

EVOLUSI ORBIT *CENTAURS* DAN TRANS-NEPTUNUS KE BAGIAN DALAM TATA SURYA

B. Dermawan^{*)}, Z. Huda^{)}, T. Hidayat, M. Putra^{*)},**

A. Fermita, D. T. Wahyuningtyas, D. Mandey^{*)}, dan D. Utomo^{**)}**

^{*)} Kelompok Keilmuan Astronomi, FMIPA – Institut Teknologi Bandung,

^{**)} Alumnus Program Sarjana Astronomi, FMIPA – Institut Teknologi Bandung

^{***)} Program Pasca Sarjana Astronomi, FMIPA – Institut Teknologi Bandung

email: budider@as.itb.ac.id

ABSTRACT

Dynamical study of Trans-Neptunian Objects (TNOs) showed that the orbital evolution of TNOs, especially for Scattered-Disk class, is closely related to Centaurs. As of 1 June 2009, there were 673 known Centaurs and TNOs whose orbits are well-determined within an uncertainty of ≤ 6.4 ' /decade. It is interesting to investigate a fraction of evolving Centaurs and TNOs to inner solar system regions along 1 Myr evolution under perturbations of all planets. In order to have a better knowledge about spatial distributions of Centaurs and TNOs, we generated additional four sets artificial data based on the known distribution. We find that most Centaurs show chaotic orbital evolutions and many of them are ejected out to the outer solar system. The ejected Centaurs in the first-half evolution are more numerous than that of the second-half one. This study also indicates that number of Centaurs originated from 3:2 Neptune resonance objects is more abundant at about 5×10^5 yr, and only ~1% Centaurs and TNOs evolve to be Mars-crossers.

Keywords: *Asteroids, Orbit dynamic, Centaurs, Trans-Neptunus*

ABSTRAK

Telaah dinamika objek Trans-Neptunus menunjukkan bahwa evolusi orbitnya, khususnya kelas *Scatter-Disk*, berkaitan erat dengan *Centaurs*. Sampai 1 Juni 2009 terdapat 673 objek *Centaurs* dan Trans-Neptunus yang orbitnya diketahui dengan sangat baik dengan ketidakpastian ≤ 6.4 ' /dekade. Adalah menarik untuk mencari tahu fraksi jumlah objek *Centaurs* dan Trans-Neptunus yang berevolusi ke bagian dalam tata surya sepanjang 1 juta tahun, dengan melibatkan gangguan seluruh planet. Agar sebaran lokasi objek *Centaurs* dan Trans-Neptunus dapat dipahami dengan baik, kami membangun empat set data artifisial berdasarkan sebaran orbital yang telah diketahui.

Pekerjaan ini menunjukkan bahwa banyak *Centaurs* memperlihatkan evolusi orbit yang *chaotic* dan banyak di antaranya terlempar ke tepian tata surya. Objek *Centaurs* yang terlempar pada paruh pertama evolusi jauh lebih banyak daripada paruh keduanya. Studi ini juga mengindikasikan bahwa *Centaurs* yang berasal dari objek resonansi 3:2 Neptunus mencapai jumlah yang banyak pada sekitar 5×10^5 tahun, dan hanya ~1% *Centaurs* dan Trans-Neptunus berevolusi menjadi *Mars-Crossers*.

Kata kunci: *Asteroids, Dinamika orbit, Centaurs, Trans-Neptunus*

1 PENDAHULUAN

Pembuktian langsung adanya sekumpulan objek benda-kecil setelah orbit Neptunus, yang dihipotesiskan lebih dari empat dekade, adalah ketika Jewitt dan Luu (1992) berhasil mengamati sebuah objek yang diberi kode-nama 1992 QB₁. Temuan ini menjadi salah satu tonggak sejarah penting pada perkembangan eksplorasi tata surya. Penamaan sekumpulan objek ini diambil dengan tidak melekatkannya dengan nama orang, yang sebelumnya sempat menuai kontroversi (dahulu diberi nama *Edgeworth-Kuiper Belt Objects* atau *Kuiper Belt Objects*), yaitu dengan berdasarkan lokasi objek tersebut yang diyakini lebih netral dan universal. *Trans-Neptunian Objects* (TNOs, yang diterjemahkan menjadi Objek Trans-Neptunus) dirasa lebih tepat untuk itu, sehingga karenanya lebih sering digunakan saat ini. Sampai medio 2009 telah ditemukan lebih dari seribu Trans-Neptunus melalui dukungan kemajuan pesat teknologi instrumentasi dan teknik pengamatan.

Karakteristik fisis dan orbital Trans-Neptunus banyak ditelaah dengan mengaitkannya dengan objek *Centaurs*, yaitu populasi benda-kecil di antara orbit Jupiter dan Neptunus. Karakter fisis objek Trans-Neptunus menunjukkan permukaan yang diselimuti es dengan *albedo* rendah dan banyak di antaranya sangat mirip dengan karakter fisis *Centaurs*. Secara umum, objek Trans-Neptunus dibagi menjadi empat kelas orbital (Delsanti dan Jewitt 2006), yaitu: *Scattered-Disk Objects* (SDOs), *Resonant Objects* (ROs), *Classical Objects* (COs) yang terdiri dari populasi "panas" (*hot*, inklinasi orbit $> 5^\circ$) dan "dingin" (*cold*, inklinasi orbit $< 5^\circ$), dan *Extended Scattered-Disk Objects* (ESDOs). Tabel 2-1 menunjukkan kriteria orbital kelas-kelas ini dan lokasi orbitalnya dapat dilihat pada Gambar 3-1 panel atas.

Objek Trans-Neptunus yang paling dinamis adalah kelas SDOs. Telaah dinamika orbit objek *Centaurs* dan Trans-Neptunus (misalnya

Delsanti dan Jewitt 2006) menunjukkan bahwa sebagian objek Trans-Neptunus berevolusi menjadi objek *Centaurs* dan komet keluarga Jupiter (*Jupiter Family Comets*, JFCs). Setelah beberapa waktu berada di daerah JFCs, objek dengan orbit yang lonjong (eksentrisitas besar) dapat berevolusi menjadi objek di dekat-Mars (*Mars-Crossers*) akibat, meskipun kecil tetapi kontinu, pengaruh gangguan gravitasi planet terestrial. Pada gilirannya, *Mars-crossers* kemudian dapat menjadi objek dekat-Bumi (*Near-Earth Asteroids*) (Bottke et al. 2002). Skenario evolusi orbit ini diajukan oleh Levison dan Duncan (1997) yang mengatakan bahwa terdapat sejumlah kecil *Centaurs* dan Trans-Neptunus yang dapat berevolusi menjadi objek dekat-Bumi atau dekat-Mars.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui secara kuantitatif fraksi *Centaurs* dan Trans-Neptunus yang berevolusi ke bagian dalam tata surya, khususnya yang dapat sampai pada daerah dekat-Mars atau *Mars-crossers*. Hasil yang berkaitan dengan dinamika orbit *Centaurs* dan Trans-Neptunus juga akan dipaparkan.

2 DATA DAN METODE PERHITUNGAN ORBIT

Pekerjaan evolusi orbit ini membutuhkan informasi elemen orbit standar objek kajian, dalam hal ini *Centaurs* dan Trans-Neptunus, yaitu setengah sumbu-panjang a , eksentrisitas e , inklinasi orbit i , *longitude of ascending-node* Ω , *argument of perihelion* ω , dan *mean anomaly* M . Institusi JPL (*Jet Propulsion Laboratory* – NASA) *Small-Body Database* (http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi) menyediakan informasi elemen orbit ini melalui layanan *search engine*. Per 1 Juni 2009 diperoleh 673 objek yang nilai elemen orbitnya dihitung untuk *epoch Modified Julian Date* MJD 55000, dengan rincian 90 *Centaurs* dan 583 Trans-Neptunus. Kami menamainya sebagai objek *Real*. Sejumlah objek ini dipilih berdasarkan tingkat akurasi elemen orbit yang baik (maksimum ketidakpastian 6.4'/dekade) agar jelajah evolusi orbitnya dapat dianalisis dengan baik dan memiliki arti yang lebih signifikan (lebih rinci silakan lihat: <http://www.cfa.harvard.edu/iau/info/UValue.html>). ROs yang ditinjau pada pekerjaan ini terbatas pada gerak-rerata resonansi utama 3:2, 5:3, 7:4, 2:1, dan 5:2 dengan Neptunus. Secara keseluruhan, pekerjaan ini meninjau 9 klasifikasi, yang rincian jumlah objek pada masing-masing klasifikasi disampaikan pada Tabel 2-1.

Tabel 2-1: JUMLAH OBJEK *REAL* DAN ARTIFISIAL *CENTAURUS* DAN *TRANS-NEPTUNUS* BESERTA KRITERIA ORBITALNYA MASING-MASING

No.	Klasifikasi	Kriteria	<i>Real</i>	Artifisial
1.	<i>Centaurs (Cent)</i>	$a_J < q < q_N$	90	40
2.	SDOs (<i>Scatt</i>)	$a > 30 \text{ SA}; e > 0.3$	144	100
3.	ROs 3:2 (<i>Res 3:2</i>)	$a \sim 39.3 \text{ SA}$	101	100
4.	ROs 5:3 (<i>Res 5:3</i>)	$a \sim 42.6 \text{ SA}$	23	20
5.	ROs 7:4 (<i>Res 7:4</i>)	$a \sim 43.6 \text{ SA}$	34	40
6.	ROs 2:1 (<i>Res 2:1</i>)	$a \sim 47.7 \text{ SA}$	19	20
7.	ROs 5:2 (<i>Res 5:2</i>)	$a \sim 55.4 \text{ SA}$	15	20
8.	CSOs $i < 5^\circ$ (<i>Class i < 5</i>)	$39.3 < a \text{ (SA)} < 47.7; i < 5^\circ$	144	200
9.	CSOs $i > 5^\circ$ (<i>Class i > 5</i>)	$39.3 < a \text{ (SA)} < 47.7; i > 5^\circ$	103	100
Total			673	640

Keterangan:

Label di dalam tanda-kurung pada kolom klasifikasi menyatakan label yang digunakan pada gambar atau histogram.

q menyatakan jarak perihelion dan subskrip J dan N menyatakan Jupiter dan Neptunus.

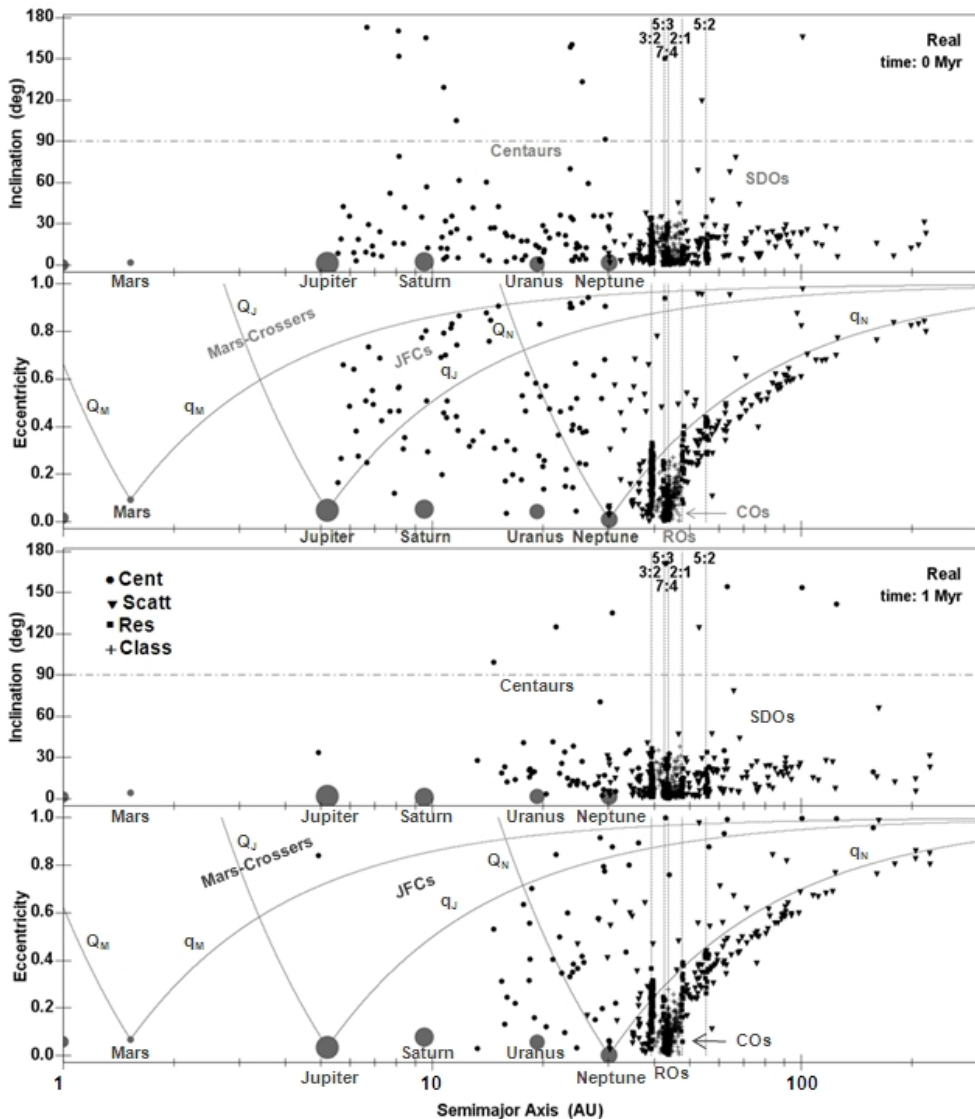
Usulan sebaran jumlah total objek pada kelas-kelas orbital Trans-Neptunus disampaikan oleh Bernstein et al. (2004). Namun demikian, sampai saat ini rincian jumlah total objek pada masing-masing kelas orbital Trans-Neptunus belum diketahui dengan baik. Untuk itu kami membangun model.

Jumlah sebaran orbital kelas-kelas objek Trans-Neptunus dengan cara membuat 4 set data Artifisial berdasarkan kriteria orbital pada Tabel 2-1. Kriteria pada masing-masing kelas ini mengikuti kriteria umum klasifikasi kelas orbital Trans-Neptunus. Masing-masing set data Artifisial dibuat secara acak-uniform dengan memperhatikan kriteria kelas orbital yang diberikan. Dengan demikian diperoleh model jumlah total objek *Centaurs* dan Trans-Neptunus sebanyak $4 \times 640 = 2560$ objek, yang kami anggap sebagai cuplikan dari sebaran orbital *Centaurs* dan Trans-Neptunus yang lebih menyeluruh.

Perhitungan evolusi orbit dilakukan dengan memeriksa posisi dan kecepatan masing-masing objek yang terlibat pada perhitungan, yaitu planet-planet dan benda-kecil (*Centaurs* dan Trans-Neptunus). Semua planet Terrestrial dan Jovian dilibatkan pada perhitungan evolusi orbit. Data awal elemen orbit terlebih dahulu ditransformasikan ke dalam posisi dan kecepatan kartesian mengikuti prosedur standar, misalnya yang diberikan pada Murray dan Dermott (2005). Kemudian dilakukan integrasi numerik persamaan gerak kartesian umum Newtonian untuk masalah N -benda (Bodenheimer et al. 2007). Posisi dan kecepatan yang diperoleh dari persamaan gerak benda ini kemudian dapat ditransformasikan kembali menjadi elemen orbit untuk setiap step-waktu integrasi. Demikian selanjutnya sampai rentang waktu perhitungan yang ditentukan. Interaksi gravitasional dan perturbasi antar sesama benda-kecil tidak diperhitungkan karena dianggap sebagai benda titik "*massless*".

Metode perhitungan numerik yang dipilih adalah metode *Regularized Mixed Variable Symplectic* (RMVS) karena waktu komputasi dapat lebih cepat daripada metode standar Bulirsch-Stoer (Bodenheimer et al. 2007), dengan tanpa mengurangi secara signifikan faktor keakuratan perhitungan. Perhitungan evolusi orbit dilakukan untuk waktu 1 juta tahun dengan step waktu 30 hari. Step waktu ini diambil karena dipertimbangkan cukup untuk tinjauan utama perhitungan evolusi orbit yang berada pada daerah Trans-Neptunus, yang daerah terdekat ke Matahari berada pada sekitar Mars, yaitu untuk benda-kecil yang dalam evolusi orbitnya menjadi *Mars-crossers*. Metode RMVS ini tersedia pada paket program numerik evolusi orbit swift (Levison dan Duncan, 1994) yang telah menjadi salah satu paket program yang sering digunakan dalam dinamika orbit benda-kecil.

Pada pekerjaan ini sistem keplanetan dan objek *Centaurs* dan Trans-Neptunus dipandang sebagai sistem yang konservatif, yakni tidak ada energi yang keluar dari sistem atau masuk ke dalam sistem. Yang dapat terjadi adalah transfer energi antar-objek di dalam sistem ini yang memungkinkan terjadinya perubahan elemen-elemen orbit, khususnya objek *Centaurs* dan Trans-Neptunus. Pekerjaan ini menunjukkan bahwa perhitungan integrasi orbit mencapai perubahan relatif energi-total sistem pada orde 10^{-9} dan perubahan relatif momentum-sudut-total sistem pada orde 10^{-10} . Dengan demikian dapat dikatakan bahwa sistem yang konservatif tetap terjaga sepanjang waktu perhitungan sehingga jejak evolusi orbit *Centaurs* dan Trans-Neptunus dapat dianalisis dengan seksama.



Gambar 3-1: Keadaan awal sebaran orbital (i vs a dan e vs a) *Real Centaurs* dan Trans-Neptunus (atas) dan setelah evolusi 1 juta tahun (bawah). Kurva menyatakan lokasi aphelion (Q) dan perihelion (q)

3 HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

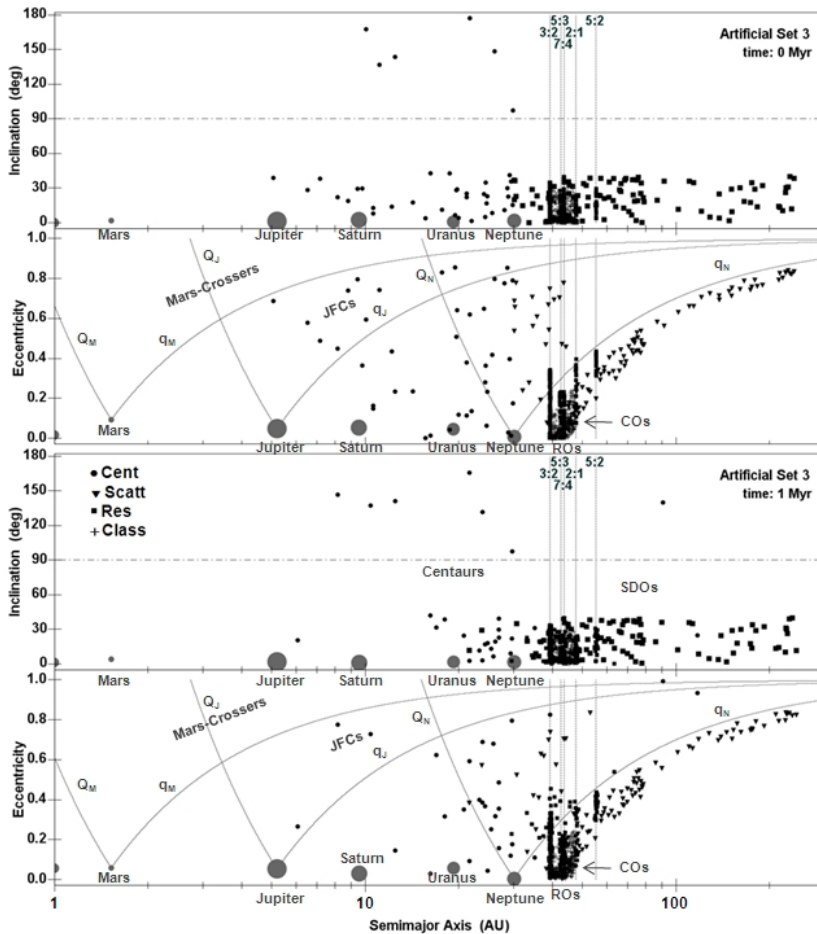
Hasil perhitungan numerik evolusi orbit untuk objek *Real* dan *Artifisial Centaurs* dan Trans-Neptunus dipaparkan di sini. Pembahasan disampaikan dengan menganalisis lokasi orbital *Centaurs* dan Trans-Neptunus yang berevolusi menuju tiga daerah di bagian yang lebih dalam dari Trans-Neptunus, yakni daerah *Centaurs* itu sendiri, daerah antara Jupiter hingga Mars (JFCs), dan daerah *Mars-crossers*. Ketiga

daerah tinjauan ini dibatasi oleh jarak perihelion Neptunus- q_N , Jupiter- q_J , dan Mars- q_M (lihat Gambar 3-1). Lokasi aphelion (Q) dan perihelion (q) planet merupakan lokasi yang mendapat interaksi gravitasi kuat oleh planet sehingga benda-kecil dapat berpindah lokasi ke daerah lain di tata surya.

3.1 Evolusi Orbit *Real* dan *Artifisial*

Pada evolusi orbit 500 ribu tahun pertama, didapati banyak objek *Centaurs* terlontar ke tepian tata surya yang menunjukkan bahwa daerah *Centaurs* ($q_J < q < q_N$) memiliki orbit sangat *chaotic*. Dijumpai sudah ada beberapa objek SDOs (*Scatt*) yang berevolusi memasuki daerah *Centaurs*. Ada empat objek yang sempat memasuki daerah *Mars-Crossers*. Setelah mencapai 1 juta tahun (Gambar 3-1 panel bawah) ditemukan objek *Centaurs* dengan jumlah sangat sedikit daripada keadaan awal (Gambar 3-1 panel atas). Beberapa di antaranya ada yang berasal dari SDOs. Pada akhir evolusi ini ada 5 objek yang menempati daerah *Mars-Crossers* dengan 4 objek di antaranya memiliki orbit yang sangat lonjong (eksentrisitas besar), yang berada bahkan lebih jauh dari Neptunus.

Evolusi orbit objek *Artifisial* menunjukkan kecenderungan jelajah orbit yang sama dengan objek *Real*. Gambar 3-2 memperlihatkan evolusi orbit set *Artifisial* 3 sebagai sampel evolusi orbit objek *Artifisial*. Banyaknya objek yang terlempar ke tepian tata surya memperkuat hasil yang telah diketahui sebelumnya (Morbidelli 2004). Pada akhir evolusi (1 juta tahun) objek resonansi yang berada pada resonansi orbit selain 3:2- dan 2:1-Neptunus tetap berada pada daerah resonansinya masing-masing. Hal ini menunjukkan bahwa daerah resonansi orbit 5:3-, 7:4-, dan 5:2-Neptunus lebih stabil daripada daerah resonansi orbit 3:2- dan 2:1-Neptunus dalam waktu satu juta tahun. Objek pada daerah resonansi 3:2-Neptunus paling tidak stabil pada rentang evolusi satu juta tahun. Hasil ini memberi petunjuk bahwa objek pada daerah resonansi 3:2-Neptunus dapat menjadi salah satu reservoir bagi SDOs dan *Centaurs*, yang pada evolusi orbit selanjutnya dapat menjadi objek keluarga Jupiter (JFCs). Hal ini menunjang hasil yang diperoleh oleh Morbidelli (1997) yang menyatakan bahwa asal mula objek keluarga Jupiter adalah objek yang berasal dari daerah resonansi orbit 3:2-Neptunus.

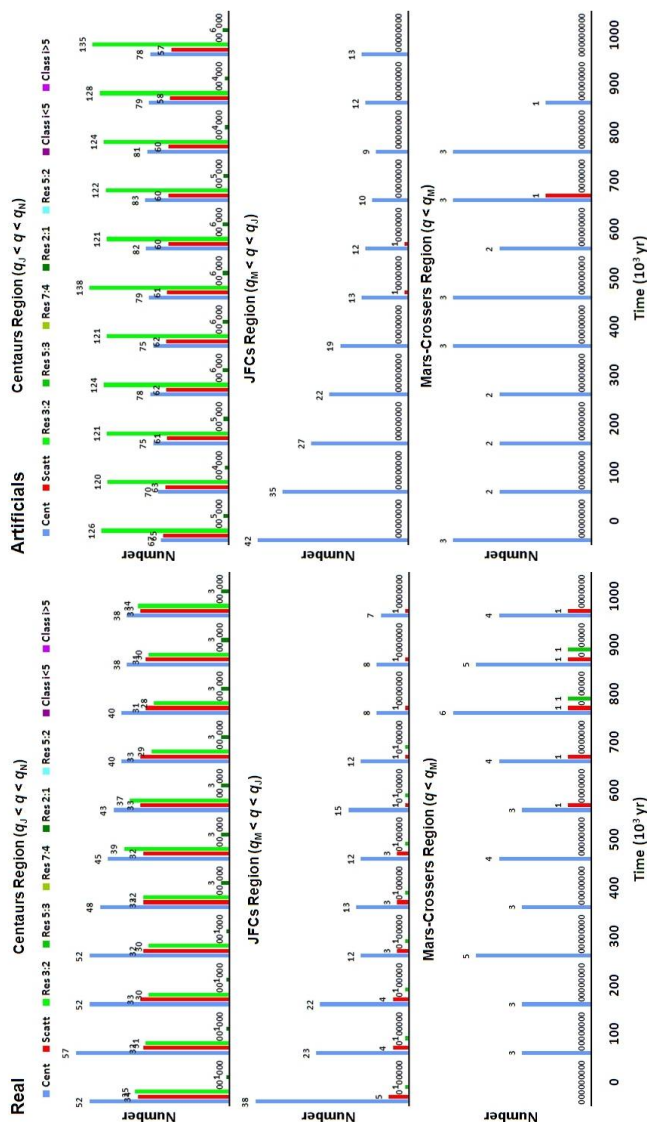


Gambar 3-2: Sama seperti Gambar 3-1 namun untuk objek Artificial Set 3 yang diambil sebagai sampel

Kecenderungan jejak evolusi orbit semua set Artificial *Centaurs* dan Trans-Neptunus memperlihatkan hasil yang seragam. Analisis yang berkaitan dengan evolusi jumlah objek pada ketiga daerah yang ditinjau disampaikan dalam bentuk histogram (Gambar 3-3). Histogram ini merupakan kumulatif untuk cuplikan waktu evolusi setiap 1×10^5 tahun.

Histogram pada Gambar 3-3 panel kiri (*Real*) dan kanan (Artifisial) menunjukkan tren yang praktis sama. Kontributor dominan pada daerah *Centaurs* berasal dari objek resonan 3:2-Neptunus dan SDOs. Sangat sedikit kontribusi objek resonan 2:1-Neptunus pada daerah ini. Sedangkan untuk objek *Real*, kontributor dominan adalah SDOs. Perbedaan ini disebabkan oleh sampel objek resonan 3:2-Neptunus pada keempat data set Artifisial jauh lebih banyak daripada objek *Real*. Secara umum dapat dikatakan bahwa objek pada SDOs dan resonan 3:2-Neptunus berkontribusi penting pada daerah ini.

Kontributor dominan pada daerah JFCs adalah objek yang berasal dari daerah *Centaur*s. Tren ini praktis sama untuk sampel objek Artifisial dan *Real*. Pada beberapa kasus dijumpai ada objek yang berasal dari SDOs. Hasil ini menunjang hasil yang telah diketahui sebelumnya bahwa objek keluarga Jupiter berasal dari *Centaur*s (Levison dan Duncan 1997). Objek-objek ini secara umum memiliki orbit yang lonjong di bawah pengaruh Jupiter, sehingga karenanya lebih dikenal sebagai JFCs, yang dapat saja permukaannya tetap aktif sepanjang evolusi yang berasal dari daerah *Centaur*s.



Gambar 3-3: Histogram kumulatif jumlah objek *Real* (kiri) dan Artifisial-total (kanan) pada tiga daerah orbital yang ditinjau untuk setiap 1×10^5 tahun. Angka di atas bar histogram menyatakan jumlah objek

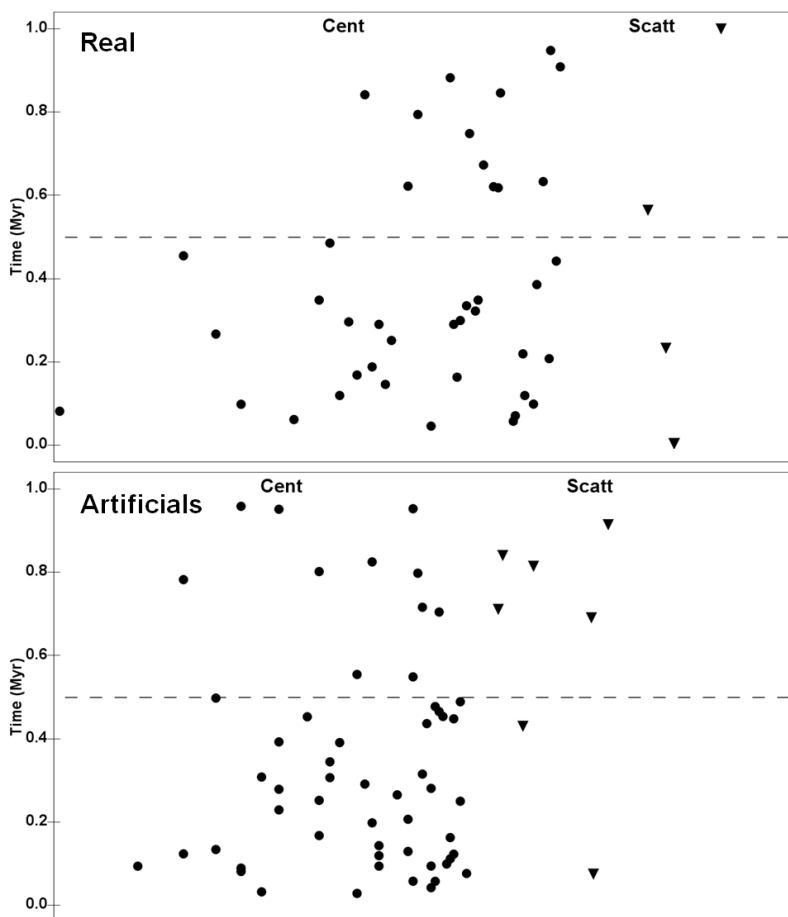
Kontributor dominan pada daerah *Mars-crossers* adalah objek yang berasal dari *Centaurs*. Pada satu kasus dijumpai ada yang berasal dari daerah SDOs. Jumlah objek seperti ini sangat sedikit. Hasil ini menunjang hasil yang telah diduga sebelumnya bahwa *Mars-crossers* atau *Near-Earth Asteroids* dapat berasal dari sejumlah kecil fraksi *Centaurs* atau SDOs (Bottke et al. 2002).

Satu hal menarik yang diperoleh dari panel kiri dan kanan Gambar 3-3 adalah adanya kecenderungan bahwa jumlah objek resonan 3:2-Neptunus (warna hijau) yang berada pada daerah *Centaurs* meningkat saat 5×10^5 tahun. Meskipun peningkatan jumlah hanya $\leq 10\%$, namun hal ini terjadi pada setiap data set, baik untuk objek *Real* maupun *Artifisial*. Sebagai tambahan, pada akhir evolusi jumlah populasi objek resonan 3:2-Neptunus pada daerah ini umumnya meningkat lagi. Hasil ini memberi indikasi bahwa suatu siklus 5×10^5 tahun tampaknya perlu untuk ditelaah lebih lanjut apakah merupakan suatu fenomena nyata atau merupakan artefak integrasi orbit secara sistematis.

Gambar 3-4 memperlihatkan bahwa objek yang dominan terlempar ke tepian tata surya adalah objek yang berasal dari *Centaurs*. Sedangkan objek yang berasal dari SDOs sangat sedikit yang terlempar sepanjang waktu evolusi satu juta tahun. Tidak ditemukan objek yang terlempar berasal dari klasifikasi lainnya. Dapat dikatakan bahwa objek klasifikasi lain itu berevolusi masih di dalam klasifikasinya atau berpindah ke klasifikasi lainnya. Umumnya perpindahan klasifikasi itu adalah yang berasal dari kelas ROs ke SDOs atau dari SDOs ke *Centaurs*. Gambar 3-4 ini menunjukkan juga bahwa objek *Centaurs* yang terlempar jauh lebih banyak terjadi pada waktu paruh pertama perhitungan evolusi. Kecenderungan sebaliknya terjadi pada objek SDOs. Namun demikian hal ini belum merupakan kesimpulan definitif karena sampel objek SDOs yang terlempar itu masih sangat sedikit.

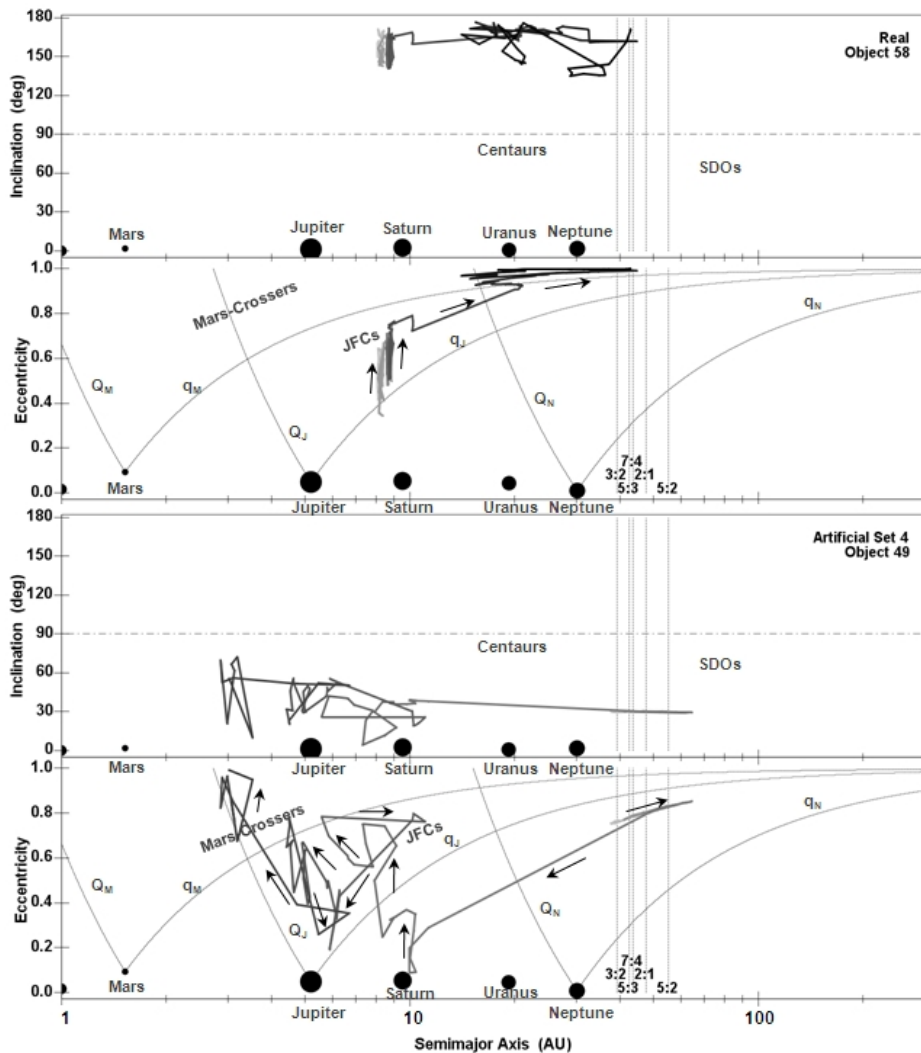
3.2 Sampel Jelajah Evolusi Orbit

Gambar 3-5 panel atas memperlihatkan jejak evolusi orbit objek yang berasal dari *Centaurs* yang dalam evolusinya sempat lama berada di daerah antara Jupiter dan Saturnus (warna abu-abu yang bergradasi menjadi hitam), untuk kemudian menjadi *Mars-Crossers* dengan orbit yang sangat lonjong. Panel bawah pada gambar ini menunjukkan evolusi orbit yang *chaotic* dari kelas SDOs pada set *Artifisial*. Objek ini berevolusi menjadi *Mars-Crosser* setelah masuk ke daerah *Centaurs* dengan cepat dan kemudian mendapatkan banyak perturbasi Jupiter di daerah JFCs.



Gambar 3-4: Kala hidup objek *Centaurs* dan SDOs untuk objek *Real* (atas) dan *Artificial*-total (bawah). Objek *Centaurs* lebih banyak terlempar pada paruh pertama perhitungan evolusi orbit

Ragam modus jejak evolusi lainnya banyak ditemukan (lebih rinci lihat Hudaya 2009), misalnya evolusi orbit objek yang berasal dari SDOs yang dalam evolusinya sempat menjadi *Centaurs* dan kemudian menjadi ESDOs. Modus lainnya adalah pada ROs. Objek resonan 3:2-Neptunus mula-mula berinteraksi dengan Neptunus pada perihelionnya. Interaksi ini menyebabkan objek mendekati Neptunus mengikuti kurva perihelion sampai menyeberang menjadi *Centaurs*, dan terus mendapat gangguan Neptunus pada aphelionnya. Sementara itu ada ROs (misalnya 3:2-Neptunus) yang menyeberang menjadi klasifikasi ROs lainnya (7:4- dan 5:3-Neptunus). Hal ini dikenal dengan fenomena *resonance hopping*. Tetapi ada pula objek resonan 3:2-Neptunus yang tetap stabil pada lokasinya meskipun sering mendapat perturbasi Neptunus pada perihelionnya.



Gambar 3-5: Sampel jelajah orbit *retrograde* ($i > 90^\circ$) kelas *Centaurs* (atas) untuk objek *Real* dan objek *Artifisial* (bawah) untuk kelas SDOs. Gradasi warna dari abu-abu ke hitam bersesuaian dengan waktu evolusi. Keterangan gambar sama dengan pada Gambar 3-1

4 KESIMPULAN

Telaah evolusi orbit *Centaurs* dan Trans-Neptunus menunjukkan bahwa orbit objek pada daerah *Centaurs* sangat kompleks dan *chaotic* akibat banyak mendapat gangguan planet Jovian. Sejumlah besar objek terlempar ke tepian tata surya pada paruh pertama evolusi. Objek *Centaurs* yang terlempar jauh lebih banyak daripada SDOs.

Sangat sedikit ($\leq 1\%$) fraksi objek *Centaurs* dan Trans-Neptunus yang berhasil menjadi *Mars-Crossers*. Ada indikasi bahwa jumlah

Centaurs yang berasal dari objek resonan 3:2-Neptunus meningkat pada setiap 5×10^5 tahun. Namun hal ini masih perlu ditelaah lebih mendalam.

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

- Bernstein, G. M.; D. E. Trilling; R. L. Allen; M. E. Brown; M. Holman; and R. Malhotra, 2004. *The Size Distribution of Trans-Neptunian Bodies*, *Astron. J.*, 128, 1364-1390.
- Bodenheimer, P.; G. P. Laughlin; M. Rozyezka; and H. W. Yorke, 2007. *Numerical Methods in Astrophysics*. Taylor & Francis, New York.
- Bottke, W. F.; A. Morbidelli; R. Jedicke; J.-M. Petit; H. F. Levison; P. Michel; and T. S. Metcalfe, 2002. *Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects*, *Icarus*, 156, 399-433.
- Delsanti, A.; and D. C. Jewitt, 2006. *The Solar System beyond the Planets*. in Ph. Blondel and J. Mason (eds.) *Solar System Update*, Springer-Praxis, 267-293.
- Hudaya, Z., 2009. *Tugas Akhir Sarjana*, Institut Teknologi Bandung.
- Jewitt, D. C.; and J. X. Luu, 1992. *IAU Circ.* No. 5611.
- Levison, H. F.; and H. J. Duncan, 1994. *The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets*, *Icarus*, 108, 18-36.
- Levison, H. F.; and H. J. Duncan, 1997. *From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets*, *Icarus*, 127, 13-32.
- Morbidelli, A., 1997. *Chaotic Diffusion and the Origin of Comets from the 2/3 Resonance in the Kuiper Belt*, *Icarus*, 127, 1-12.
- Morbidelli, A., 2004. *How Neptune Pushed the Boundaries of Our Solar System*, *Science*, 306, 1302-1304.
- Murray, C. D.; and S. F. Dermott, 2005. *Solar System Dynamics*, Cambridge Univ. Press, New York