

DINAMIKA ORBIT ASTEROID YANG ANALOG DENGAN ORBIT BUMI

B. Dermawan^{*)}, T. Hidayat^{*)}, M. Putra^{*)}, A. Fermita^{**)},
D. T. Wahyuningtyas^{**)}, D. Mandey^{**)}, Z. Hudaya^{***)}, dan D. Utomo^{***)}
^{*)} Kelompok Keilmuan Astronomi, FMIPA – Institut Teknologi Bandung,
^{**)} Program Pasca Sarjana Astronomi, FMIPA – Institut Teknologi Bandung
^{***)} Alumnus Program Sarjana Astronomi, FMIPA – Institut Teknologi Bandung
E-mail: budlder@as.itb.ac.id

ABSTRACT

A set of asteroids that belong to Atens and Apollos groups which orbits are crossing the Earth at 1 AU is known as Earth-like-Orbit Asteroids. As of 1 July 2009, there were 19 Earth-like-Orbit Asteroids listed at the JPL (*Jet Propulsion Laboratory – NASA Small-Body Database*). Orbital dynamics of five new asteroids among them (2008 EV₅, 2008 JE, 2008 KT, 2008 UA₂₀₂, and 2008 UC₂₀₂) have not been studied yet. This study is important because they are asteroids belonging to potentially hazardous objects. High accuracy orbital integrations for a time-span of -1000 to +1000 yr have been conducted to figure out their evolutionary tracks. Our results show that high inclination Earth-like-Orbit Asteroids of more than ~5 degrees tend to be more dynamically stable than those of lower orbital inclination which often switch over from Atens to Apollos and vice versa. Four new Earth-like-Orbit Asteroids are found to have potential collisions with Earth because they will encounter the Earth at minimum distances of less than 0.01 AU.

Keywords: *Asteroids, Orbit dynamics, Hazardous objects*

ABSTRAK

Salah satu kelompok asteroid dekat-Bumi pada grup *Atens* dan *Apollos* yang orbitnya memotong orbit Bumi pada daerah 1 AU adalah kelompok asteroid yang orbitnya analog dengan orbit Bumi (asteroid-analog-Bumi). Sampai 1 Juli 2009 terdapat 19 asteroid-analog-Bumi pada tabulasi JPL (*Jet Propulsion Laboratory – NASA Small-Body Database*). Dari jumlah ini terdapat lima asteroid baru (2008 EV₅, 2008 JE, 2008 KT, 2008 UA₂₀₂, dan 2008 UC₂₀₂) yang belum pernah ditelaah dinamika orbitnya. Telaah dinamika orbit asteroid-analog-Bumi menjadi penting karena termasuk salah satu kelompok asteroid yang berpotensi menabrak Bumi (*hazardous objects*). Melalui perhitungan orbit berakurasi tinggi sepanjang waktu -1000 sampai +1000 tahun dari

sekarang, dinamika orbit asteroid-analog-Bumi tersebut diperiksa. Hasilnya menunjukkan bahwa dinamika asteroid-analog-Bumi dengan inklinasi orbit lebih dari ~ 5 derajat cenderung lebih stabil daripada yang berinklinasi lebih rendah, yang kerap sangat dinamis berpindah dari grup *Atens* ke *Apollos* atau sebaliknya. Empat asteroid baru analog-Bumi diketahui akan berpotensi bertabrakan dengan Bumi karena akan melintas pada jarak kurang dari 0.01 SA.

Kata kunci: *Asteroids, Dinamika orbit, Hazardous objects*

1 PENDAHULUAN

Asteroid-asteroid yang mendiami ruang di dekat Bumi dikenal dengan asteroid dekat-Bumi, yang dikelompokkan menjadi grup *Atiras*, *Atens*, *Apollos*, dan *Amors*. Tabel 1-1 memperlihatkan kriteria orbital kelompok asteroid dekat-Bumi. Orbit asteroid dekat-Bumi ini dapat memotong orbit Bumi pada daerah jarak aphelion Bumi (Q_E), jarak perihelion Bumi (q_E), atau jarak setengah sumbu-panjang Bumi (a_E). Untuk yang terakhir, yakni memotong orbit Bumi pada jarak a_E , secara bersamaan hanya dapat dipenuhi oleh asteroid anggota grup *Atens* dan *Apollos*.

Tabel 1-1: KRITERIA ORBITAL GRUP ASTEROID DEKAT-BUMI

Grup	Kriteria Orbital
<i>Atiras</i>	$Q < Q_E$
<i>Atens</i>	$a < a_E$ dan $Q > Q_E$
<i>Apollos</i>	$a > a_E$ dan $q < q_E$
<i>Amors</i>	$q_E < q < 1.3 SA$

Q , q , dan a masing-masing menyatakan jarak aphelion, jarak perihelion, dan setengah sumbu-panjang orbit asteroid.

$Q_E = 1.017 SA$, $q_E = 0.987 SA$, dan $a_E = 1.0 SA$.

Pemeriksaan elemen orbit yang teliti terhadap asteroid anggota grup *Atens* dan *Apollos* memperlihatkan bahwa asteroid-asteroid yang memotong orbit Bumi pada jarak a_E dapat dibagi lagi menjadi dua kelompok, yaitu kelompok asteroid ko-orbital (*co-orbital asteroids*) dan asteroid yang orbitnya analog dengan orbit Bumi (*Earth-like orbit asteroids*, asteroid-analog-Bumi). Asteroid ko-orbital memiliki periode orbit yang hampir sama dengan Bumi (dikenal dengan istilah resonansi gerak-rerata orbit 1:1) dan berada pada jarak orbit $a_E \pm 0.01 SA$ (Mikkola et al. 2006). Telah diidentifikasi 16 asteroid ko-orbital Bumi (Gallardo 2006) yang dinamika orbitnya dapat dijelaskan melalui solusi permasalahan tiga-benda terbatas, yang meliputi tipe orbit *horseshoe*,

tadpole, dan *quasi-satellite* (Murray dan Dermott 2005; Mikkola et al. 2006).

Kelompok asteroid-analog-Bumi mulai ditelaah sekitar satu-setengah dekade lalu (Rabinowitz, 1993) dengan istilah *Earth-crossing asteroids*, yang dipeleu oleh temuan asteroid 1991 VG dengan orbit yang sangat mirip dengan orbit Bumi. Studi ini merupakan hasil awal survey asteroid menggunakan teleskop *Spacewatch* dan lebih menitikberatkan pada distribusi ukuran asteroid. Studi terbaru (Brasser dan Wiegert 2008; Kwiatkowski et al. 2009) menunjukkan bahwa terdapat 14 asteroid anggota asteroid-analog-Bumi yang memenuhi kriteria nilai setengah sumbu-panjang $a = a_E \pm 0.05 \text{ SA}$, eksentrisitas $e \in [0, 0.1]$, dan inklinasi orbit $i \in [0, 10^\circ]$ (Brasser dan Wiegert, 2008). Bila dilihat dari nilai a , maka dapat saja asteroid ko-orbital ($a = a_E \pm 0.01 \text{ SA}$) menjadi anggota asteroid-analog-Bumi. Untuk itu Brasser dan Wiegert (2008) memberi batasan tambahan bahwa asteroid-asteroid yang sudah mendapat konfirmasi sebagai asteroid ko-orbital tidak dimasukkan menjadi anggota asteroid-analog-Bumi.

Telaah dinamika orbit asteroid-analog-Bumi mendapat perhatian penting karena dengan orbit yang memotong orbit Bumi maka peluang menabrak Bumi tidak dapat diabaikan. Berbeda dengan kelompok asteroid ko-orbital yang mempunyai peluang kecil untuk menabrak Bumi akibat karakter orbit ko-orbitalnya (Murray dan Dermott 2005), kelompok asteroid-analog-Bumi merupakan salah satu kelompok yang peluang tabrakan tersebut tidak dapat diabaikan. Dengan demikian telaah dinamika orbit asteroid-analog-Bumi menempati posisi penting sebagai kontribusi pengetahuan tentang orbit dari obyek-obyek langit yang berpotensi berbahaya (*potentially hazardous objects*) bagi Bumi. Telaah dinamika ini mengambil waktu perhitungan yang merentang dari -1000 hingga +1000 tahun dari waktu saat ini agar dinamika orbit di masa mendatang dapat diperiksa dengan meninjau kecenderungan perilakunya dari masa lalu.

2 DATA DAN METODE PERHITUNGAN ORBIT

Institusi JPL (*Jet Propulsion Laboratory* – NASA) *Small-Body Database* (http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi) lazim dipergunakan sebagai tempat rujukan utama database asteroid dan komet. Dengan menggunakan layanan *search engine* dalam situs ini pada 1 Juli 2009 diperoleh 20 asteroid-analog-Bumi dengan elemen orbit (termasuk nilai ketidaktastiannya) untuk *epoch Modified Julian Date* MJD 55000. Elemen orbit yang dimaksud adalah a , e , i (pengertian ketiganya telah

diberikan sebelumnya), *longitude of ascending-node* Ω , *argument of perihelion* ω , dan *mean anomaly* M . Mengikuti kriteria yang diberikan oleh Brassier dan Wiegert (2008) daftar 20 asteroid-analog-Bumi ini tidak termasuk asteroid ko-orbital Bumi yang telah mendapat konfirmasi.

Pada daftar 20 asteroid-analog-Bumi ini terdapat dua asteroid yang diduga merupakan asteroid ko-orbital Bumi ($a = a_E \pm 0.01$ SA), yaitu asteroid 2009 BD dan 2008 UC₂₀₂, yang masing-masing memiliki nilai $a = 1.008566$ dan 1.007761 SA. Pemeriksaan dinamika orbit asteroid 2009 BD menunjukkan bahwa asteroid ini termasuk asteroid ko-orbital dengan tipe orbit *horseshoe* (Puspitarini dan Dermawan 2010) sepanjang rentang waktu -3000 sampai $+1000$ tahun, sehingga tidak termasuk asteroid yang menjadi obyek penelitian ini meskipun konfirmasi sebagai asteroid ko-orbital belum diputuskan karena masih memerlukan data pengamatan tambahan (<http://spaceweather.com/archive.php?view=1&day=25&month=01&year=2009>). Berbeda dengan asteroid 2009 BD, meskipun melakukan beberapa kali *encounter* dengan Bumi, pemeriksaan awal dinamika orbit asteroid 2008 UC₂₀₂ tidak menunjukkan karakter ko-orbital. Dengan demikian asteroid 2008 UC₂₀₂ termasuk asteroid yang menjadi obyek penelitian ini.

Setelah dilakukan pemeriksaan awal orbit asteroid di atas, obyek penelitian ini secara keseluruhan mencakup 19 asteroid-analog-Bumi, yang 14 asteroid di antaranya telah diberitakan sebelumnya, yaitu 13 asteroid oleh Wiegert dan Brassier (2008) dan 1 asteroid (2006 RH₁₂₀) oleh Kwiatkowski et al. (2009). Meskipun telah diberitakan, telaah 14 asteroid-analog-Bumi tersebut tidak memeriksa secara spesifik dinamika orbit masing-masing asteroid. Untuk itu pada penelitian ini dilakukan telaah rinci dinamika orbit dengan melakukan *orbital clones* pada elemen orbit 19 asteroid-analog-Bumi, baik untuk yang telah diberitakan (14 asteroid) dan 5 asteroid anggota baru (2008 EV₅, 2008 JE, 2008 KT, 2008 UA₂₀₂, dan 2008 UC₂₀₂).

Tabel 2-1: BESARAN-DASAR ORBITAL 19 ASTEROID-ANALOG-BUMI UNTUK EPOCH MJD 55000 YANG DIPEROLEH PADA 1 JULI 2009

Asteroid	a (SA) σa	e σe	i (°) σi	Ω (°) $\sigma \Omega$	ω (°) $\sigma \omega$	M (°) σM	T_H	MOID (SA)	U	Grup
2008 EV ₁ *	0.958620 4.12×10^{-4}	0.081673 4.12×10^{-4}	7.437552 2.85×10^{-4}	93.43810 2.70×10^{-4}	234.88608 3.06×10^{-1}	301.66734 4.30×10^{-3}	2.978	0.01348	1	ATE
2007 UP ₆	0.967921 3.75×10^{-7}	0.094290 1.23×10^{-6}	9.578154 1.04×10^{-4}	31.44865 2.71×10^{-5}	236.25530 1.26×10^{-4}	18.92688 3.75×10^{-4}	2.965	0.01451	2	ATE
2000 SG ₃₄₄	0.977455 7.02×10^{-7}	0.066908 3.77×10^{-6}	0.110379 8.23×10^{-6}	192.26468 1.55×10^{-1}	274.97781 1.64×10^{-1}	276.32480 3.56×10^{-3}	2.996	0.00086	3	ATE
2001 FR ₈₁	0.982699 3.83×10^{-7}	0.027874 4.22×10^{-7}	5.244382 2.49×10^{-3}	183.08268 3.88×10^{-5}	233.57771 1.06×10^{-1}	284.35803 2.99×10^{-3}	2.991	0.00151	3	ATE
2006 QQ ₂₆	0.985266 4.48×10^{-6}	0.045555 1.51×10^{-5}	2.796797 1.37×10^{-1}	161.22150 3.31×10^{-1}	331.32045 1.01×10^{-1}	154.29021 3.43×10^{-3}	2.996	0.01460	4	ATE
2008 JE*	0.984129 4.71×10^{-6}	0.093270 1.50×10^{-4}	6.964958 1.25×10^{-2}	39.19917 1.04×10^{-1}	316.74179 2.42×10^{-1}	289.56753 3.72×10^{-2}	2.977	0.03188	4	ATE
2007 VU ₆	0.976508 7.36×10^{-4}	0.090496 3.14×10^{-4}	1.223066 3.41×10^{-3}	220.37534 5.88×10^{-2}	34.56776 2.63×10^{-2}	25.94595 2.62×10^{-2}	2.992	0.01166	5	ATE
2005 CN ₆₁	0.989786 2.38×10^{-3}	0.068032 5.16×10^{-3}	9.542971 8.55×10^{-3}	146.75396 6.75×10^{-3}	248.24423 1.54×10^{-3}	246.54473 5.64×10^{-3}	2.968	0.02132	5	ATE
2006 RH ₁₂₀	1.033211 8.66×10^{-8}	0.024507 1.01×10^{-7}	0.595542 4.11×10^{-7}	51.12479 1.49×10^{-4}	10.14850 1.34×10^{-4}	175.19025 6.35×10^{-3}	3.000	0.01604	1	APO
1991 VG	1.026915 1.58×10^{-7}	0.049141 1.87×10^{-7}	1.445549 5.58×10^{-6}	73.97376 8.55×10^{-5}	24.51493 1.08×10^{-4}	283.69791 1.44×10^{-3}	2.997	0.00504	2	APO
2002 PN	1.014649 2.15×10^{-7}	0.068855 9.86×10^{-7}	9.144036 1.28×10^{-4}	309.51443 2.21×10^{-3}	107.53037 1.84×10^{-4}	164.63143 6.43×10^{-4}	2.970	0.00355	2	APO
2006 JY ₂₆	1.011314 3.08×10^{-6}	0.083722 1.11×10^{-3}	1.421241 2.92×10^{-4}	44.36675 9.42×10^{-4}	275.52847 4.11×10^{-3}	298.55688 2.80×10^{-3}	2.992	0.00099	3	APO
2006 BZ ₁₄₇	1.023436 1.72×10^{-6}	0.098617 7.21×10^{-6}	1.408987 8.12×10^{-3}	139.84312 1.79×10^{-4}	94.68516 7.51×10^{-4}	1.46795 3.19×10^{-3}	2.990	0.00186	3	APO
2008 KT*	1.015719 6.50×10^{-6}	0.086706 5.32×10^{-3}	1.991349 1.55×10^{-3}	241.81843 4.01×10^{-3}	106.46565 3.37×10^{-3}	280.05893 1.70×10^{-3}	2.991	0.00152	4	APO
2008 UA ₂₀₂ *	1.033057 1.50×10^{-4}	0.068465 3.88×10^{-4}	0.264312 1.22×10^{-3}	21.02166 2.14×10^{-2}	300.91712 8.97×10^{-2}	284.08333 4.62×10^{-2}	2.996	0.00033	6	APO
2001 GP ₂	1.037742 5.12×10^{-3}	0.073962 1.40×10^{-4}	1.279151 2.35×10^{-3}	196.87309 1.41×10^{-2}	111.24986 4.00×10^{-3}	168.85284 2.03×10^{-1}	2.995	0.00148	6	APO
2006 DQ ₁₄	1.027817 4.13×10^{-3}	0.053006 5.17×10^{-3}	6.296737 7.19×10^{-3}	155.34309 5.66×10^{-4}	292.49902 3.61×10^{-3}	126.46354 7.89×10^{-2}	2.985	0.01390	6	APO
2008 UC ₂₀₂ *	1.007761 6.02×10^{-3}	0.067711 1.03×10^{-4}	7.471897 1.74×10^{-2}	38.31928 1.59×10^{-3}	93.32010 1.55×10^{-2}	137.95158 6.06×10^{-3}	2.978	0.00708	6	APO
2007 XB ₂₃	1.041252 1.94×10^{-4}	0.054325 1.78×10^{-4}	8.530218 3.01×10^{-2}	260.30934 7.95×10^{-3}	192.96370 7.59×10^{-2}	141.64790 1.14×10^{-1}	2.976	0.00054	6	APO

*Anggota baru asteroid-analog-Bumi (pekerjaan ini).
ATE menunjukkan *Atens* dan APO untuk *Apollos*.

Tabel 2-1 memperlihatkan besaran-dasar orbital 19 asteroid-analog-Bumi pada penelitian ini yang diperoleh dari JPL *Small-Body Database*, yang disusun berdasarkan nilai parameter U untuk masing-masing grup *Atens* dan *Apollos*. Parameter U menyatakan kualitas orbit asteroid dengan batas galat orbit tidak lebih dari 4.4"/dekade untuk U =

1 hingga 2.08° /dekade untuk $U = 6$. Semakin kecil nilai parameter U maka orbit asteroid tersebut semakin baik diketahui, atau nilai ketidakpastian elemen orbitnya (σ) semakin kecil. Penjelasan rinci tentang parameter U diberikan pada situs IAU (*International Astronomical Union*) *Minor Planet Center* (<http://www.cfa.harvard.edu/iau/info/UValue.html>). Besaran T_E adalah parameter *Tisserand* untuk Bumi dengan formula.

$$T_E = \frac{a_E}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_E}(1-e^2)}\cos(i), \quad (2-1)$$

yang menunjukkan bahwa asteroid akan lepas dari pengaruh dominasi Bumi bila memiliki nilai $T_E > 3$, seperti pada asteroid 2006 RH₁₂₀. Sebelum dan setelah *encounter* dengan Bumi, nilai T_E praktis tidak berubah. Besaran MOID (*Minimum Orbital Intersection Distance*) adalah jarak terdekat antara orbit asteroid dan orbit Bumi yang umumnya dihitung untuk waktu sekitar 100 tahun ke depan. Potensi tabrakan akan semakin besar bila nilai MOID semakin kecil.

Perhitungan dinamika orbit mengambil bentuk masalah N -benda ($i, j = 1, \dots, N$) yang masing-masingnya memiliki massa m_i dengan vektor posisi \mathbf{x}_i (untuk kartesian: x_i, y_i, z_i) pada waktu tertentu t . Percepatan yang dialami m_i akibat tarikan gravitasi oleh massa-massa lainnya (m_j) pada sistem adalah

$$\frac{d^2\mathbf{x}_i}{dt^2} = - \sum_{j=1; j \neq i}^N \frac{Gm_j(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^3}, \quad (2-2)$$

dengan G adalah tetapan gravitasi. Karena persamaan diferensial (2-2) tidak memiliki solusi analitik, maka lazim digunakan penyelesaian numerik dengan melakukan perhitungan gaya netto yang dialami sebuah massa pada waktu tertentu, yang kemudian dilakukan perhitungan vektor posisi yang baru untuk step waktu kemudian. Demikian selanjutnya sampai rentang waktu perhitungan yang ditentukan. Metode penyelesaian persamaan diferensial (2-2) yang diimplementasikan pada pekerjaan ini adalah Bulirsch-Stoer (BS), yang merupakan metode standar dan sangat akurat pada persoalan dinamika orbit (Bodenheimer et al. 2007). Metode BS mengakomodasi variasi step waktu perhitungan, sehingga dapat dengan akurat menghitung jejak orbit asteroid, khususnya ketika *encounter* dengan planet. Sebelum menggunakan persamaan (2-2), elemen orbital yang diberikan pada Tabel 2-1 terlebih dahulu diubah menjadi elemen kartesian melalui transformasi standar, yang kemudian pada setiap step waktu perhitungan dapat ditransformasikan kembali menjadi

elemen orbital. Paket program Mercury (Chambers 1999), yang biasa dipakai dalam tinjauan dinamika orbit, dipergunakan pada pekerjaan ini dengan memilih implementasi metode BS pada perhitungan numeriknya.

Benda masif selain Matahari pada pekerjaan ini melibatkan semua planet terestrial dan Jupiter, dengan dasar pertimbangan bahwa asteroid yang ditinjau berada di daerah dekat-Bumi. Asteroid dianggap benda titik "massless" (bermassa sangat kecil relatif terhadap Matahari dan planet) dan tidak ada interaksi gravitasional atau tabrakan sesamanya. Rentang waktu perhitungan adalah -1000 hingga +1000 tahun dan untuk itu diambil step waktu 1/1000 tahun. Step waktu ini dipandang memadai karena periode orbit tercepat pada sistem (Merkurius: 88 hari) disegmentasi sebanyak ~240 tahap perhitungan. Akurasi perhitungan ditinjau dari kekekalan energi-total sistem dan momentum-sudut sistem yang praktis tidak berubah karena dipandang sebagai sistem yang tertutup. Pada pekerjaan ini dicapai akurasi perhitungan dalam orde tidak lebih dari 10^{-12} untuk nilai energi-total relatif dan momentum-sudut-total relatif, yaitu dengan mengambil selisih nilai-baru dan nilai-sebelumnya dibagi dengan nilai-sebelumnya. Dengan capaian akurasi ini maka hasil perhitungan numerik pada pekerjaan ini dapat dipertanggungjawabkan dengan baik, dan waktu komputasi dapat beberapa kali lebih cepat daripada menggunakan, misalnya, metode Runge-Kutta orde-4 dengan nilai akurasi yang sama.

Telaah dinamika orbit pada pekerjaan ini memerlukan ketelitian nilai elemen orbit. Tabel 2-1 menunjukkan asteroid-analog-Bumi dengan nilai optimal elemen orbit dan nilai ketidakpastian σ yang merupakan sebaran nilai elemen orbit tersebut. Setiap elemen orbit dapat dibuat sebaran nilainya mengikuti sebaran Gaussian ternormalisasi yang dibangun dari nilai σ . Semakin kecil nilai σ , semakin sempit sebaran nilai elemen orbitnya. Obyek-obyek yang elemen orbitnya berdasarkan sebaran nilai ini dinamakan sebagai *clones* dari sebuah asteroid. Pada pekerjaan ini dibuat 100 *clones* untuk setiap asteroid, sehingga jumlah total *clones* yang terlibat dalam perhitungan mencapai 1900. Secara umum *clones* dari asteroid yang memiliki nilai parameter U yang kecil akan mempunyai sebaran nilai elemen orbit yang sempit.

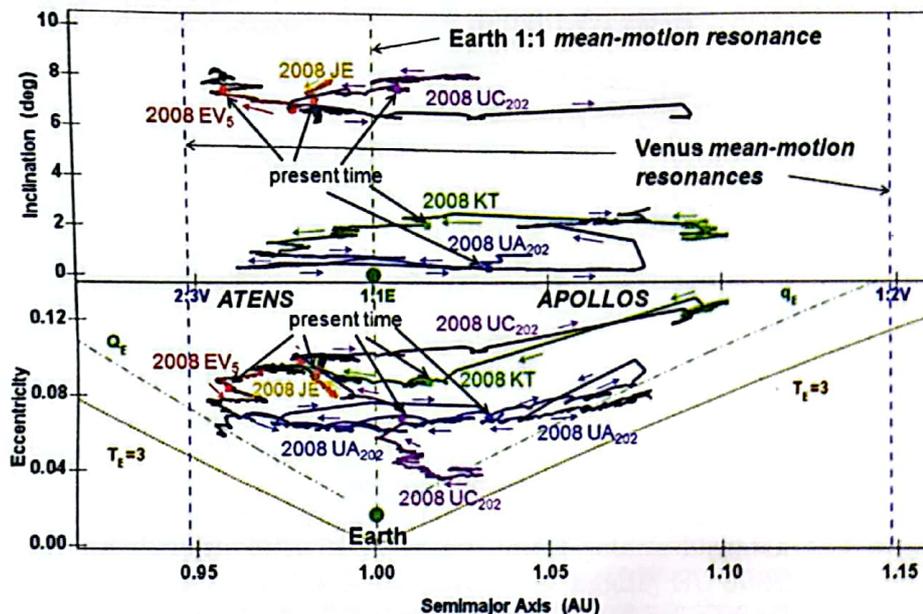
3 HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Bagian ini akan memaparkan dinamika orbit asteroid-analog-Bumi yang diperoleh dari hasil perhitungan numerik, termasuk tinjauan *encounter* asteroid dengan Bumi. Setelah itu akan disampaikan

analisis jelajah orbit dari clones asteroid selama rentang waktu perhitungan.

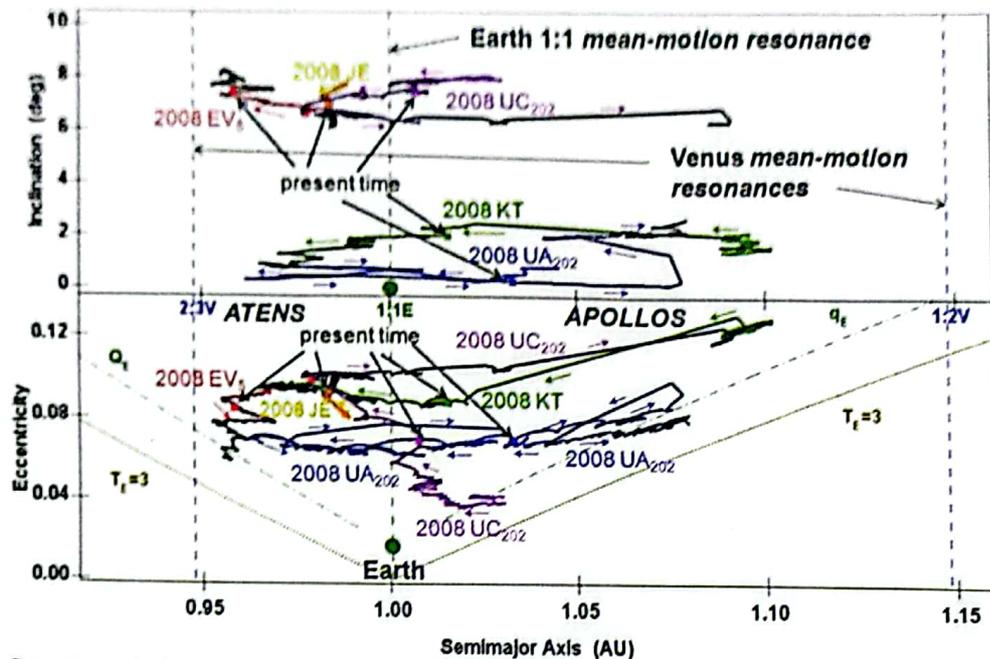
3.1 Dinamika Orbit Asteroid-analog-Bumi

Sampel jelajah orbit asteroid-analog-Bumi pada rentang waktu dari -1000 sampai +1000 tahun diberikan pada Gambar 3-1. Rentang waktu ini direpresentasikan dengan gradasi warna tertentu ke hitam. Sampel jelajah orbit ini mewakili 19 asteroid-analog-Bumi yang secara keseluruhan dapat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu dinamika orbit yang relatif-stabil, pindah-grup, dan *chaotic*. Dinamika orbit asteroid 2005 CN₆₁ (grup *Atens*, gradasi warna merah ke hitam) dan 2002 PN (grup *Apollos*, jingga ke hitam) termasuk kategori relatif-stabil, tidak berpindah grup, meskipun terjadi variasi elemen orbit a , e , dan i . Orbit asteroid 2006 BZ₁₄₇ (hijau ke hitam) merupakan sampel dinamika orbit dengan kategori pindah-grup, dalam hal ini dari *Atens* ke *Apollos*. Sampel dinamika orbit dengan kategori *chaotic* adalah asteroid 1991 VG, yang sangat sering berpindah grup dan *encounter* dengan Bumi.



Gambar 3-1: Sampel jelajah orbit asteroid-analog-Bumi yang digambarkan pada plot i vs. a (panel atas) dan e vs. a (panel bawah). Garis tegak putus-putus menyatakan lokasi resonansi gerak-rerata (*mean-motion resonances*) dengan Venus (2:3V dan 1:2V) dan Bumi (1:1E). Bumi ditunjukkan dengan tanda lingkaran hijau. Kurva titik-garis menyatakan lokasi Q_E (pada $a < a_E$; batas daerah *Atens*) dan q_E (pada $a > a_E$; batas daerah *Apollos*). Kurva titik-titik menyatakan lokasi $T_E = 3$; di bawah kurva ini nilai $T_E > 3$. Jelajah orbit dinyatakan dengan warna yang bergradasi menjadi hitam. Lokasi asteroid saat ini ditunjukkan dengan tanda kotak berwarna

Dinamika orbit anggota baru asteroid-analog-Bumi secara khusus diperlihatkan pada Gambar 3-2. Anggota baru ini terdiri dari 2 asteroid *Atens* (2008 EV₅ dan 2008 JE) dan 3 asteroid *Apollos* (2008 KT, 2008 UA₂₀₂, dan 2008 UC₂₀₂). Sama dengan penjelasan sebelumnya, gradasi warna ke hitam menunjukkan rentang waktu dari -1000 hingga +1000 tahun. Tanda panah kecil berwarna menyatakan runutan jelajah orbit asteroid yang bersesuaian. Jelajah orbit asteroid 2008 EV₅ (gradasi warna merah ke hitam) dan 2008 JE (jingga ke hitam) memperlihatkan dinamika orbit dengan kategori relatif-stabil. Sementara itu, dinamika orbit asteroid 2008 KT (gradasi warna biru ke hitam), 2008 UA₂₀₂ (hijau ke hitam), dan 2008 UC₂₀₂ (ungu ke hitam) menunjukkan karakter kategori pindah-grup dengan hanya sesekali *encounter* dengan Bumi pada lokasi a_E dan q_E .



Gambar 3-2: Seperti pada Gambar 3-1, namun untuk anggota baru asteroid-analog-Bumi, yaitu 2008 EV₅ (merah ke hitam), 2008 JE (jingga ke hitam), 2008 KT (biru ke hitam), 2008 UA₂₀₂ (hijau ke hitam), dan 2008 UC₂₀₂ (ungu ke hitam). Panah kecil berwarna menunjukkan arah jelajah orbital asteroid yang bersesuaian

Tabulasi rinci kategori dinamika orbit 19 asteroid-analog-Bumi diberikan pada Tabel 3-1. Terdapat 2 asteroid (1991 VG dan 2006 RH₁₂₀) yang memiliki dinamika orbit dengan kategori *chaotic*. Pemeriksaan dengan lebih teliti menunjukkan bahwa asteroid 2006 RH₁₂₀ lebih *chaotic* daripada 1991 VG, yaitu dengan rentang jelajah a lebih dari 0.15 SA dan mengisi ruang orbital antara q_E - Q_E dan $T_E = 3$. Jumlah

berimbang didapati untuk asteroid dengan kategori dinamika orbit pindah-grup (8 asteroid) dan relatif-stabil (9 asteroid). Dari 9 asteroid kategori relatif-stabil ini, asteroid 2005 CN₆₁, 2007 UP₆, dan 2008 JE menunjukkan evolusi orbit yang sangat stabil pada sebaran lokasi α yang sempit ($\alpha \leq 0.15$ SA).

Tabel 3-1: KATEGORI DINAMIKA ORBIT ASTEROID-ANALOG-BUMI

Relatif-stabil		Pindah-grup		Chaotic	
2001 GP ₂	APO	2000 SG ₃₄₄	APO	1991 VG	APO
2002 PN	APO	2001 FR ₈₅	ATE	2006 RH ₁₂₀	APO
2005 CN ₆₁	ATE	2006 BZ ₁₄₇	ATE		
2006 DQ ₁₄	APO	2006 JY ₂₆	APO		
2006 QQ ₅₆	ATE	2007 XB ₂₃	ATE		
2007 UP ₆	ATE	2008 KT*	APO		
2007 VU ₆	ATE	2008 UA ₂₀₂ *	APO		
2008 EV ₅ *	ATE	2008 UC ₂₀₂ *	APO		
2008 JE*	ATE				

*Anggota baru asteroid-analog-Bumi (pekerjaan ini).

ATE menunjukkan *Atens* dan APO untuk *Apollos*.

3.2 Tinjauan *Encounter* Asteroid dengan Bumi

Salah satu kriteria pada definisi standar bahwa sebuah asteroid termasuk anggota *Potentially Hazardous Asteroids* (PHAs) adalah nilai MOID asteroid kurang dari 0.05 SA (<http://neo.jpl.nasa.gov/neo/pha.html#orbital>). Semua asteroid-analog-Bumi pada Tabel 2-1 memiliki nilai MOID yang memenuhi kriteria sebagai PHAs. Pada pekerjaan ini didefinisikan bahwa apabila jarak asteroid dengan Bumi mencapai kurang dari 0.01 SA (~4 kali jarak Bumi-Bulan) maka asteroid-analog-Bumi memiliki potensi sangat berbahaya bagi Bumi. Batasan 0.01 SA merupakan daerah bola pengaruh gravitasi Bumi, yang dapat menyebabkan asteroid tersebut 'tertangkap' sehingga berpotensi besar menabrak Bumi. Sebagai catatan bahwa asteroid-analog-Bumi ini telah diperiksa sebelumnya sebagai asteroid yang tidak termasuk asteroid ko-orbital.

Tabel 3-2 memperlihatkan tentang *encounter* asteroid-analog-Bumi yang akan terjadi pada +1000 tahun mendatang. Asteroid 2006 RH₁₂₀ akan sangat sering *encounter* dengan Bumi. Dua asteroid grup *Apollos* (2002 PN dan 2006 DQ₁₄) didapati tidak akan melakukan *encounter*, sedangkan dari grup *Atens* ada empat asteroid (2007 UP₆, 2006 QQ₅₆, 2008 JE, dan 2005 CN₆₁). Empat dari lima asteroid baru analog-Bumi (2008 EV₅, 2008 KT, 2008 UC₂₀₂, dan 2008 UA₂₀₂) termasuk berpotensi membahayakan Bumi; bahkan dua di antaranya (2008 UC₂₀₂ dan 2008 UA₂₀₂) akan melakukan *encounter* pada jarak sangat dekat, yaitu ~0.0018 SA (~0.7 jarak Bumi-Bulan!).

Tabel 3-2: ENCOUNTER ASTEROID-ANALOG-BUMI PADA JARAK ≤ 0.01 SA DALAM +1000 TAHUN MENDATANG

Asteroid	Jumlah total encounter	Jumlah encounter dalam +100 tahun	Jarak minimum (SA)	Waktu terjadi (tahun [*])
2008 EV ₅ *	5	0	0.0083	919.488
2007 UP ₆	0	0	-	-
2000 SG ₃₄₄	6	6	0.0018	60.864
2001 FR ₈₅	15	0	0.0028	784.680
2006 QQ ₅₆	0	0	-	-
2008 JE*	0	0	-	-
2007 VU ₆	5	0	0.0081	266.296
2005 CN ₆₁	0	0	-	-
2006 RH ₁₂₀	194	0	0.0018	318.760
1991 VG	51	8	0.0017	184.272
2002 PN	0	0	-	-
2006 JY ₂₆	5	3	0.0047	68.360
2006 BZ ₁₄₇	14	0	0.0065	182.160
2008 KT*	3	0	0.0059	255.904
2008 UA ₂₀₂ *	5	0	0.0018	303.008
2001 GP ₂	11	3	0.0066	438.776
2006 DQ ₁₄	0	0	-	-
2008 UC ₂₀₂ *	16	3	0.0018	713.336
2007 XB ₂₃	6	2	0.0045	15.489

*Anggota baru asteroid-analog-Bumi (pekerjaan ini).

[#]Waktu terjadi jarak minimum yang dihitung terhadap *epoch*. Galat ± 0.008 tahun.

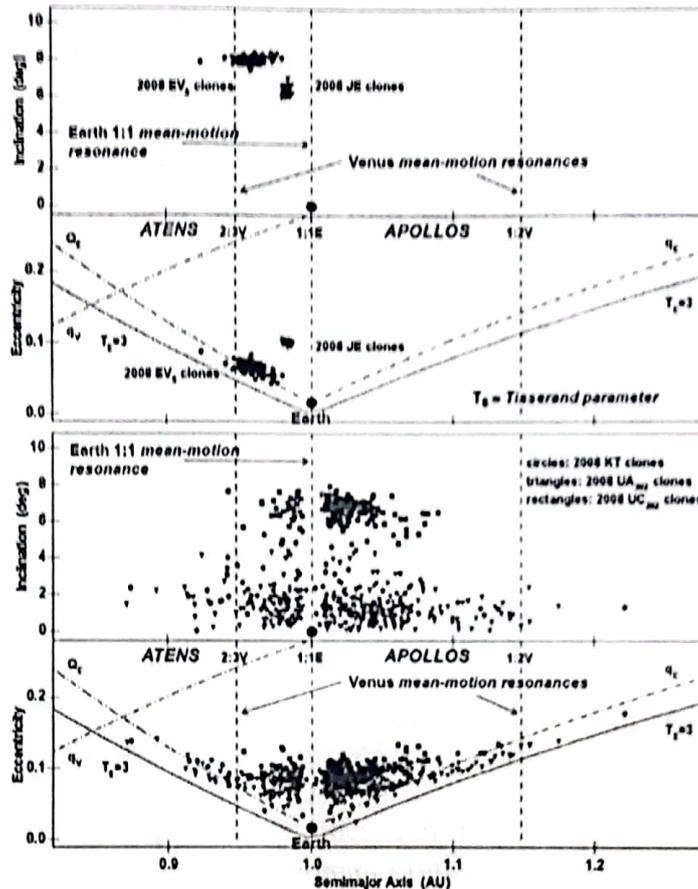
Sebuah catatan penting, bahwa terdapat tiga asteroid lain yang akan *encounter* dengan Bumi pada jarak yang praktis sama dengan di atas (~ 0.7 jarak Bumi-Bulan!), yaitu asteroid 2000 SG₃₄₄, 2006 RH₁₂₀, dan 1991 VG (lihat Tabel 3-2). Kedua asteroid terakhir ini patut mendapat perhatian penting karena memiliki frekuensi *encounter* yang sangat sering.

3.3 Dinamika Orbit Clones Asteroid-analog-Bumi

Pada pekerjaan ini *clones* dari sebuah asteroid-analog-Bumi adalah 100 obyek yang dihasilkan dari sebaran Gaussian dengan menggunakan nilai ketidakpastian yang tersedia untuk setiap elemen orbitnya. Pada pekerjaan ini dilakukan pemantauan dinamika orbit +1000 tahun ke depan. Secara umum evolusi orbit obyek *clones* berkaitan dengan lokasi awal orbitalnya. Obyek dengan inklinasi relatif besar ($i > 5$ derajat) memperlihatkan dinamika yang lebih stabil daripada obyek dengan inklinasi rendah. Tampak nyata peran

perturbasi Bumi pada daerah q_E dan Q_E . Selain itu resonansi 2:3V dengan Venus dan 1:1E dengan Bumi (a_E) menyebabkan obyek seakan "melompat" dengan cepat ke daerah di "seberang" lokasi resonansi.

Gambar 3-3 memperlihatkan contoh umum hasil perhitungan evolusi orbit (perubahan warna dari abu-abu ke hitam) obyek clones. Gambar ini memperlihatkan clones dari asteroid baru analog-Bumi. Panel atas adalah untuk dinamika orbit yang stabil (grup *Atens*) karena kelompok clones pada akhir evolusi hanya menyebar tidak begitu luas seperti pada kasus di panel bawah. Tampak bahwa resonansi 2:3V berperan "melemparkan" sejumlah clones dari kelompok utama asteroid 2008 EVs. Panel bawah pada Gambar 3-3 ini memperlihatkan evolusi orbit grup *Apollos* yang clones pada akhir evolusi menjadi jauh lebih luas. Namun demikian, clones dengan inklinalasi lebih tinggi (kotak) akan berevolusi dengan sebaran yang lebih sempit daripada clones pada inklinalasi rendah (lingkaran dan segitiga).



Gambar 3-3: Evolusi orbit clones asteroid baru analog-Bumi untuk grup *Atens* (atas) dan grup *Apollos* (bawah). Waktu evolusi sampai +1000 tahun dinyatakan dengan warna yang berubah dari abu-abu ke hitam. Keterangan gambar sama dengan pada Gambar 3-1

Terdapat indikasi bahwa asteroid-analog-Bumi grup *Atens* yang berlokasi seperti pada asteroid 2008 JE memiliki dinamika orbit yang lebih stabil. Indikasi ini dapat dikaitkan dengan adanya fenomena dinamika resonansi sekuler pada daerah ini, yang dikenal dengan resonansi Kozai (Michel 1998). Pemeriksaan dengan waktu integrasi yang lebih panjang diperlukan untuk menjelaskan fenomena ini.

4 KESIMPULAN

Perhitungan integrasi orbit asteroid-analog-Bumi memperlihatkan bahwa dinamika orbit kelompok asteroid ini umumnya *chaotic*, yang banyak mendapat gangguan perturbasi Bumi pada q_E dan Q_E , juga dari resonansi 2:3V dan 1:1E (pada a_E). Tiga asteroid-analog-Bumi (2005 CN₆₁, 2007 UP₆, dan 2008 JE) yang merupakan anggota grup *Atens* memiliki dinamika orbit yang paling stabil, sedangkan dua asteroid (1991 VG dan 2006 RH₁₂₀) anggota grup *Apollos* sangat *chaotic* pada daerah $T_E \sim 3$. Evolusi obyek *clones* asteroid-analog-Bumi memperlihatkan bahwa asteroid yang memiliki inklinasi tinggi ($i > 5$ derajat) menunjukkan sebaran *clones* di akhir evolusi relatif lebih terbatas daripada untuk asteroid dengan inklinasi rendah.

Empat dari lima asteroid baru analog-Bumi akan melakukan encounter pada jarak kurang dari 0.01 SA. Dua di antaranya (2008 UC₂₀₂ dan 2008 UA₂₀₂) bahkan akan berada sangat dekat (~ 0.0018 SA) dengan Bumi sehingga berpotensi besar bertabrakan. Penelitian ini mendapati pula bahwa asteroid yang sudah dikenal, 2000 SG₃₄₄, 2006 RH₁₂₀, dan 1991 VG, akan *encounter* pada jarak minimum yang praktis sama dengan kedua asteroid baru analog-Bumi tersebut.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini merupakan bagian dari hasil Program Riset Kelompok Keahlian – ITB 2009 dengan kontrak no. 244/K01.7/PL/2009.

DAFTAR RUJUKAN

- Bodenheimer, P.; G. P. Laughlin; M. Rozyezka; and H. W. Yorke, 2007. *Numerical Methods in Astrophysics*. Taylor & Francis, New York.
- Brasser, R.; and P. Wiegert, 2008. *Asteroids on Earth-like Orbits and Their Origin*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 386, 2031–2038.
- Chambers, J. E., 1999. *A Hybrid Symplectic Integrator that Permits Close Encounters between Massive Bodies*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 304, 793-799.
- Gallardo, T., 2006. *Atlas of the Mean Motion Resonances in the Solar System*, Icarus, 184, 29-38.

- Kwiatkowski, T; A. Kryszczyńska; M. Pollńska; D. A. H. Buckley; D. O'Donoghue; et al., 2009. *Photometry of 2006 RH₁₂₀: An Asteroid Temporary Captured Into A Geocentric Orbit*, *Astron. & Astrophys.*, 495, 967-974.
- Michel, P., 1998. *Dynamical Behaviour of Near-Earth Asteroids in the Terrestrial Planet Region: The Role of Secular Resonances*, *Planet. Space. Sci.*, 46, 905-910.
- Mikkola, S.; K. Innanen; P. Wiegert; M. Connors; and R. Brasser, 2006. *Stability Limits for the Quasi-Satellite Orbit*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 369, 15-24.
- Murray, C. D.; and S. F. Dermott, 2005. *Solar System Dynamics*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Puspitarini, L.; and B. Dermawan, 2010. "The Orbital Dynamics of Earth's Co-orbital Asteroids" in *Proceedings of Conference of the Indonesia Astronomy and Astrophysics*, (in press/publication).
- Rabinowitz, D. L., 1993. *The Size Distribution of the Earth-Approaching Asteroids*, *The Astrophysical Journal*, 407, 412-427.