

Kandidat Obyek Ko-orbital Tipe Non-Trojan dengan Jupiter

B. Dermawan^{1*}

¹KK Astronomi, FMIPA – ITB, Bandung, Indonesia
*E-mail: budider@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Pada Masalah Tiga-benda Terbatas ada tiga tipe gerak ko-orbital dengan planet induk, yaitu *horseshoe*, *tadpole*/trojan, dan *quasi-satellite*. Kelompok asteroid Trojan telah dikenal bergerak *tadpole* dengan Jupiter. Kinoshita dan Nakai (2007) menemukan dua komet dan dua asteroid tipe *quasi-satellite* dengan Jupiter, sedangkan obyek tipe *horseshoe* belum ditemukan. Pekerjaan ini bertujuan untuk mencari kandidat baru obyek yang bergerak ko-orbital tipe non-Trojan (*horseshoe* dan *quasi-satellite*) dengan Jupiter. Asteroid, komet keluarga-Jupiter, dan Centaur yang berada di dalam daerah bola pengaruh gravitasi Jupiter menjadi target pencarian melalui integrasi numerik gerak Newtonian selama 10^3 tahun dengan menggunakan integrator SWIFT (Levison dan Duncan, 1994). Sepuluh asteroid (2006 QL₃₉, 2003 WG₁₆₆, 2008 GN₁, 2010 NN₁₀₅, 2010 EG₁₅₀, 2010 OY₄₁, 2010 MP₃₅, 2010 MM₃₈, 2010 BT₁₄, 2010 KO₁₂₆), tiga komet (200P/Larsen, P/2007 T₄ (Gibbs), P/2009 U₄ (McNaught)), dan satu Centaur (2011 KS₂₁) memperlihatkan tipe ko-orbital non-Trojan. Ada sejumlah asteroid dan komet lainnya bergerak non-Trojan, namun singkat. Tinjauan stabilitas gerak ko-orbital non-Trojan pada kandidat baru ini memerlukan waktu integrasi yang lebih panjang ($\sim 10^4$ tahun).

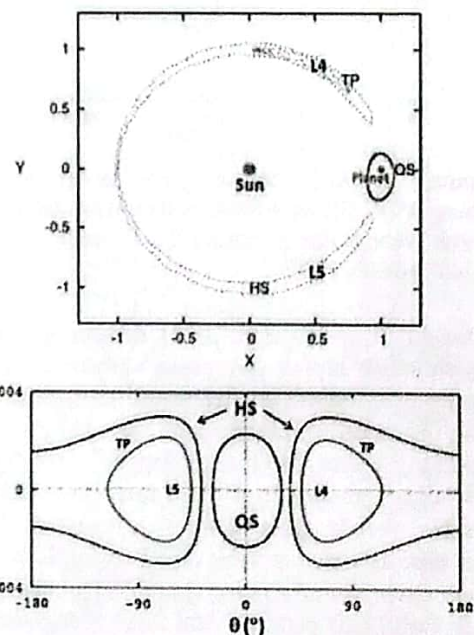
Kata Kunci: Gerak Ko-orbital – Masalah Tiga-benda Terbatas – Jupiter

1 PENDAHULUAN

Lebih dari satu abad Trojan telah dikenal sebagai obyek ko-orbital dengan Jupiter, yang dinamika orbitnya bertipe *tadpole* (TP). Gerak ko-orbital ini merupakan lingkup solusi Masalah Tiga-benda Terbatas. Selain tipe trojan/*tadpole*, terdapat tipe *horseshoe* (HS) dan *quasi-satellite* (QS). Pola gerak ko-orbital ini akan lebih tampak bila dipresentasikan dalam kerangka bergerak (atau berotasi) dan pada diagram (α, θ) (Gambar 1). Besaran α adalah jarak relatif obyek ke planet induk terhadap orbit planet, dan θ adalah selisih *mean-longitude* obyek terhadap planet induknya. Dinamika obyek ko-orbital dapat pula berbentuk pola gabungan dua atau bahkan tiga tipe (Gambar 2, Namouni 1999), yang berkaitan dengan energi orbit obyek di sekitar planet induk.

Kinoshita dan Nakai (2007) menemukan empat obyek ko-orbital tipe QS dengan Jupiter, yaitu: 2 komet [P/2003 WC₇ (LINEAR-Catalina) dan P/2002 AR₂ (LINEAR)], dan 2 asteroid [2001 QQ₁₉₉ dan 2004 AE₉]. Obyek non-Trojan tipe HS belum ditemukan di Jupiter. Jumlah obyek ko-orbital non-Trojan ini jauh lebih sedikit dibandingkan ribuan Trojan di sekitar L4 dan L5 Jupiter (Gambar 1).

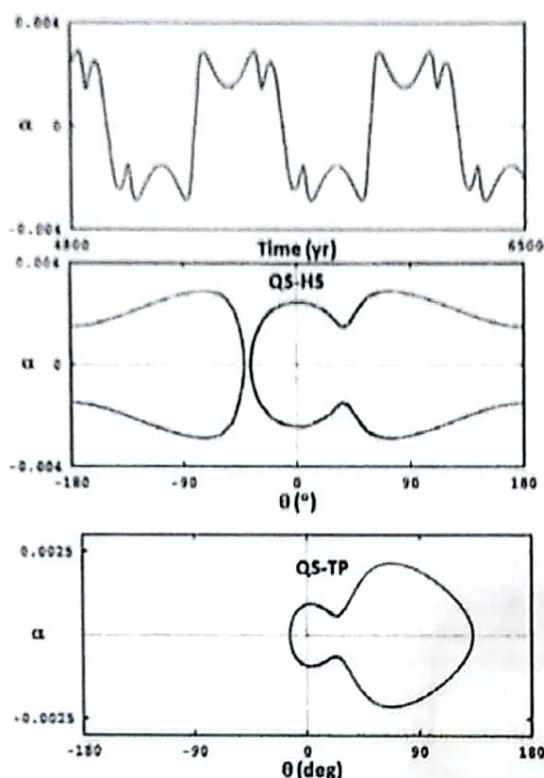
Telaah ini memaparkan hasil survey numerik kandidat baru tipe non-Trojan dengan Jupiter (HS, QS, atau gabungannya termasuk dengan TP). Data dan metode integrasi disampaikan pada Bagian 2, hasil dan diskusi di Bagian 3, dan ditutup dengan Kesimpulan di Bagian 4.



Gambar 1. Gerak ko-orbital tipe TP, HS, dan QS pada kerangka bergerak/berotasi XY (atas, Mikkola et al. 2006) dan gerak ketiga tipe tsb pada diagram (α, θ) (bawah, Namouni 1999).

2 DATA DAN METODE INTEGRASI

Obyek ko-orbital memiliki periode orbit yang praktis sama dengan planet induknya. Survey dinamika orbit obyek ko-orbital mengambil batasan daerah yang berada dalam bola pengaruh gravitasi Jupiter, yaitu annulus sebesar $(m_j/3M_s)^{1/3} \approx$



Gambar 2. Atas: contoh gerak ko-orbital tipe gabungan QS-HS pada diagram (α, waktu) dan (α, θ) . Bawah: contoh tipe gabungan QS-TP pada diagram (α, θ) (Namouni 1999).

0.068 AU (Connors et al. 2005), dengan m_J dan M_S adalah massa Jupiter dan massa Matahari. Dengan menganggap bahwa Jupiter memiliki nilai elemen orbit setengah sumbu-panjang (a) yang tetap sepanjang waktu integrasi orbit pada pekerjaan ini (10^3 tahun), maka obyek yang memenuhi batasan tersebut berada pada $4.84 \leq a$ (AU) ≤ 5.56 . Ekstraksi data elemen orbit obyek dari JPL-NASA *Small Body Search Engine* (http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi) pada 28 Juni 2011 menghasilkan 152 obyek dengan rincian 118 asteroid, 29 komet keluarga-Jupiter, dan 5 Centaur. Ketiga kelas ini merupakan kelas dinamika yang secara spasial berada dekat dengan orbit Jupiter. Seluruh data elemen orbit obyek, semua planet, dan Bulan dihitung untuk epoch yang sama, MJD 55600.

Persamaan gerak Newtonian untuk N -benda digunakan untuk mengetahui jelajah orbital semua obyek, dengan melibatkan semua planet dan Bulan sebagai benda pengganggu gerak 2-benda (Matahari-obyek). Obyek diasumsikan *massless* dan sesamanya tidak ada interaksi gravitasional. Digunakan algoritma standar pada penyelesaian

numerik persamaan gerak tersebut, yakni metode Bulirsch-Stoer (Bodenheimer et al. 2007), yang terdapat pada paket integrator Swift (Levison dan Duncan, 1994). Sepanjang 10^3 tahun waktu integrasi ini digunakan step integrasi 10^{-3} tahun yang dipandang sangat memadai, bahkan untuk benda dengan periode orbit terpendek (Merkurius) yang terlibat dalam sistem yang konservatif ini.

3 HASIL DAN DISKUSI

Sepanjang waktu integrasi 10^3 tahun didapati sekurangnya 14 obyek, sekitar 9% ($= 14/152$), memperlihatkan pola gerak ko-orbital non-Trojan. Pola gerak ko-orbital kandidat ini adalah tunggal dan gabungan, yang meliputi semua kelas yang disurvei pada daerah spasial di dekat Jupiter. Rincian kandidat tersebut adalah 10 asteroid, 3 komet keluarga-Jupiter, dan 1 Centaur. Dari total 14 kandidat, 8 di antaranya menunjukkan pola ko-orbital tunggal, sedangkan sisanya (6 kandidat) pola gabungan. Penjelasan dan diskusi pada bagian ini disampaikan berdasarkan pola gerak ko-orbital tunggal dan gabungan.

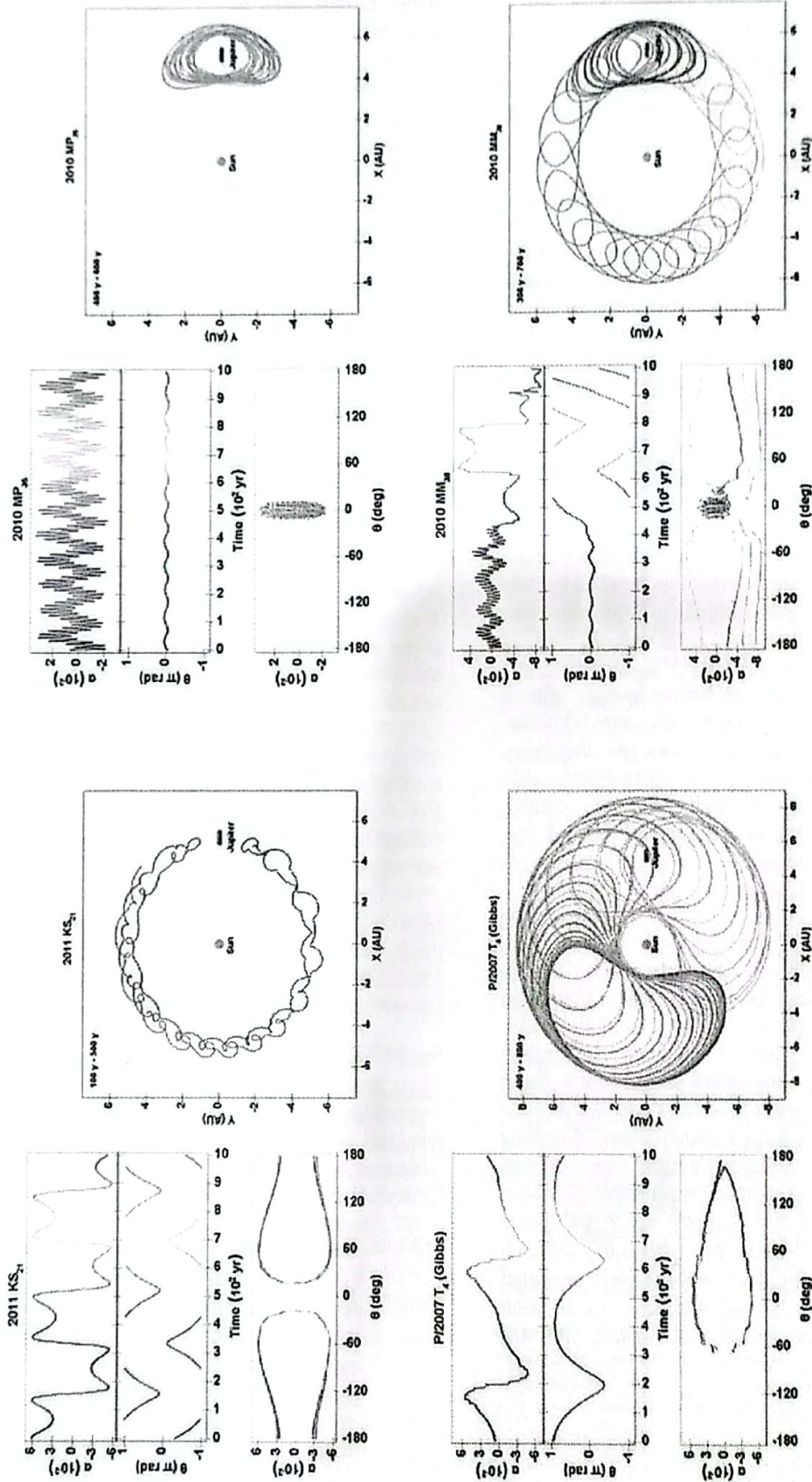
3.1 Pola Ko-orbital Tunggal

Tipe QS mendominasi temuan gerak ko-orbital non-Trojan pada kelompok ini. Dari 8 pola gerak ko-orbital tunggal, 6 di antaranya adalah tipe QS, sedangkan tipe HS ada 2. Obyek ko-orbital tipe QS terdiri dari 5 asteroid [2003 WG₁₆₆, 2008 GN₁, 2010 EG₁₅₀, 2010 OY₄₁, 2010 MP₃₅], dan 1 komet [P/2009 U₄ (McNaught)]. Sementara itu, 2 obyek ko-orbital tipe HS terdiri dari 1 asteroid [2010 KO₁₂₆], dan 1 Centaur [2011 KS₂₁]. Gambar 3 panel atas menampilkan sampel pola ko-orbital tunggal pada diagram (X, Y) dan (α, θ) untuk tipe QS asteroid 2010 MP₃₅ (atas-kiri) dan tipe HS Centaur 2011 KS₂₁ (atas-kanan).

Pekerjaan ini mengkonfirmasi temuan 4 obyek tipe QS oleh Kinoshita dan Nakai (2007). Empat obyek tersebut termasuk dalam 152 obyek survey. Selain itu, 22 asteroid ditemukan memiliki tipe TP pada daerah L4 dan L5, namun hal ini bukan menjadi topik pembahasan di sini.

3.2 Pola Ko-orbital Gabungan

Pola ko-orbital gabungan memperlihatkan gerak yang lebih kompleks, yang merupakan gabungan dari beberapa pola tunggal seperti pada Gambar 2. Pola ini dijumpai pada 6 obyek: 4 tipe QS-HS dan 2 tipe QS-TP(-QS). Tipe QS-HS terdiri dari 3 asteroid [2006 QL₃₉, 2010 NN₁₀₅ dan 2010 MM₃₈], dan 1 komet keluarga-Jupiter [200P/Larsen]. Sementara itu, tipe QS-TP(-QS)



Gambar 3. Sampel pola ko-orbital tunggal [QS (atas-kiri) dan HS (atas-kanan)], dan pola ko-orbital gabungan [QS-HS (bawah-kiri) dan QS-TP (bawah-kanan)], yang masing-masingnya ditampilkan pada diagram kerangka bergerak/berotasi (X, Y) dan diagram (α, θ). Gradasi warna menyatakan waktu (Time). Warna pada plot (X, Y), dengan waktu integrasi tertera pada pojok kiri-atas dalam kotak XY, bersesuaian dengan waktu pada plot (α, θ).

ditemukan pada 1 asteroid [2010 BT₁₄] dan 1 komet keluarga-Jupiter [P/2007 T₄ (Gibbs)]. Gambar 3 panel bawah memperlihatkan sampel pola ko-orbital gabungan pada diagram (X,Y) dan (α,θ) untuk tipe QS-HS asteroid 2010 MM₃₈ (panel bawah-kiri) dan tipe QS-TP komet P/2007 T₄ (Gibbs) (panel bawah-kanan).

Survey dinamika orbital ini menemukan sekurangnya 23 obyek lainnya (asteroid dan komet) mengalami pola ko-orbital gabungan yang jauh lebih singkat daripada waktu integrasi. Menarik untuk disampaikan bahwa pola gabungan tipe TP-TP ditemukan pula. Artinya dimungkinkan perpindahan obyek antar titik triangular Lagrange. Asteroid 2010 BY₃₈ memperlihatkan perpindahan L5-L4-L5, yang melintasi titik L3. Serupa halnya dengan perpindahan asteroid 241944 (2002 CU₁₄₇) pada L4-L5, namun melintasi daerah QS.

Pola ko-orbital gabungan ini sejatinya ditemukan lebih banyak daripada pola tunggal karena satu pola tunggal dapat terjadi dalam tempo ratusan tahun saja untuk kemudian berubah ke pola tunggal atau gabungan yang lain. Obyek semacam ini misalnya adalah asteroid 2007 GH₆, 2010 BP₈₃, 2010 HX₅₄, 2010 KX₈₃, 2010 HV₄₅, 2010 FE₇₅, dan 2010 OZ₁₂₅. Perlu dicatat bahwa hampir seluruh obyek survey memiliki eksentrisitas orbit lebih dari 0.3, yang tidak dapat dikatakan lingkaran. Akibatnya pola ko-orbital gabungan lebih memungkinkan terjadi daripada pola tunggal. Melalui tinjauan ini, telaah kestabilan gerak ko-orbital menjadi penting.

3.3 Kestabilan Gerak Ko-orbital

Mendapati jumlah obyek ko-orbital non-Trojan yang jauh lebih sedikit daripada Trojan, memberikan indikasi bahwa skala waktu kestabilan gerak ko-orbital tipe non-Trojan jauh lebih pendek daripada Trojan. Waktu integrasi 10^3 tahun merupakan waktu yang relatif singkat untuk dapat menjamin bahwa gerak ko-orbital non-Trojan pada kandidat yang ditemukan adalah stabil. Kinoshita dan Nakai (2007) memperlihatkan bahwa obyek QS yang ditemukan mereka hanya dapat dikatakan stabil pada -5×10^3 sampai $+2 \times 10^3$ tahun terhadap epoch. Hal ini diperoleh setelah menganalisis semua jejak orbital dari sejumlah *orbital clones* untuk masing-masing obyek yang diintegrasikan mundur dan maju dalam orde 10^5

tahun. Berarti orde waktu integrasi yang cukup untuk memeriksa kestabilan ini adalah 10^4 tahun.

Pada pekerjaan ini pemeriksaan dinamika orbit 152 obyek survey untuk waktu integrasi -5×10^3 sampai $+5 \times 10^3$ tahun terhadap epoch telah dilakukan. Hasil awal yang diperoleh memperlihatkan bahwa sejumlah obyek menunjukkan karakter stabil, namun tidak demikian bagi sejumlah obyek lainnya. Untuk melengkapi telaah kestabilan ini, selain memperpanjang waktu integrasi, telah dilakukan pula perhitungan integrasi orbit *orbital clones* untuk kandidat obyek yang ditemukan, mengikuti skema pembuatan *orbital clones* oleh Kinoshita dan Nakai (2007). Hasil pemeriksaan jelajah *orbital clones* ini belum selesai, yang merupakan tahap yang lebih komprehensif sebagai lanjutan pekerjaan yang dipaparkan di sini.

4 KESIMPULAN

Telah dilakukan survey numerik untuk menemukan kandidat baru obyek ko-orbital non-Trojan dengan Jupiter. Dari 152 obyek asteroid, komet keluarga-Jupiter, dan Centaur ditemukan 14 kandidat obyek ko-orbital non-Trojan. Rinciannya adalah 10 asteroid [2006 QL₃₉, 2003 WG₁₆₆, 2008 GN₁, 2010 NN₁₀₅, 2010 EG₁₅₀, 2010 OY₄₁, 2010 MP₃₅, 2010 MM₃₈, 2010 BT₁₄, 2010 KO₁₂₆], 3 komet [200P/Larsen, P/2007 T₄ (Gibbs), P/2009 U₄ (McNaught)], dan 1 Centaur [2011 KS₂₁], yang terbagi ke dalam pola tunggal (QS dan HS) dan gabungan (QS-HS dan QS-TP(-QS)).

Sejumlah asteroid dan komet ko-orbital lainnya juga ditemukan namun hanya terjadi dalam waktu yang singkat. Untuk itu diperlukan telaah kestabilan gerak ko-orbital yang lebih komprehensif (waktu integrasi $\sim 10^4$ tahun).

5 PUSTAKA

- Connors, M., Stacey, G., Brassier, R., dan Wiegert, P. 2005, *Planet. Space Sci.*, 53, 617-624
- Kinoshita, H. dan Nakai, H. 2007, *Celestial Mech. Dyn. Astron.*, 98, 181-189
- Levison, H. F. dan Duncan, M. J. 1994, *Icarus*, 108, 18-36
- Mikkola, S. Innanen, K., Wiegert, P. et al. 2006, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 369, 15-24
- Namouni, F. 1999, *Icarus*, 137, 293-314