

Dinamika Lompatan-Orbital Asteroid pada Daerah Resonansi Gerak-rerata 3:2 dan 2:3 Bumi

R. Rahida^{1*} dan B. Dermawan²

¹Program Studi Astronomi, FMIPA – ITB, Bandung, Indonesia

²KK Astronomi, FMIPA – ITB, Bandung, Indonesia

*E-mail: rika.rahida@gmail.com

ABSTRAK

Dinamika lompatan-orbital pada mulanya diketahui terjadi pada komet 39P/Oterma dengan Jupiter yang melompat dari resonansi gerak-rerata 2:3 menuju 3:2 Jupiter (Belbruno dan Marsden, 1997). Lompatan ini dapat saja gagal sehingga benda-kecil (komet atau asteroid) akan menabrak planet induknya, seperti komet D/Shoemaker-Levy 9 yang menabrak Jupiter dan Asteroid 2008 TC₃ yang menabrak Bumi (Jenniskens et al., 2009). Pada penelitian ini dilakukan integrasi numerik gerak Newtonian selama 200 tahun ke depan dengan integrator SWIFT (Levison dan Duncan, 1994), untuk melihat dinamika lompatan-orbital obyek artifisial yang berasal dari daerah resonansi gerak-rerata 3:2 dan 2:3 Bumi. Hasil integrasi menunjukkan bahwa asteroid pada daerah resonansi dapat mengalami lompatan-orbital (~0.25 %) dan dapat pula gagal sehingga menabrak Bumi (~0.1%). Asteroid yang mengalami lompatan-orbital dengan Bumi cenderung memiliki nilai eksentrisitas orbit 0.3, berada di ekliptika, dekat dengan garis nodal orbit, dan di sekitar perihelion orbitnya. Dinamika lompatan-orbital sangat jarang terjadi, namun perturbasi planet dapat meningkatkan peluang terjadinya fenomena tersebut

Kata Kunci: Asteroid – Resonansi Gerak-rerata – Lompatan-orbital

1 PENDAHULUAN

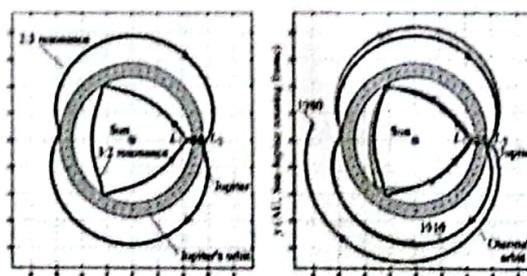
Resonansi gerak-rerata merupakan salah satu dinamika gerak benda kecil di Tata Surya. Resonansi ini merupakan keteraturan lokasi orbital tertentu pada populasi benda kecil yang dipengaruhi kuat oleh planet. Hal ini disebabkan oleh adanya kesesuaian gerak antara planet dan benda kecil yang dikenal sebagai lokasi yang beresonansi dengan planet. Lokasi resonansi ini terdapat di sepanjang Tata Surya dengan letak dan kekuatan resonansinya telah dipelajari dengan baik (Gallardo, 2006). Terdapat fenomena perpindahan dari satu resonansi gerak-rerata ke resonansi yang lain, yang dikenal sebagai *resonance-orbital-hopping* atau lompatan-orbital.

Lompatan-orbital merupakan proses yang terjadi ketika benda kecil bergerak masuk dan keluar daerah *fuzzy boundary* (f_b), sehingga tertangkap secara lemah (*weak capture*) dengan planet induk, pada saat terjadi resonansi antara benda kecil dengan planet induk. Selain itu, pada saat proses tersebut terjadi, energi sistem (E) bernilai negatif. Berikut ini persamaan energi sistem, $E = \frac{1}{2}|v|^2 - Gm/|x|$ dengan G adalah konstanta gravitasi, m adalah massa planet induk, sedangkan x dan v adalah vektor posisi dan kecepatan benda kecil terhadap planet induk. Dinamika lompatan-orbital sangat jarang terjadi karena mekanismenya yang sangat kompleks. Dinamika lompatan-orbital dibagi menjadi dua

kategori, yaitu hop jika ($E < 0$) dan quasi-hop jika ($E > 0$) (Belbruno dan Marsden, 1997).

Pada mulanya dinamika lompatan-orbital ini teramat dari gerak komet di daerah gangguan gravitasi yang kuat di sekitar Jupiter. Salah satu contohnya adalah komet 39P/Oterma yang teramat mengalami perpindahan dari resonansi 2:3 menjadi 3:2 Jupiter (Belbruno dan Marsden, 1997). Jejak orbit komet 39P/Oterma tersebut ditunjukkan seperti pada Gambar 1.

Dinamika lompatan-orbital bisa saja gagal terjadi sehingga menabrak planet induknya, seperti pada komet D/Shoemaker-Levy 9 yang menabrak Jupiter dan asteroid 2008 TC₃ yang menabrak Bumi (Jenniskens et al. 2009).



Gambar 1. Orbit 39P/Oterma dalam kerangka berotasi. Panel kiri berdasarkan teoritis (garis tebal hitam berpanah) dan panel kanan diturunkan empiris dari hasil pengamatan (merah) yang disuperposisi dengan teoritis (Koon et al. 2000).

2 DATA DAN METODE PERHITUNGAN

Pada pengolahan data, penulis menentukan batasan orbital terlebih dahulu, sebelum kemudian melakukan survei, yaitu (1) memilih daerah resonansi gerak-rerata 3:2 dan 2:3 Bumi dengan pelebaran setengah sumbu-panjang $\Delta a = 0.01$ AU; (2) nilai argumen perihelion, $\omega = \pi(1 - n'/n)$ dengan n' dan n adalah nilai integer yang bersesuaian dengan nilai resonansi gerak-rerata.

Dalam pengolahan data ini digunakan data obyek artifisial dengan kriteria elemen orbitnya ditentukan dengan melakukan kombinasi nilai-nilai elemen orbit dalam rangka survei orbital yang ditunjukkan pada Tabel I. Pengolahan data dilakukan secara numerik yaitu dengan metode perhitungan numerik standar *Bulirsch-Stoer* (BS), yang memiliki keakuratan yang tinggi (Bodenheimer et al. 2007). Dalam pekerjaan ini, tingkat kesalahan relatif mencapai $\leq 10^{-13}$. Perhitungan dilakukan untuk waktu integrasi 200 tahun ke depan terhadap *epoch* MJD 55400 dengan step waktu perhitungan 10^{-3} tahun. Proses integrasi dilakukan dengan menggunakan integrator SWIFT (Levison dan Duncan, 1994). Untuk membaca hasil keluaran dari integrator SWIFT digunakan software untuk visualisasi yaitu SwiftVis. Rahida (2011) menyajikan uraian lengkap terkait data dan metode kerja.

3 HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengolahan data pada penelitian ini akan diuraikan dalam beberapa sub-bagian yang merepresentasikan tahapan pengolahan data dan analisis hasil yang didapatkan.

3.1 Survei Orbital

Pengolahan data dimulai dengan melakukan survei orbital dengan tujuan untuk mendapatkan daerah huni asteroid yang dapat mengalami dinamika lompatan-orbital. Tahapan lengkap survei yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel I, Gambar 2 menunjukkan kedudukan obyek artifisial dalam elemen orbit a terhadap eksentrisitas e dan inklinasi i pada waktu integrasi 144 tahun. Obyek pada resonansi 3:2 Bumi berwarna coklat/gelap dan pada 2:3 Bumi hijau-muda/kelabu. Garis putus-putus menunjukkan daerah resonansi sedangkan kurva berwarna menunjukkan aphelion dan perihelion planet. Lingkaran besar (biru, hijau, dan merah) adalah Venus, Bumi, dan Mars.

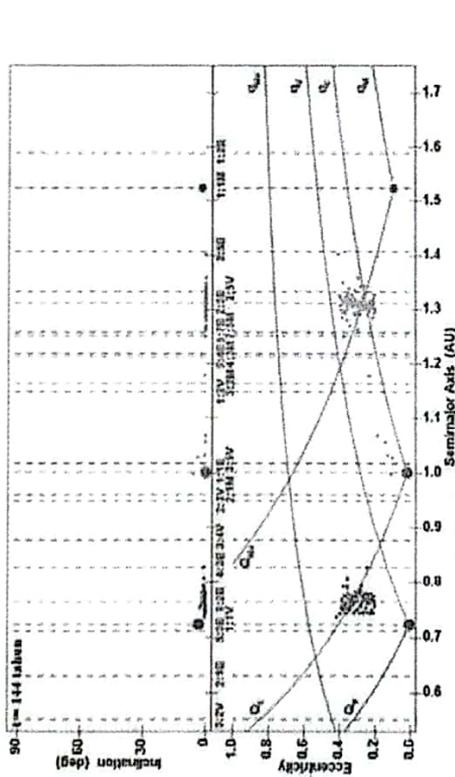
Survei orbital memberikan hasil berupa informasi kecenderungan nilai elemen orbit asteroid yang memiliki dinamika lompatan-orbital, yaitu asteroid dengan nilai e sekitar 0.3, i di sekitar ekliptika, nilai bujur *ascending node* (Ω) dan *mean anomaly* (M) sekitar 0° .

3.2 Perturbasi Planet dan Dinamika Asteroid

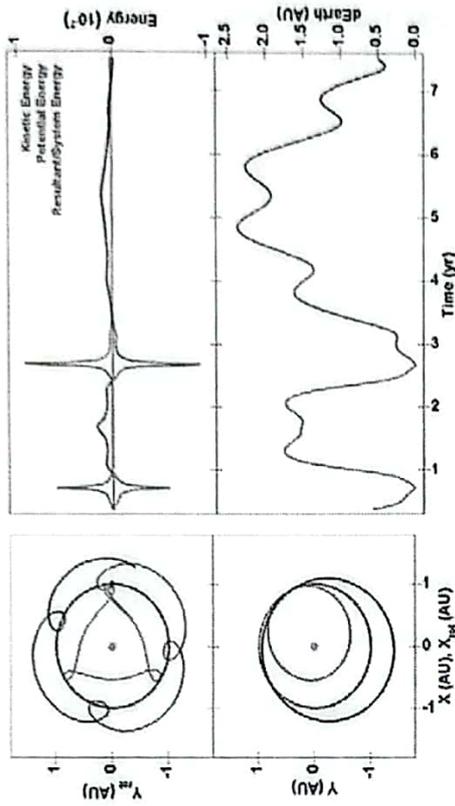
Hasil survei orbital di atas memperlihatkan kecenderungan adanya batasan nilai elemen orbit obyek artifisial yang dapat mengalami lompatan-orbital. Pada Gambar 2 tampak kedudukan obyek tersebar acak dan beragam. Jika diperhatikan lebih teliti, kedudukan obyek yang acak tersebut berada di sekitar daerah perpotongan garis perihelion dan aphelion planet Kebumian. Hal tersebut menimbulkan kecurigaan bahwa gerak acak dan beragam itu dipicu oleh gangguan gravitasional dari planet Kebumian.

Tabel I. Nilai elemen orbit obyek artifisial pada setiap survei. Subskrip \oplus menyatakan besaran untuk Bumi.

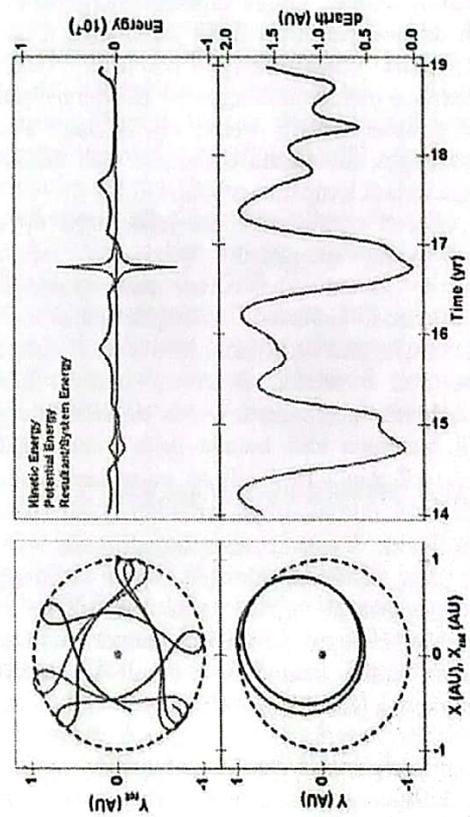
| Survei | e | i ($^\circ$) | ω ($^\circ$) | Ω ($^\circ$) | M ($^\circ$) | Jumlah |
|--------|-----------|------------------|--|-----------------------|------------------|--------|
| 1 | 0 - 0.9 | 0 - 30 | | 0 - 360 | | 200 |
| 2 | 0 - 0.9 | 0 - 30 | $\omega_{\oplus} \pm 10$ | 0 | 0 | 200 |
| 3 | 0.3 - 0.5 | 0 | $(\omega_{\oplus} - 180) \pm 10$ | 0 | 0 | 200 |
| 4 | 0.3 - 0.5 | 0 | $(\omega_{\oplus} - 180) \pm 10$ | 0 | 180 | 200 |
| 5 | 0 - 0.45 | 0 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 0 | 0 | 200 |
| 6 | 0 - 0.45 | 0 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 0 | 180 | 200 |
| 7 | 0.2 - 0.4 | 0 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 0 | 0 | 200 |
| 8 | 0.2 - 0.4 | 0 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 0 | 180 | 200 |
| 9 | 0.2 - 0.4 | 0 - 360 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 0 | 0 | 200 |
| 10 | 0.2 - 0.4 | 0 - 360 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 0 | 180 | 200 |
| 11 | 0.2 - 0.4 | 0 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 30 - 330 | 0 | 200 |
| 12 | 0.2 - 0.4 | 0 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 30 - 330 | 180 | 200 |
| 13 | 0.2 - 0.4 | 0 - 20 | $\omega_{\oplus} - \pi(1 - n'/n) \pm 10$ | 120 ± 10 | 180 ± 10 | 200 |
| 14 | 0 - 0.9 | 0 - 20 | $\pi(1 - n'/n) \pm 1.8$ | ± 1.8 | ± 1.8 | 12500 |



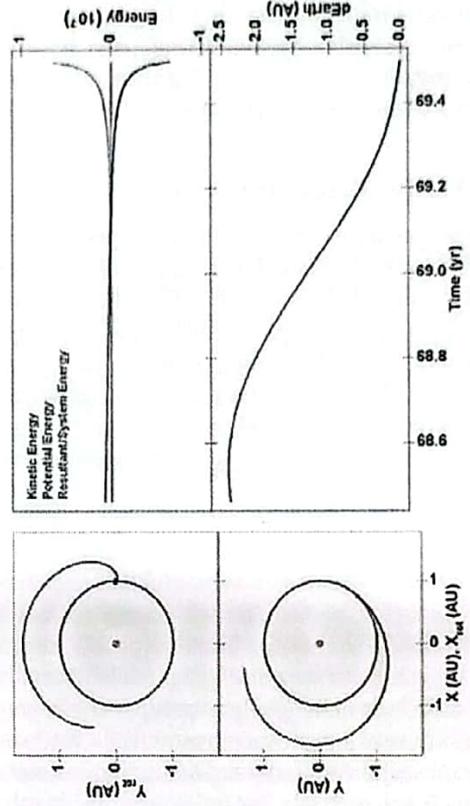
Gambar 2. Kedudukan obyek artifisial dalam elemen orbit a terhadap e dan i .



Gambar 3. Sampel jejak orbit obyek yang mengalami lompatan-orbital yang berasal dari interior (resonansi 3:2) ke eksterior (resonansi 3:4) Bumi.



Gambar 4. Sampel jejak orbit obyek yang mengalami *quasi-hop* interior-interior.



Gambar 5. Sampel jejak orbit obyek yang mengalami tabrakan yang berasal dari eksterior Bumi.

Hipotesis ini kemudian diuji dengan melakukan integrasi sejumlah obyek artifisial pada beberapa daerah perpotongan tersebut. Tahapan pengolahan ini merupakan bagian dari survei ke 14 pada Tabel 1.

3.1 Analisis Kasus yang Terjadi

Hasil integrasi obyek artifisial pada daerah perturbasi menunjukkan hasil yang beragam. Hasil tersebut antara lain adalah terjadi beberapa kasus dinamika asteroid yaitu $\sim 0.25\%$ obyek artifisial mengalami lompatan-orbital (*hop* dan *quasi-hop*); dan kurang dari 0.1% obyek artifisial mengalami tabrakan dengan planet Kebumihan.

3.1.1 Kasus Lompatan-orbital

Berikut ini diberikan sampel obyek artifisial yang mengalami *hop* (Gambar 3) dan *quasi-hop* (Gambar 4). Gambar 3 menunjukkan jejak orbit obyek (panel kiri) dan kaitan energi sistem, E dengan jarak terhadap Bumi (panel kanan). Lingkaran di pusat dan biru/gelap adalah Matahari dan Bumi. Pada kerangka berotasi (panel kiri-atas), jejak orbit awal obyek membentuk pola resonansi 3:2 (warna hijau/kelabu) yang kemudian *encounter* dengan Bumi, setelah itu pola orbitnya berubah menjadi pola resonansi 3:4 (warna hitam); lompatan-orbital terjadi pada saat orbitnya akan membentuk simpul. Untuk tinjauan energi, nilai E sejalan dengan peristiwa pada panel kiri. *Spikes-positif* pada nilai energi potensial (warna ungu/kelabu) berkaitan dengan *weak capture* pada nilai E (*spikes-negatif*, warna hijau/gelap). Pada saat itu obyek memasuki daerah fb dan berhasil sehingga terjadi lompatan-orbital.

Gambar 4 memperlihatkan jejak orbit obyek artifisial yang mengalami *quasi-hop* melalui mekanisme lompatan-resonansi dalam kerangka berotasi (panel kiri-atas), sedangkan jejak orbit pada kerangka inersial (panel kiri-bawah) dengan elemen orbit a setelah *quasi-hop* bernilai lebih kecil daripada sebelumnya. Untuk tinjauan energi, nilai E beberapa kali berada pada nilai negatif (pada ~ 14.7 dan ~ 16.7 tahun) yang bersesuaian dengan jarak minimumnya terhadap Bumi (panel kanan-bawah). *Weak capture* terjadi pada ~ 16.7 tahun yang ditandai dengan *spike* sehingga lompatan-resonansi terjadi, yaitu dari 3:2 ke 5:3 interior Bumi. Jejak obyek ini sempat melintasi daerah fb , untuk kemudian kembali ke daerah kedatangannya (fenomena *quasi-hop*).

3.1.2 Kasus Tabrakan dengan Bumi

Gambar 5 memperlihatkan sampel obyek artifisial yang mengalami tabrakan dengan Bumi, yang berasal eksterior Bumi. Pada kerangka berotasi (panel kiri-atas), jejak orbit sampel obyek yang berasal dari eksterior Bumi ini menabrak Bumi pada saat orbitnya akan membentuk simpul. Obyek ini berasal dari daerah resonansi 2:3 Bumi. Tinjauan energi pada panel kanan menunjukkan tabrakan terjadi pada ~ 69.5 tahun dengan E bernilai negatif, yang ditandai dengan nilai energi potensial menuju asimtotik pada energi kinetiknya nol. Pada saat itulah obyek gagal melewati daerah fb dan menabrak Bumi.

4 KESIMPULAN

Dari pekerjaan ini dapat disimpulkan, bahwa daerah orbital resonansi gerak-rerata 3:2 dan 2:3 Bumi merupakan salah satu daerah orbital penyuplai asteroid yang dapat mengalami lompatan-orbital ($\sim 0.25\%$) dan dapat pula gagal ($\sim 0.1\%$) dalam jangka waktu 200 tahun. Asteroid yang dapat mengalami lompatan-orbital cenderung memiliki nilai eksentrisitas sekitar 0.3, berada di ekliptika, dekat dengan garis nodal orbit, dan di sekitar perihelion orbitnya. Dinamika ini jarang terjadi, namun perturbasi planet dapat meningkatkan peluang terjadinya fenomena ini.

Ucapan Terima Kasih

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

5 PUSTAKA

- Belbruno, E. dan Marsden, B., 1997, *Astron. J.*, 113, 1433-1444.
- Bodenheimer, P., Laughlin, G. P., Rózyezka, M., dan Yorke, H. W., 2007, *Numerical Methods in Astrophysics*, Taylor & Francis, New York.
- Gallardo, T. 2006, *Icarus*, 184, 29-38.
- Jenniskens, P., Shaddad, M. H., Numan, D., et al., 2009, *Nature*, 458, 485-488.
- Koon, W. S., Lo, M. W., Marsden, J. E., dan Ross, S. D., 2000, *Chaos*, 10, 427-469.
- Levison, H. F. dan Duncan, M. J., 1994, *Icarus*, 108, 18-36.
- Rahida, R., 2011, Tugas Akhir Sarjana, Institut Teknologi Bandung