



Estimasi rasio populasi asteroid dekat-bumi kelas apollo dan aten di bawah pengaruh gravitasi

Salma Ayu Hendayani* dan Judisthira Aria Utama

Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia

*e-mail: salmaayuh12@student.upi.edu

Abstrak

Asteroid tidak hanya mengalami peluruhan populasi akibat tumbukan dengan objek masif atau terlempar keluar dari Tata Surya, melainkan juga karena mengalami perpindahan kelas dari kelas asalnya. Terdapat empat kelas utama asteroid dekat-Bumi yaitu Apollo, Amor, Aten, dan Atira. Dua diantaranya, yaitu Apollo ($a > 1 \text{ SA}$, dan $q < 1,02 \text{ SA}$) dan Aten ($a < 1 \text{ SA}$ dan $Q > 0,98$), memiliki orbit yang berpotongan dengan orbit Bumi yang akan berpotensi membahayakan planet Bumi. Studi ini dilakukan untuk memperoleh estimasi rasio kedua kelas dengan menganggap masing-masing kelas berada dalam keadaan tunak. Dengan menggunakan simulasi numerik berdurasi 2×10^6 tahun berbantuan paket integrator Swift_RMVS4 dengan model Tata Surya yang terdiri atas Matahari dan kedelapan planet termasuk Bulan sebagai objek terpisah dan langkah waktu sebesar 10^{-3} tahun (~ 9 jam), diperoleh bahwa jumlah asteroid kelas Apollo yang berubah menjadi Aten maupun sebaliknya, Aten menjadi Apollo, adalah sama besar. Fluks-masuk dari Apollo menuju Aten dan sebaliknya dari Aten menuju Apollo, masing-masing adalah $3,31 \pm 0,40$ per juta tahun untuk $H < 18$ dan $2,88 \pm 0,45$ per juta tahun untuk $H < 18$.

Kata kunci : asteroid dekat-bumi, efek gravitasi, evolusi orbit, rasio populasi.

1. Pendahuluan

Orbit asteroid pelintas orbit planet sangat kaotik, sehingga keanggotaan asteroid individual di kelompok tertentu hanya bersifat sementara sebagaimana telah diungkapkan oleh Utama, dkk (2016). Asteroid yang berada pada orbit planet Mars dan Jupiter bisa mengalami peralihan orbit menjadi asteroid dekat-Bumi. Interaksi gravitasi yang dialami dengan planet Mars akan menyebabkan fragmen-fragmen hasil tumbukan memasuki kawasan yang lebih dekat dengan Bumi. Ruang dekat-Bumi merupakan kawasan yang memiliki nilai q (jarak perihelion)¹ $< 1,3 \text{ sa}$ dan nilai Q (jarak aphelion)² $> 0,98 \text{ sa}$ [1 sa (satuan astronomi merupakan jarak rata-rata Bumi – Matahari yang bernilai $1,5 \times 10^8 \text{ km}$].

Asteroid mengalami peralihan orbit ini dikarenakan adanya tumbukan dengan objek massif atau karena keluar dari tata surya. Bukan hanya terjadi karena tumbukan dengan objek massif atau karena keluar dari tata surya, peluruhan atau

berkurangnya anggota populasi sumber semesta karena anggota populasi berevolusi menjadi kelompok yang berbeda.

Asteroid 2006 RH120 merupakan salah satu contoh asteroid yang berubah kelompok dari Aten menjadi Apollo (Great Shefford Observatory., 2007). Pada bulan September 2006 asteroid ini masih beredar mengelilingi Matahari sebagai bagian dari kelompok asteroid Aten dengan periode 340 hari, perihelion 135 juta kilometer dan aphelion 150 juta kilometer, tetapi pada Juni 2007 setelah melewati titik terdekatnya dengan bumi asteroid 2006 RH120 kembali melejit keluar dari pengaruh gravitasi Bumi, dan mengelilingi Matahari dengan orbit yang berubah. Kali ini orbitnya memiliki perihelion 151 juta kilometer dan aphelion 158 juta kilometer yang ditempuh dalam waktu 383 hari. Orbit ini menjadikan asteroid 2006 RH120 berpindah kekelompok asteroid Apollo.

Asteroid dekat-Bumi memiliki empat kelas utama yang dibedakan berdasarkan karakteristik orbitnya. Keempat kelas tersebut yaitu Apollo [a (setengah sumbu panjang orbit elips) $> 1,0 \text{ sa}$ dan $q < 1,017 \text{ sa}$], Amor ($a > 1,0 \text{ sa}$ dan $1,017 \text{ sa} < q < 1,3 \text{ sa}$), Aten ($a < 1,0 \text{ sa}$ dan $Q > 0,983 \text{ sa}$), dan

¹Jarak perihelion merupakan jarak terdekat objek Tata Surya dengan Matahari sebagai pusat edarnya.

²Jarak aphelion merupakan jarak terjauh objek Tata Surya dengan Matahari sebagai pusat edarnya.

Atira ($a < 1,0$ sa dan $Q < 0,983$ sa). Berdasarkan karakteristik orbit masing-masing kelas, Amor merupakan kelompok asteroid dekat-Bumi yang memiliki orbit yang memotong orbit planet Mars, Atira seluruh orbitnya berada di dalam orbit Bumi, sementara itu Apollo dan Aten merupakan kelompok yang orbitnya memotong orbit Bumi. Hal ini akan berpotensi membahayakan planet Bumi. Kelompok asteroid Aten diperkirakan memiliki potensi dua kali lipat lebih berbahaya dari kelompok asteroid Apollo. (Bottke, dkk., 1994).

Berdasarkan data populasi saat ini yang diperoleh dari laman http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_queny.cgi (per 11 Oktober 2019), diperoleh rasio populasi Apollo terhadap Aten sebesar 7,35 dan sebaliknya, rasio Aten terhadap Apollo sebesar 0,14. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat banyak sekali populasi asteroid kelas Apollo, bahkan tujuh kali lipat lebih besar dari populasi Aten.

Hasil yang diperoleh oleh Utama, dkk. (2016) setelah diintegrasikan selama 2×10^6 tahun, rasio populasi Apollo terhadap Aten lebih besar dari pada rasio populasi Aten terhadap Apollo, hasil ini diperoleh melalui integrasi dengan menyertakan efek termal dengan menggunakan simulasi numerik Swift_RMVS4. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fluks masuk dan rasio populasi dari Apollo terhadap Aten dan sebaliknya, dari Aten terhadap Apollo, menggunakan simulasi numerik yang sama yaitu Swift_RMVS4 tetapi tanpa menyertakan efek termal dengan kurun waktu 2×10^6 tahun.

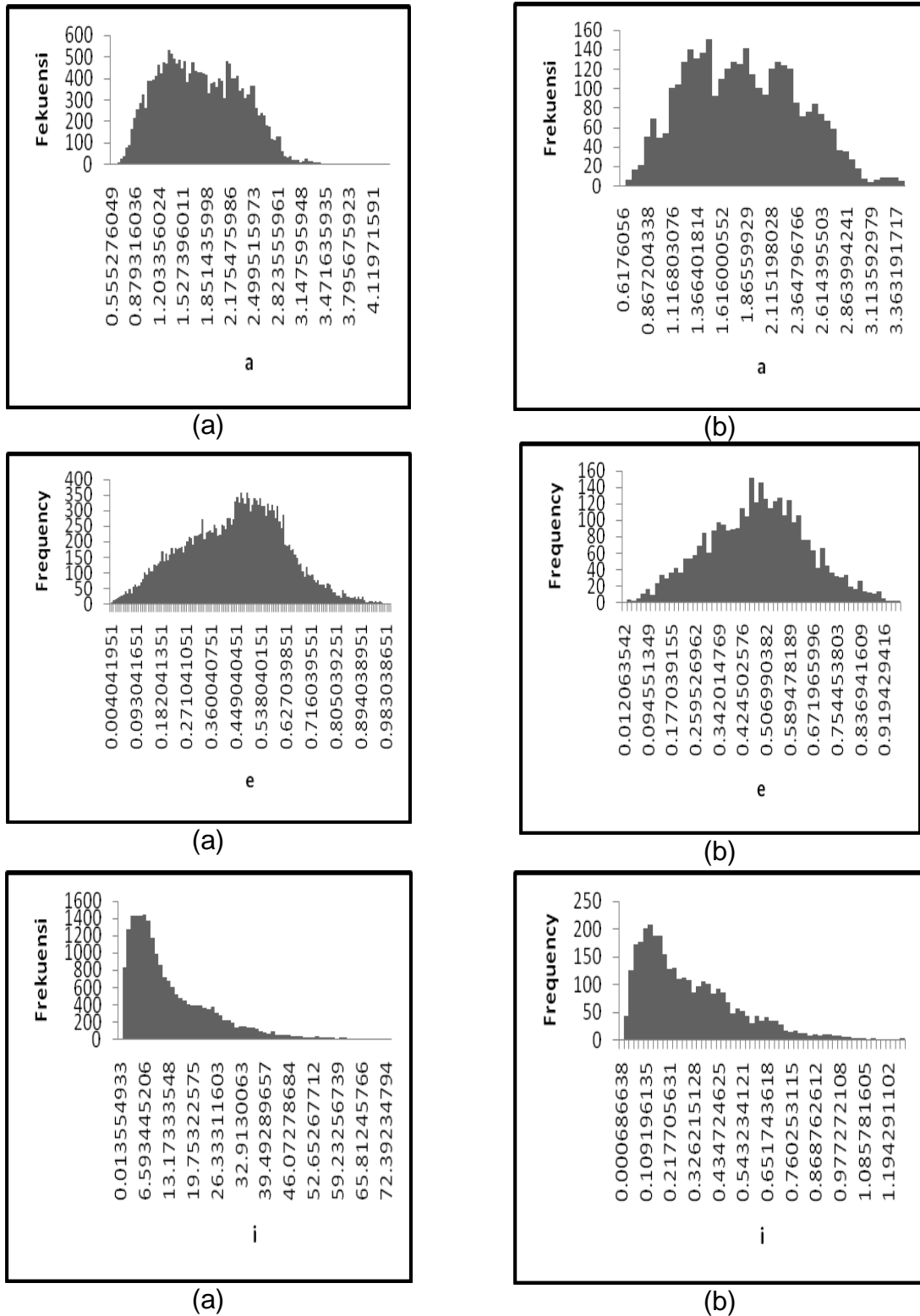
2. Metode

Pada penelitian ini digunakan simulasi numerik dalam bentuk masalah N-benda (*N-body problem*). Data objek yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari laman http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_queny.cgi. Proses seleksi data dilakukan dengan hanya menyertakan asteroid dekat-Bumi dari keempat kelas (Apollo, Amor, Aten, dan Atira), baik yang sudah memiliki nomor ataupun belum dengan orbit yang telah diketahui sangat baik (*condition code* $U=0$; bersesuaian dengan batas galat orbit

kurang dari $1''/\text{dekade}$). Pada laman tersebut diperoleh data Matahari, Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus, Bulan, dan 3372 sampel Asteroid-Dekat Bumi (per 3 Maret 2016) yang telah dipilih melalui seleksi yang hanya menyertakan objek berupa asteroid dengan orbit yang telah dikenal sangat baik. 3372 sampel asteroid tersebut terdiri dari 1740 sampel asteroid kelas Apollo, 1407 sampel asteroid Amor ($a > 1$ SA, $1,017$ SA $< q < 1,3$ SA), 222 sampel asteroid Aten, dan 3 sampel asteroid Atira ($a < 1$ SA, $Q < 0.983$ SA). Dari data yang telah diperoleh ini kita integrasikan menggunakan paket integrator *Swift Regularized Mixed Variable Symplectic 4* (Swift_RMVS4) dengan jangka waktu 2×10^6 tahun kedepan.

Grafik frekuensi distribusi dari sampel asteroid yang diperoleh (per 3 Maret 2019) dengan jumlah asteroid yang terbaru (per 11 Oktober 2019) yang ditunjukkan dalam Gambar 2-1 memiliki hasil yang hampir sama, ini menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh nantinya cukup untuk merepresentasikan dengan data asteroid yang terbaru saat ini. Pada grafik distribusi pada Gambar 3.1 pada grafik frekuensi a, terlihat bahwa pada populasi mayoritas asteroid memiliki nilai a sebesar 1,35 dengan frekuensi sebanyak 540 buah asteroid, sedangkan pada sampel mayoritas asteroid memiliki nilai a sebesar 1,49 dengan frekuensi 151 buah asteroid.

Pada grafik distribusi Gambar 2.1 pada grafik frekuensi e, terlihat bahwa pada populasi mayoritas asteroid memiliki nilai e sebesar 0,47 dengan frekuensi sebanyak 357 buah asteroid, sedangkan pada sampel mayoritas asteroid memiliki nilai e sebesar 0,46 dengan frekuensi 152 buah asteroid. Pada grafik distribusi Gambar 2.1 pada grafik frekuensi i, terlihat bahwa pada populasi mayoritas asteroid memiliki nilai i sebesar 6,59 dengan frekuensi sebanyak 1443 buah asteroid, sedangkan pada sampel mayoritas asteroid memiliki nilai i sebesar 0,11 dengan frekuensi 202 buah asteroid.



Gambar 2.1. Grafik distribusi populasi sampel asteroid, dengan a menyatakan setengah sumbu panjang, e menyatakan eksentrisitas dan i sudut inklinasi. Pada grafik (a) merupakan distribusi dari populasi asteroid (per 11 Oktober 2019), dan pada grafik (b) merupakan distribusi dari sampel asteroid (per 3 Maret 2016).

Data yang dihasilkan dari program integrator ini dibagi menjadi empat batch dimana setiap batch terdiri dari 1000 sampel

asteroid, dan untuk batch empat hanya terdiri dari 372 sampel asteroid. Pembagian menjadi empat batch ini dilakukan karena

pada integrator swift hanya bisa membaca sampai 1000 partikel untuk sekali integrasi. Seluruh batch dijalankan menggunakan pengaturan yang sama, yaitu menggunakan langkah waktu (*timestep*) 10^{-3} tahun (~9 jam) dan hasil waktu dicuplik setiap 10^3 tahun. Hasil evolusi orbit sampel asteroid yang tereliminasi disebabkan karena menumbuk matahari dan terlempar keluar menjauhi matahari hingga $a > 100$ sa ataupun mengalami tumbukan dengan planet-planet.

Pada pekerjaan ini, proses komputasi dilakukan memanfaatkan fasilitas PC (Processor Intel(R) Core(TM) i3-3240T CPU @2,90 GHz, RAM 4,00 GB, 64 bit operating system) yang tersedia di Laboratorium Komputasi Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA – Universitas Pendidikan Indonesia. Komputasi numerik dijalankan dengan menyertakan 10 objek masif di Tata Surya yaitu Matahari dan kedelapan planet serta Bulan yang dianggap sebagai objek mandiri. Data yang diperoleh dari hasil integrasi akan dipisahkan per 1×10^5 tahun menggunakan paket simulasi dan visualisasi SwiftVis. Hal ini bertujuan untuk melakukan pengecekan pada kurun waktu 1×10^5 terdapat asteroid kelas Apollo yang berubah menjadi kelas Aten atau dari kelas Apollo menjadi kelas Aten. Setelah memperoleh data perubahan kelas tersebut bisa diperoleh grafik laju peluruhan dan grafik laju peluruhan fraksional yang dari sana dapat diperoleh fluks masuk dari Apollo menuju Aten dan dari Aten menjadi Apollo.

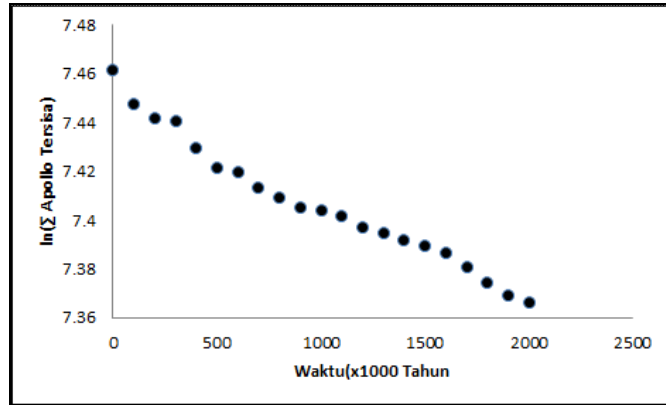
Pada penelitian ini hanya menyertakan efek gravitasi dalam meninjau evolusi orbit dengan menggunakan integrator Swift_RMVS4. Gravitasi merupakan gaya yang menyebabkan benda-benda di alam semesta saling tarik menarik. Interaksi gravitasi ini hanya terjadi antara benda - benda masif dan antar benda masif dengan asteroid, namun tidak terjadi antara asteroid dengan asteroid, karena asteroid dianggap benda yang tak bermassa.

3. Hasil Penelitian

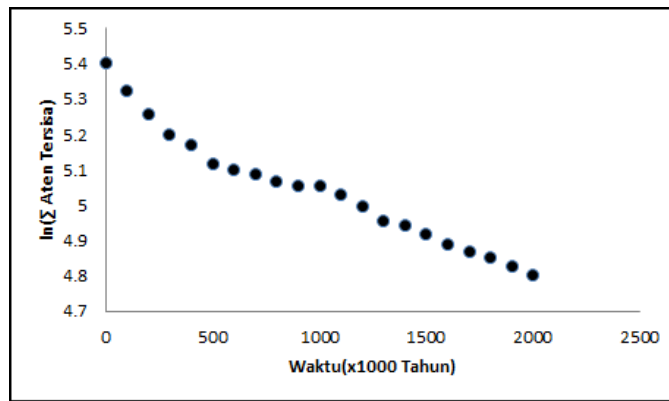
Dalam penelitian ini untuk memperoleh rasio populasi asteroid kelas Apollo menuju Aten dan dari Aten menuju Apollo telah dilakukan komputasi numerik selama 2×10^6 tahun. Data objek diperoleh dari laman JPL NASA Small-Body Database dan memperoleh data sampel asteroid sebanyak 3372 buah sampel yang dibagi menjadi 4 batch. Komputasi numerik ini menggunakan paket integrasi swift_rmvs4. 1740 sampel asteroid Apollo dan 222 sampel asteroid Aten mengalami peluruhan tanpa mendapatkan suplai dari kawasan sumber asteroid dekat-Bumi maupun suplai dari perubahan kelas sesama asteroid dekat-Bumi.

Hasil sampel tersebut kemudian diolah menggunakan Excel untuk mengetahui berapa banyak asteroid Apollo yang berubah menjadi Aten dan sebaliknya. Oleh karena itu diperoleh fluks masuk asteroid kelas Apollo menuju Aten sebanyak 3 buah asteroid per juta tahun dan begitupun fluks masuk asteroid kelas Aten menuju Apollo sebanyak 3 buah asteroid per juta tahun. Untuk rasio populasi asteroid kelas Apollo dan Aten pada tahun ke 2×10^6 masing-masing diperoleh hasil sebesar 7,13 dan 0,07.

Berdasarkan hasil yang diperoleh berupa jumlah populasi asteroid dekat bumi yang tersisa disetiap seratus ribu tahunnya, maka dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel diperoleh nilai Ln dari jumlah populasi asteroid kelas Apollo dan Aten yang tersisa sehingga laju peluruhan asteroid Apollo menuju Aten dan dari Apollo menuju Aten yang masing-masing ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2. Pada kedua grafik tersebut terlihat bahwa terjadi peluruhan pada asteroid kelas Apollo dan Aten. Peluruhan ini bukan semata-mata dikarenakan terjadi akibat tumbukan dengan objek masif maupun keluar dari Tata Surya, tetapi karena berevolusi menjadi kelas lain yaitu pada kelas Apollo berubah menjadi Aten dan pada kelas Aten berubah menjadi kelas Apollo.



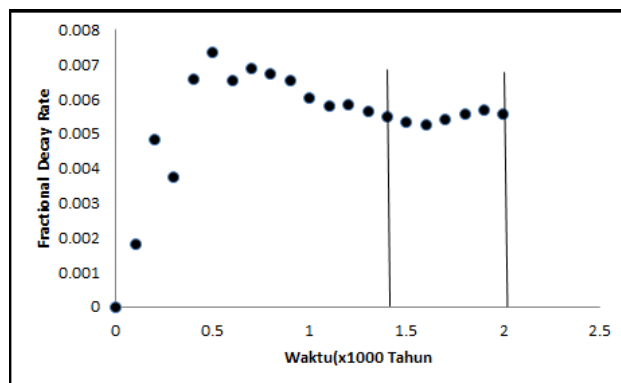
Gambar 3.1. Grafik laju peluruhan dari kelas Apollo menjadi kelas Aten selama 2×10^6 tahun; logaritma natural dari populasi yang tersisa sebagai fungsi waktu.



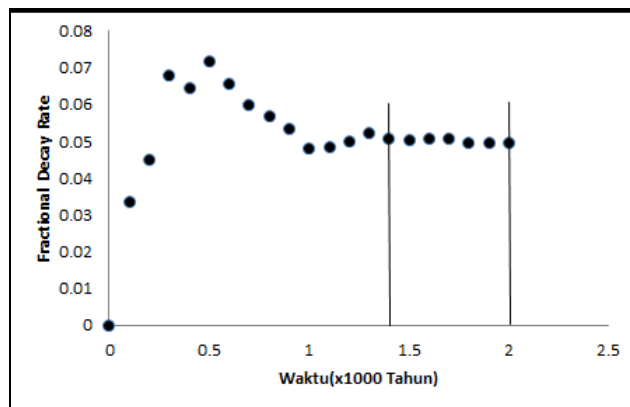
Gambar 3.2. Grafik laju peluruhan dari kelas Aten menjadi kelas Apollo selama 2×10^6 tahun; logaritma natural dari populasi yang tersisa sebagai fungsi waktu.

Berdasarkan grafik laju peluruhan dari kelas Apollo dan Aten, diperoleh juga grafik laju peluruhan fraksional atau *fractional decay rate* dari evolusi Apollo menuju Aten dan dari Aten menuju Apollo yang masing-masing ditunjukkan pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Grafik yang terdapat pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 diperoleh dari nilai fractional decay rate

terhadap waktu per juta tahun. Nilai fractional decay rate dapat diperoleh menggunakan persamaan yang diperoleh dari grafik laju peluruhan, persamaan (3-3). Dimana merupakan nilai fractional decay rate, Σ merupakan jumlah asteroid yang tersisa dan y merupakan persamaan yang diperoleh dari grafik laju peluruhan.



Gambar 3.3. Grafik laju peluruhan fraksional dari kelas Apollo menjadi kelas Aten selama 2 x 10⁶ tahun; laju peluruhan fraksional sebagai fungsi waktu.



Gambar 3.4. Grafik laju peluruhan fraksional dari kelas Aten menjadi kelas Apollo selama 2 x 10⁶ tahun; laju peluruhan fraksional sebagai fungsi waktu.

Berdasarkan grafik laju peluruhan dari kelas Apollo dan Aten, diperoleh juga grafik laju peluruhan fraksional atau *fractional decay rate* dari evolusi Apollo menuju Aten dan dari Aten menuju Apollo yang masing-masing ditunjukkan pada Gambar 3-3 dan Gambar 3-4. Grafik yang terdapat pada Gambar 3-3 dan Gambar 3-4 diperoleh dari nilai *fractional decay rate* terhadap waktu per juta tahun. Nilai *fractional decay rate* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan yang diperoleh dari grafik laju peluruhan. Untuk memperoleh fluks masuk dari kelas Apollo menuju kelas Aten dan sebaliknya dapat diperoleh menggunakan persamaan (Morais dan Morbidelli, 2002) dengan menggunakan jumlah asteroid dalam keadaan tunak.

$$\frac{dN_s}{dt} = -r_s(t)N_s \dots\dots\dots (3-1)$$

Dengan $r_s(t)$ merupakan laju peluruhan fraksional ke daerah target. Banyaknya populasi sumber pada waktu t yang belum memasuki daerah target dapat dinyatakan melalui persamaan

$$N(t) = N_I \exp(-r_s f t) \dots\dots\dots (3-2)$$

Nilai $r_s f$ dapat diperoleh dengan melakukan pencocokan kurva terhadap $\ln[N(t)]$ dan N_I merupakan populasi sumber dalam keadaan tunak. Dengan demikian, fluks masuk ke daerah target dapat diperoleh menggunakan persamaan

$$F = r_s f N_I \dots\dots\dots (3-3)$$

Untuk memperoleh fluks masuk dari kelas Apollo menuju kelas Aten dan sebaliknya dapat diperoleh menggunakan persamaan (Morais dan Morbidelli, 2002) dengan menggunakan jumlah asteroid dalam keadaan tunak seperti pada persamaan (3-3).

Dimana nilai $r_s f$ yang digunakan merupakan nilai rata-rata dari $r_s f$ yang mendekati konstan dan N_I merupakan populasi sumber dalam keadaan tunak. Menurut Bottke, dkk (2002) nilai keadaan tunak Apollo sebesar 590 ± 71 per juta tahun dan nilai keadaan tunak Aten sebesar 59 ± 9 per juta tahun. Sehingga diperoleh fluks-masuk dari Apollo menuju Aten dan dari Aten menuju Apollo masing-masing adalah $3,31 \pm 0,4$ per juta tahun untuk $H < 18$ dan $2,88 \pm 0,45$ per juta tahun untuk $H < 18$, yang jika dibulatkan terdapat 3 buah asteroid Apollo yang berubah menjadi Aten maupun dari Aten menjadi Apollo per juta tahun. H disini merupakan magnitudo visual asteroid yang akan dikesani pengamat seandainya asteroid berada sejauh 1 sa dari pengamat dan 1 sa dari Matahari dengan sudut fase 0. Nilai $H < 18$ bersesuaian dengan radius asteroid 0,67 km – 1,5 km untuk albedo yang diasumsikan bernilai 0,25 – 0,05. Pada $H < 18$ merupakan asteroid dengan diameter lebih besar dari 1 km

Tabel 3.1 menunjukkan rasio populasi sampel yang telah diintegrasikan

selama 2×10^6 tahun dengan rasio populasi sampel pada saat $t = 0$. Terlihat bahwa jumlah populasi Apollo lebih besar daripada jumlah populasi Aten. Oleh karena itu, rasio Apollo terhadap Aten pada $t = 0$ relatif sama dengan rasio Apollo terhadap Aten pada $t = 2 \times 10^6$ tahun, begitupun sebaliknya, rasio Apollo terhadap Aten pada $t = 0$ relatif sama dengan rasio Aten terhadap Apollo pada $t = 2 \times 10^6$ tahun. Pada penelitian ini juga

didapati bahwa rasio Apollo terhadap Aten lebih besar dari pada rasio Aten terhadap Apollo, baik saat $t = 0$ maupun pada $t = 2 \times 10^6$ tahun. Hal ini disebabkan karena jumlah populasi Apollo lebih banyak daripada kelas-kelas lainnya, dan karena fluks-masuk Apollo menjadi Aten hanya berjumlah 3 per juta tahun, maka tidak cukup menambah untuk populasi Aten bertambah secara signifikan.

Tabel 3.1. Estimasi rasio populasi asteroid.

Populasi	Apollo/Aten	Aten/Apollo
<i>Teramati</i>	7,13	0,07
<i>Sampel</i>	7,83	0,13

Pada grafik laju peluruhan terlihat bahwa semakin lama asteroid mengalami peluruhan. Peluruhan disini merupakan perpindahan kelas dari kelas Apollo menjadi Aten dan dari kelas Aten menjadi Apollo. Pada penelitian ini diperoleh fluks masuk asteroid kelas Apollo menuju Aten sebanyak 3 buah asteroid per juta tahun dan begitupun fluks masuk asteroid kelas Aten menuju Apollo sebanyak 3 buah asteroid per juta tahun. Untuk rasio populasi asteroid kelas Apollo dan Aten pada tahun ke 2×10^6 masing-masing diperoleh hasil sebesar 7,13 dan 0,07. Itu artinya bahwa perpindahan kelas dari Apollo menuju Aten ini tidak cukup untuk menambah populasi Aten secara signifikan. Akibatnya adalah jumlah Aten tetap lebih kecil dari pada jumlah Apollo yang sejatinya memiliki populasi paling banyak dari kelas-kelas lainnya.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini sama dengan yang diperoleh Utama, dkk. (2016) yang menggunakan simulasi numerik yang sama yaitu Swift_RMVS4 dengan rentang waktu 2×10^6 tahun. Fluks masuk yang diperoleh dari Apollo menjadi Aten sebesar $2,36 \pm 0,28$ per juta tahun untuk $H < 18$ dan untuk fluks masuk Aten menjadi Apollo sebesar $16,76 \pm 2,60$ per juta tahun untuk $H < 18$. Model integrasi yang digunakan disertakan juga efek termal sehingga fluks masuk Aten terhadap Apollo lebih besar dari Apollo menjadi Aten.

4. Simpulan

Nilai rasio populasi dari evolusi kelas asteroid Apollo menuju Aten dan

sebaliknya, dari Aten menuju Apollo telah diperoleh. Rasio polulasi kelas Apollo menuju Aten memiliki nilai yang lebih besar daripada nilai rasio polulasi dari kelas Aten menuju kelas Apollo, dan fluks masuk dari Apollo menuju Aten dan dari Aten menuju Apollo memiliki jumlah yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan kelas dari Apollo menuju Aten tidak cukup untuk menambah populasi Aten bertambah secara signifikan.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia dengan kontrak bernomor 171A/UN40.D/PP/2019.

Daftar Pustaka

- Bottke, W.F., Nolan, M., Greenberg, R. and Kolvoord, R. 1994. *Collisional lifetimes and impact statistics of near-Earth asteroids*. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- Bottke, W.F., Morbidelli, A., Jadicke, R., Petit, J.M., Levison, H.F., Michel, P. And Metcalfe, T.S. 2002. *Debiased orbital and absolute magnitude distribution of near-Earth objects*. *Icarus* **156**, 399-433.
- Emel'yaneko, V.V. 2016. *Near-Sun Asteroids*. *Astronomicheskii Vestnik* **51**, 67-71.
- Great Shefford Observatory. 2007. 2006 RH120 (6R10DB9) (A Second Moon

- for the Earth?). [online] diakses melalui: www.birtwhistle.org.uk
- Harris, A.W., D'Abramo, G. 2015. *The population of near-Earth asteroids*. Icarus **257**, 302-312.
- Levison, H..F., and Duncan, M.J. (1994). *The long-term dynamical behaviour of short-period comets*. Icarus **108**, 18-36.
- Levison, H., dkk. 2016. *Improving Swift*. [online] diakses melalui: <https://slideplayer.com/slide/9940787/#.XYCjknLkKjQ.gmail>.
- Lewis, M.Y. 2012. *Analytng and Plotting for Planetary Science*. [online] diakses melalui: [http://www.cs.trinity.edu/~mlewis/Swift Vis/](http://www.cs.trinity.edu/~mlewis/SwiftVis/).
- Michel, P., Zappala, V., Cellino, A. and Tanga, P. 2000. *Estimated abundance of atens and asteroids evolving an orbits between earth and sun*. Icarus **143**, 421-424.
- Morais, M.H.M. and Morbidelli, A. 2002. *The population of near-earth asteroids in coorbital motion with the earth*. Icarus **143**, 1-9.
- Utama, J.A., Hidayat, T., Fauzi, U. dan Simatupang, F.M. 2016. *Estimasi rasio populasi asteroid pelintas orbit bumi dari simulasi orbital yang menyertakan efek termal*. Prosiding Seminar Sains Antariksa.
- Utama, J.A., Hidayat, T., Fauzi, U. dan Simatupang, F.M. 2019. *Steady state scenario in asteroids orbital simulation with yarkovsky effect inclusion*. The 6th International Conference on Mathematics and Nature Science.