keadaan resonansi Kozai (Morbidelli et al., 2002). Obyek asteroid yang terletak pada orbit komet (*Asteroids in Cometary Orbits*, ACOs) merupakan orbit obyek yang secara dinamika tidaklah stabil (Licandro & Alvarez-Candal, 2006). Dalam pekerjaan ini akan disampaikan hasil integrasi numerik evolusi orbit ACOs sepanjang 100 ribu tahun untuk mengetahui lokasi distribusi obyek yang berada pada keadaan resonansi Kozai. Terdapat 552 obyek ACOs dekat-Bumi yang berada pada nilai parameter Tisserand kurang dari 3.02, yang 45 obyek di antaranya mengalami resonansi Kozai yang terletak pada nilai setengah sumbu-panjang 2.1 hingga 4.3 AU.

**Kata Kunci:** Asteroid pada orbit komet (ACOs) – Resonansi Kozai

### 1 PENDAHULUAN

Komet dan asteroid merupakan benda kecil yang berbeda baik ditinjau secara fisis maupun orbital. Dari segi fisis, pada komet terdapat aktivitas kometari (menguapnya material es yang membuatnya tampak berpendar ketika mendekati Matahari) di permukaannya, sedangkan pada asteroid tidak terdapat aktivitas tersebut. Dari segi orbital, Kresák (1979) mendefinisikan orbit komet dan asteroid melalui parameter Tisserand yang didefinisikan melalui persamaan (1) berikut ini:

$$T_J = a_J / a + 2\sqrt{(1-e^2)a/a_J} \cos(i), \quad (1)$$

dengan  $a$  dan  $a_J$  secara berturut-turut merupakan nilai setengah sumbu-panjang benda kecil dan Jupiter, sedangkan  $e$  dan  $i$  merupakan eksentrisitas dan inklinasi orbit benda kecil. Nilai inklinasi dihitung dengan mengacu kepada bidang orbit Jupiter. Orbit komet memiliki nilai  $T_J < 3$ , sedangkan asteroid memiliki  $T_J > 3$ . Obyek yang berada pada  $T_J < 3$  dan tidak menampakkan aktivitas kometari di permukaannya didefinisikan sebagai asteroid yang berada pada orbit komet (*Asteroids in Cometary Orbits*, ACOs).

Dinamika populasi asteroid yang terletak di daerah dekat-Bumi sangat dipengaruhi oleh resonansi *mean-motion* yang disebabkan pengaruh gravitasi planet Kebumian dan Jupiter. Akibatnya, terjadi migrasi orbit asteroid ke bagian dalam/terlontar jauh ke tepian luar Tata Surya dalam kurun waktu sekurangnya ratusan ribu bahkan mencapai jutaan tahun, atau asteroid terperangkap dalam keadaan resonansi Kozai (Morbidelli et al., 2002).

Kozai (1962) menjelaskan bahwa terdapat resonansi yang disebabkan oleh pengaruh gravitasi Jupiter pada asteroid Sabuk-Utama dengan inklinasi  $i \geq 60^\circ$ . Hal ini dicirikan dengan nilai argumen perihelion,  $\omega$ , berlibrasi di sekitar  $90^\circ$  atau  $270^\circ$ . Pada saat yang sama terjadi osilasi berlawanan pada  $e$  dan  $i$ ; nilai  $e$  minimum jika nilai  $i$  maksimum, dan sebaliknya. Resonansi Kozai ini didefinisikan melalui persamaan (2):

$$H_{Kozai} = \cos(i) \sqrt{a(1-e^2)}, \quad (2)$$

dengan  $H_{Kozai}$  merupakan tetapan Kozai. Michel dan Thomas (1996) menemukan bahwa pada asteroid dekat-Bumi dengan nilai  $a < 2$  AU resonansi (Seperti-Kozai) dapat terjadi pada  $\omega$  yang berlibrasi di nilai  $0^\circ$  atau  $180^\circ$  dengan nilai inklinasi yang rendah.

Pekerjaan ini akan memeriksa dinamika orbit obyek ACOs, dalam hal ini resonansi Kozai, di dekat-Bumi pada  $T_J < 3.02$  (Licandro et al., 2008) melalui integrasi numerik selama 100 ribu tahun ke depan. Pada Bagian 2 akan disampaikan metode perhitungan yang dipakai, Bagian 3 memaparkan hasil perhitungan dan analisis, dan Bagian 4 adalah kesimpulan.

### 2 DATA DAN METODE PERHITUNGAN

Dengan menggunakan kriteria di atas diperoleh data posisi awal 552 obyek ACOs pada epoch MJD 55400 dari situs layanan penyedia data elemen orbit *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) NASA *Small Body Search Engine* melalui <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdquery.cgi>.

Terdapat sebagian kecil obyek ACOs yang memiliki MJD selain 55400. Untuk itu diperlukan penyamaan epoch dengan menggunakan paket



program siap pakai Mercury (Chambers, 1999). Proses penyamaan epoch mengacu pada skema perhitungan penyamaan epoch yang dilakukan oleh JPL NASA. Elemen orbit semua planet (termasuk Bulan), Ceres, Vesta, dan Pallas diambil pada epoch MJD 55400. Setelah obyek memiliki nilai epoch yang sama, maka proses integrasi orbit secara serentak bisa dilaksanakan.

Posisi dan kecepatan benda pada rentang waktu tertentu, untuk sistem yang melibatkan banyak benda, bisa diketahui melalui pendekatan *N-body problem*. Solusi yang digunakan berupa aproksimasi numerik persamaan (3), yaitu persamaan gerak gravitasi Newtonian:

$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -G \sum_{l=1}^N \frac{m_l (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l)}{|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l|^3}, \quad k, l = 1, \dots, N, \quad (3)$$

dengan  $G$  merupakan konstanta gravitasi,  $m$  adalah massa *main body*,  $\mathbf{x}$  adalah vektor posisi benda kecil, sedangkan  $k$  dan  $l$  merupakan indeks benda dalam sistem. Posisi dan kecepatan benda diperoleh dari persamaan tersebut, yang selanjutnya ditransformasikan kembali ke dalam elemen orbit untuk setiap step integrasi.

Asumsi yang digunakan yaitu asteroid dianggap sebagai benda *massless*, interaksi gravitasi yang terjadi adalah antara Matahari dengan planet, Matahari dengan asteroid, Planet dengan Planet/Bulan, dan Planet/Bulan dengan asteroid. Sepanjang integrasi 100 ribu tahun tidak diperhitungkan efek termal dan relativitas. Step integrasi diambil  $10^3$  tahun dengan hasil perhitungan dicuplik per satu tahun.

Integrasi numerik ACOs menggunakan perangkat lunak *Swift* (Levison & Duncan, 1994). Proses integrasi tidak dilanjutkan jika asteroid terlontar ke luar Tata Surya (berjarak lebih dari 100 AU), menumbuk planet (berada dalam pengaruh gravitasi planet), atau berada pada jarak yang terlalu dekat dengan Matahari (berjarak kurang dari  $4.68 \times 10^{-3}$  AU).

### 3 HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISIS

Pada bagian ini hasil perhitungan dan analisis dibagi ke dalam tiga sub bagian:

#### 3.1 Resonansi Kozai

Selama 100 ribu tahun integrasi terdapat 45 obyek ACOs yang berada dalam keadaan resonansi Kozai pada berbagai rentang nilai  $i$  dengan rincian:

22 obyek berlibrasi pada  $\omega$  sekitar  $90^\circ$  dan 23 obyek berlibrasi pada  $\omega$  sekitar  $270^\circ$ .

Variasi nilai  $i$  tidak terjadi hanya pada inklinasi besar sebagaimana yang diperoleh Kozai (1962) namun bisa terjadi pula pada nilai  $i$  rendah, misalnya asteroid 2007 KN<sub>4</sub> yang memiliki nilai  $a \sim 3.34$  AU, berlibrasi pada  $\omega \sim 90^\circ$  dengan variasi  $i$  antara 9 hingga 34 derajat. Hal ini mengkonfirmasi hasil yang diperoleh Gronchi dan Milani (1999) bahwa resonansi Kozai bisa terjadi pada sembarang nilai inklinasi, dan sejalan dengan hasil yang diperoleh Michel (1998) yang menyatakan bahwa resonansi Kozai untuk asteroid dengan nilai  $a < 2$  AU dapat terjadi pada nilai  $i$  rendah ( $< 20^\circ$ ).

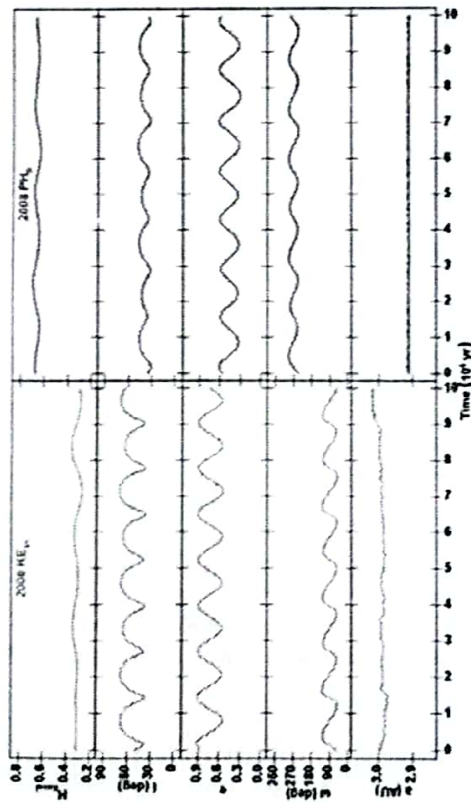
Resonansi Kozai ini merentang pada nilai  $\sim 2.1 < a$  (AU)  $< \sim 4.3$  dengan batas bawah nilai  $a$  untuk librasi pada dua nilai  $\omega$  yang berbeda berada pada  $\sim 2.1$  AU. Obyek yang berlibrasi pada  $\omega$  sekitar  $90^\circ$  memiliki batas atas  $a \sim 3.4$  AU, sedangkan untuk  $\omega$  yang berlibrasi di sekitar  $270^\circ$  memiliki batas atas  $a \sim 4.3$  AU. Penyebab dari perbedaan sebaran nilai  $a$  untuk librasi pada dua nilai  $\omega$  tersebut belum dapat diketahui. Menurut Gronchi dan Milani (1999) kedua jenis librasi ini diyakini berasal dari dominasi gravitasi planet Kebumihan pada obyek ACOs yang ditinjau, bukan dari Jupiter. Sampel evolusi orbit obyek yang mengalami resonansi Kozai pada  $\omega$  yang berlibrasi pada  $90^\circ$  dan  $270^\circ$  diberikan pada Gambar 1, yaitu plot sumbu mendatar berupa waktu integrasi selama 100 ribu tahun terhadap, secara berturut-turut, nilai  $a$  (AU),  $\omega$  ( $^\circ$ ),  $e$ ,  $i$  ( $^\circ$ ), dan  $H_{Kozai}$  (keterangan yang sama untuk Gambar 2 dan 3).

#### 3.2 Resonansi Kozai Temporal

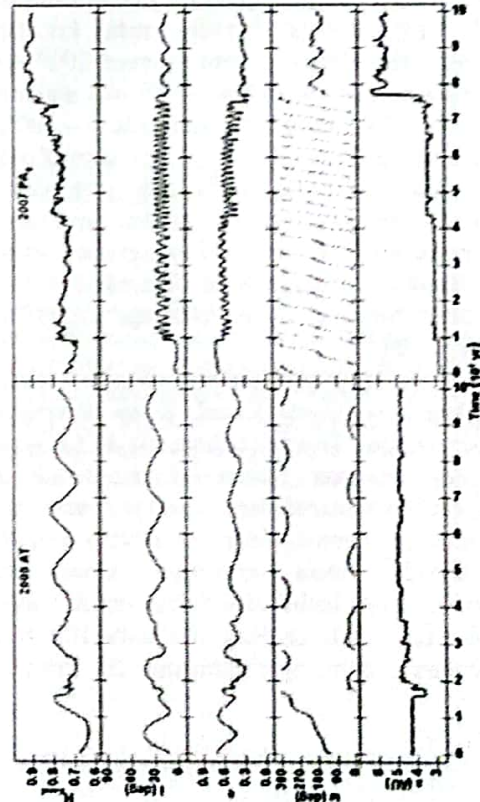
Terdapat obyek yang awalnya berada pada keadaan resonansi Kozai namun kemudian beralih ke bentuk dinamika orbit lain, atau sebaliknya. Pada Tabel 1 terdapat 16 obyek ACOs yang mengalami resonansi Kozai secara temporal baik di awal, tengah, atau akhir integrasi. Pada tabel tersebut sebagian besar resonansi Kozai temporal ini terjadi pada nilai  $a \sim 3.3$  AU yang merupakan batas luar asteroid Sabuk-Utama, yaitu lokasi resonansi *mean-motion* 2:1 Jupiter yang berimpit dengan 5:1 Saturnus. Hal ini mengindikasikan adanya kaitan resonansi *mean-motion* dengan terjadinya resonansi Kozai temporal.

Hal yang sama ditemukan pada asteroid dengan  $a \sim 2.1$ ,  $\sim 2.5$ ,  $\sim 2.9$ , dan  $\sim 4.1$  AU yang berlokasi dekat dengan lokasi resonansi *mean-motion* 4:1, 3:1, 5:2, dan 7:5 dengan Jupiter. Adanya resonansi *mean-motion* mengakibatkan gangguan pada kestabilan resonansi Kozai yang dialami

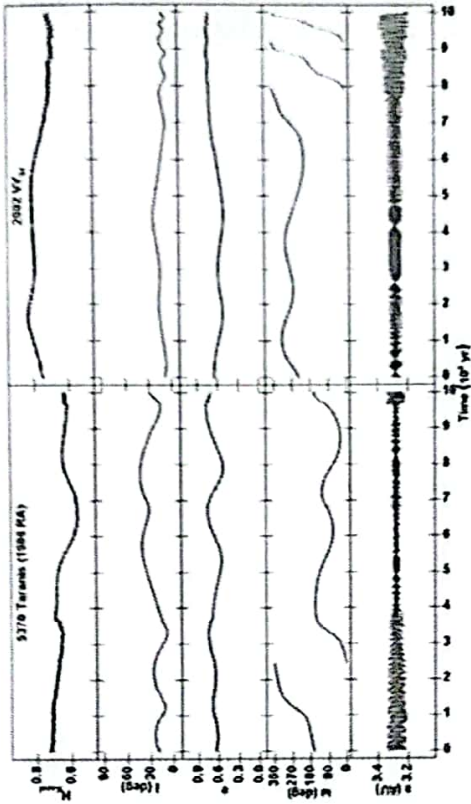




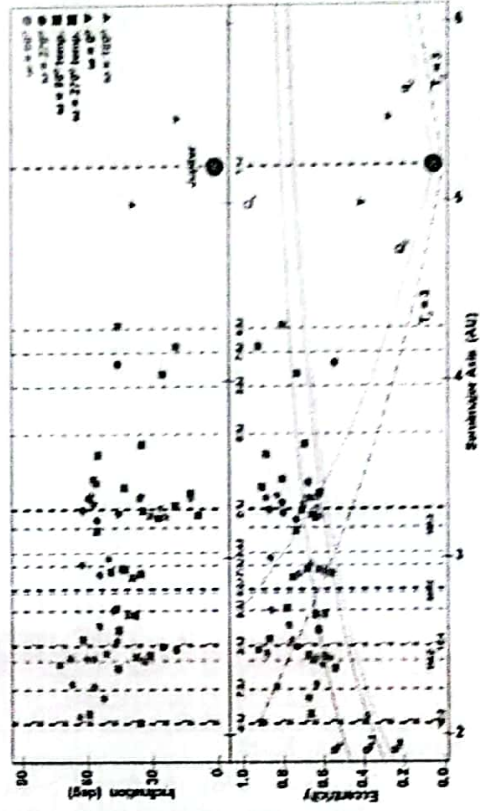
Gambar 1. Sampel asteroid yang beresonansi Kozai dengan libration  $\omega$  pada  $90^\circ$  (kiri, asteroid 2000 KE<sub>11</sub>) dan  $\omega$  pada  $270^\circ$  (kanan, asteroid 2008 PH<sub>3</sub>).



Gambar 3. Sampel asteroid yang beresonansi Seperti-Kozai dengan libration  $\omega$  pada  $0^\circ$  (kiri, asteroid 2009 AT) dan  $\omega$  pada  $180^\circ$  (kanan, asteroid 2007 PA<sub>8</sub>).



Gambar 2. Sampel asteroid yang beresonansi Kozai temporal dengan libration  $\omega$  pada  $90^\circ$  (kiri, asteroid 1986 RA) dan  $\omega$  pada  $270^\circ$  (kanan, asteroid 2002 VY<sub>94</sub>).



Gambar 4. Lokasi sebaran ACOs yang beresonansi Kozai sepanjang integrasi temporal, dan Seperti-Kozai. Penjelasan disampaikan pada teks.



**Tabel 1.** Daftar obyek yang berada pada keadaan resonansi Kozai temporal dengan nilai  $\omega$  berlibrasi pada  $90^\circ$  (kiri) dan  $270^\circ$  (kanan) untuk waktu integrasi 100 ribu tahun.

Asteroid	$a$ (AU)	Waktu (tahun)	Asteroid	$a$ (AU)	Waktu (tahun)
2002 XO <sub>40</sub>	2.48	50000-70000	2002 VY <sub>94</sub>	3.24	<50000
2009 XE <sub>11</sub>	3.31	60000-90000	2010 DH <sub>77</sub>	3.27	<50000
2007 RV <sub>19</sub>	3.26	>20000	2004 RU <sub>164</sub>	3.37	25000-60000
5370 Taranis (1986 RA)	3.34	>40000	2009 OZ <sub>4</sub>	2.68	>45000
2006 UD <sub>17</sub>	3.22	>40000	2009 HU <sub>58</sub>	2.07	>45000
1997 EN <sub>23</sub>	3.27	>50000	2001 RC <sub>12</sub>	3.23	>50000
2010 XB <sub>73</sub>	4.10	>60000	1982 YA	3.64	>70000
2008 YZ <sub>28</sub>	2.50	>80000	2007 BJ	2.94	>80000

asteroid-asteroid tersebut. Sampel obyek yang beresonansi Kozai temporal diberikan pada Gambar 2. Pada panel kiri, asteroid 1986 RA pada awal integrasi memiliki  $\omega$  yang bersirkulasi, setelah ~30 ribu tahun obyek tersebut beresonansi Kozai. Hal sebaliknya terjadi pada panel kanan, asteroid 2002 VY<sub>94</sub> beresonansi Kozai hingga ~70 ribu tahun dan kemudian nilai  $\omega$  bersirkulasi.

### 3.3 Resonansi Seperti-Kozai

Michel dan Thomas (1996) mendapati bahwa resonansi Kozai bisa terjadi pada asteroid dekat-Bumi yang memiliki nilai  $a < 2$  AU dengan  $\omega$  berlibrasi di sekitar  $0^\circ$  atau  $180^\circ$  (resonansi Seperti-Kozai). Pada pekerjaan ini ditemukan dua asteroid yang diduga berada pada keadaan resonansi Seperti-Kozai, yaitu: asteroid 2009 AT yang berlibrasi pada  $\omega$  di sekitar  $0^\circ$  dan asteroid 214869 (2007 PA<sub>8</sub>) yang berlibrasi pada  $\omega \sim 180^\circ$ .

Pada Gambar 3 tampak bahwa resonansi Kozai dimulai pada nilai  $a$  yang berbeda dengan nilai  $a$  awal. Pada kedua asteroid tersebut resonansi terjadi pada nilai  $a \sim 5$  AU yang berdekatan dengan Jupiter. Sehingga bisa dipastikan bahwa Jupiter turut berperan dalam menjaga kestabilan resonansi Kozai.

Gambar 4 memperlihatkan sebaran lokasi obyek yang beresonansi Kozai, Kozai temporal, dan Seperti-Kozai. Tampak bahwa ada ACOs yang stabil dalam keadaan resonansi Kozai berada di dekat lokasi resonansi *mean-motion*, sehingga tidak menutup kemungkinan kestabilan obyek-obyek tersebut akan terganggu. Untuk itu pemeriksaan lebih lanjut diperlukan untuk waktu integrasi yang lebih panjang daripada 100 ribu tahun dengan turut memperhitungkan efek termal.

## 4 KESIMPULAN

Pada pekerjaan ini, integrasi numerik orbit ACOs selama 100 ribu tahun ke depan memberikan hasil yang disarikan sebagai berikut:

1. Terdapat 45 obyek ACOs yang beresonansi Kozai dengan nilai librasi  $\omega$  pada  $90^\circ$  dan  $270^\circ$  dengan nilai  $\sim 2.1 < a$  (AU)  $< \sim 4.3$ .
2. Terdapat 16 obyek ACOs yang beresonansi Kozai secara temporal dengan librasi  $\omega$  pada  $90^\circ$  dan  $270^\circ$ , dan dua obyek beresonansi Seperti-Kozai dengan librasi  $\omega$  pada  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ .
3. Resonansi *mean-motion* berperan secara signifikan dalam mengganggu kestabilan resonansi Kozai.

## Ucapan Terima Kasih

Presentasi dan publikasi pada Seminar HAI 2011 mendapat dukungan dari FMIPA- ITB.

## 5 PUSTAKA

- Chambers, J. E. 1999. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 304, 793-799
- Gronchi, G. F. & Milani, A. 1999. *Astron. Astrophys.*, 341, 928-935
- Kozai, Y. 1962, *Astron. J.*, 67, 591-598
- Kresák, L. 1979, in *Asteroids* (eds. T. Gehrels et al.), Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 289-309
- Levison, H. F. & Duncan, H. J. 1994, *Icarus*, 108, 18-36
- Licandro, J. et al. 2008, *Astron. & Astrophys.*, 481, 861-877
- Michel, P. 1998, *Planet Space. Sci.*, 46, 905-910
- Michel, P. & Thomas F. 1996, *Astron. Astrophys.*, 307, 310-318
- Morbidelli, A. et al. 2002, in *Asteroids III* (eds. W. F. Bottke Jr. et al.), Univ. of Arizona, Tucson, pp. 409-422