

ESTIMASI KELIMPAHAN KEADAAN TUNAK POPULASI ASTEROID DEKAT-MATAHARI (ESTIMATED STEADY STATE ABUNDANCE OF NEAR-SUN ASTEROIDS POPULATION)

Judhistira Aria Utama^{1*}, Ferry Mukharradi Simatupang², Lala Septem Riza³, Taufiq Hidayat²

¹Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia

²KK Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung

³Departemen Pendidikan Ilmu Komputer, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia

*e-mail: j.aria.utama@upi.edu

Diterima 5 Desember 2019; Direvisi 4 September 2020; Disetujui 5 September 2020

ABSTRACT

We carried out a numerical simulation of thousands of real near-Earth asteroids (NEAs of class Amor, Apollo, Aten and Atira) with well-known orbits ($U = 0$). We traced the evolution of our sample population by utilizing SWIFT-RMVS4 (*Regularized Mixed-Variable Symplectic*) integrator for the next 5 Megayears (Myr) and then calculated the q' parameter (the smallest value of q) which define the orbit of near-Sun asteroids (NSAs). Based on available steady state model of NEAs population, the entrance flux to the near-Sun from near-Earth region is estimated to be 19 ± 0.21 bodies per Myr (for Solar System under gravity and Yarkovsky effect) and 13 ± 0.14 bodies per Myr (for Solar System under gravity influence only), both for asteroids with absolute magnitude of $H < 17.75$. These values correspond to equal predicted steady state population of near-Sun asteroids (NSAs) of ~ 3 objects of $H < 17.75$ at anytime for both Solar System models.

Keywords: *near-Earth asteroids, near-Sun asteroids, the smallest perihelion distances*

ABSTRAK

Kami telah melakukan simulasi numerik terhadap ribuan sampel asteroid dekat-Bumi nyata (ADB kelas Amor, Apollo, Aten, dan Atira) yang orbitnya telah dikenal dengan sangat baik ($U = 0$). Kami menjejak evolusi orbit dari sampel tersebut selama 5 juta tahun (Megayears, Myr) menggunakan integrator SWIFT-RMVS (*Regularized Mixed-Variable Symplectic*) dan menghitung parameter q' (nilai terkecil q) yang mendefinisikan orbit populasi asteroid dekat-Matahari (ADM). Berdasarkan model populasi keadaan tunak ADB, diperoleh fluks-masuk asteroid menuju kawasan dekat-Matahari dari kawasan dekat-Bumi sebesar $19 \pm 0,21$ objek per juta tahun (untuk model Tata Surya di bawah pengaruh gravitasi dan efek Yarkovsky) dan $13 \pm 0,14$ objek per juta tahun (untuk model Tata Surya di bawah pengaruh gravitasi), keduanya untuk asteroid dengan magnitudo mutlak $H < 17,75$. Kedua nilai memberikan estimasi keadaan tunak populasi ADM yang setara, yaitu ~ 3 objek untuk $H < 17,75$ pada setiap saat bagi kedua model Tata Surya yang digunakan.

Kata kunci: *asteroid dekat-Bumi, asteroid dekat-Matahari, jarak perihelion terkecil*

1 PENDAHULUAN

Populasi asteroid Sabuk Utama merupakan sumber utama populasi asteroid dekat-Bumi (ADB; Bottke *et al.*,

2000; Bottke *et al.*, 2002; Greenstreet *et al.*, 2012), yakni asteroid dengan perihelion $q < 1,3$ satuan astronomi (sa) dan aphelion $Q > 0,983$ sa.

Sumber ADB terpenting adalah kawasan resonansi 3:1 dengan planet Jupiter, kawasan resonansi ν_6 dengan planet Saturnus, dan kawasan asteroid pelintas orbit Mars dengan $q > 1,3$ sa. Selain akibat tumbukan dahsyat antar-asteroid yang terjadi dengan kecepatan dan arah lontaran yang tepat (Farinella *et al.*, 1993), mekanisme lain yang mengirimkan asteroid Sabuk Utama ke kawasan dekat-Bumi adalah insutuan setengah sumbu panjang orbit (a) di bawah pengaruh gaya non-gravitasi yang dikenal sebagai efek Yarkovsky (Farinella & Vokrouhlicky, 1999). Kawasan dekat-Bumi didefinisikan dengan parameter $q < 1,3$ sa dan $Q > 0,983$ sa (Rabinowitz *et al.*, 1994). Insutuan a yang dipicu oleh efek Yarkovsky membuat objek-objek Sabuk Utama dengan diameter $D < 40$ km dan nilai eksentrisitas e yang kecil masuk ke daerah resonansi dan berevolusi menjadi objek pelintas orbit planet Mars sebelum akhirnya menghuni ruang dekat-Bumi (Greenstreet *et al.*, 2012). Ulasan lengkap mengenai efek Yarkovsky ini dapat dijumpai dalam Bottke *et al.* (2006).

Orbit ADB diketahui mudah berubah, terutama karena peristiwa papasan dekat (*close encounter*) yang kerap terjadi dengan planet-planet kebumihan dan resonansi dengan planet-planet raksasa. Karena hal inilah, keanggotaan suatu asteroid dalam kelas tertentu hanya bersifat sementara (Milani *et al.*, 1989). Dari berbagai simulasi orbit telah diketahui pula bahwa ADB sering berada dalam orbit dengan nilai q yang kecil sepanjang evolusinya (Farinella *et al.*, 1994; Gladman *et al.*, 2000; Foschini *et al.*, 2000; Marchi *et al.*, 2009). Dengan demikian, riwayat akhir evolusi asteroid sebagai penumbuk Matahari menjadi hal yang lazim terjadi. Persentase dari kasus tersebut mencapai lebih dari 70% kasus (Marchi *et al.*, 2009). Melalui simulasi yang dilakukan terhadap 117 ADB nyata yang diseleksi berdasarkan kualitas orbitnya, Gladman *et al.* (2000) berhasil menemukan rute baru yang mampu

mengirim ADB sebagai objek penumbuk Matahari, yaitu melalui resonansi secular ν_5 dan ν_2 untuk nilai $e > 0,5$ dan a di antara 1,3 sa – 1,9 sa.

Fakta menarik terkait distribusi albedo asteroid dekat-Matahari (ADM) adalah bahwa sekalipun kelompok ini berasal dari populasi ADB, pada kenyataannya tipikal populasi ADM adalah objek dengan albedo yang tinggi (lebih dari 10% radiasi yang tiba di permukaan objek dipantulkan kembali ke angkasa). Hal ini berbeda dengan karakteristik ADB yang secara umum memiliki persentase yang berimbang antara asteroid beralbedo rendah dan yang beralbedo tinggi. Granvik *et al.* (2016) menyimpulkan bahwa peristiwa hancurnya asteroid beralbedo rendah diakibatkan pemanasan ekstrem pada jarak beberapa puluh kali radius Matahari, menyebabkan minimnya jumlah subpopulasi ADM. Asteroid beralbedo rendah lazimnya memiliki komposisi material berupa karbon, yang relatif lebih rapuh daripada material logam yang menjadi komposisi objek beralbedo tinggi.

Selain dapat membuat objek kecil mengalami disintegrasi akibat pasang-surut yang kuat dan berdampak terhadap distribusi ADB, papasan dekat dengan Matahari memicu pemanasan hingga ribuan Kelvin (Marchi *et al.*, 2009) serta mempengaruhi sifat fisik permukaan ADB (Emel'yanenko, 2017). Akibat interaksinya dengan atmosfer Matahari, reflektansi spektral objek dapat saja mengalami perubahan (Hiroi *et al.*, 1996; Cloutis *et al.*, 2012) dan memicu rekahan termal yang turut menghamburkan debu (Jewitt dan Li, 2010; Jewitt, 2012). Observasi atas asteroid (3200) Phaethon mendapati bahwa objek ini mengalami anomali peningkatan kecerahan saat orbitnya mencapai nilai $q = 0,14$ sa, yang hanya dapat dijelaskan bila terjadi kehilangan massa dalam bentuk debu yang berperan dalam meningkatkan hamburan cahaya

Matahari (Jewitt dan Li, 2010; Jewitt, 2012).

Meskipun populasi ADM ini sangat menarik perhatian karena menyediakan laboratorium astrofisika terkait proses pemanasan yang dialami benda kecil, di dalam literatur belum dijumpai informasi terkait fluks-masuk dari kawasan dekat-Bumi ke ruang dekat-Matahari. Sejauh pengetahuan Penulis, belum terdapat publikasi berupa estimasi populasi keadaan tunak kelompok asteroid ini. Oleh sebab itu, tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh prediksi fluks-masuk menuju ruang dekat-Matahari sekaligus mengestimasi kelimpahan keadaan tunak populasi ADM berdasarkan hasil simulasi numerik terhadap sampel ADB nyata yang telah dilakukan.

2 METODOLOGI

Sebanyak 3372 ADB nyata terseleksi dari pangkalan data *JPL-NASA Small Body Database Search Engine* (https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cg) dengan *epoch* MJD57400 telah digunakan dalam komputasi numerik problem *N*-benda. Kami membatasi hanya objek dengan orbit yang dikenal sangat baik yang akan disimulasikan orbitnya. Syarat ini bersesuaian dengan batas galat orbit kurang dari 1 detikbusur/dekade.

Evolusi orbit ADB diikuti menggunakan paket *integrator* SWIFT-RMVS4 (*Regularized Mixed-Variable Symplectic*) (Levison & Duncan, 1994) versi terakhir yang tersedia di laman <https://www.boulder.swri.edu/~hal/swift.html> hingga kurun waktu 5×10^6 tahun ke depan dengan dua model Tata Surya. Pembatasan durasi hingga 5×10^6 tahun semata-mata karena komputasi yang dijalankan di dalam empat *batch* yang mengakomodasi seluruh sampel ADB telah berjalan hingga 5×10^6 tahun. Di dalam kedua model Tata Surya, sebagai objek masifnya adalah Matahari beserta kedelapan planet (Merkurius hingga Neptunus) dan Bulan sebagai objek

terpisah. Model I memperhitungkan gravitasi dan efek Yarkovsky sementara simulasi evolusi orbit sampel ADB pada Model II hanya memperhitungkan gravitasi dari objek masif. Asteroid diperlakukan sebagai objek tak-bermassa sehingga tidak ada interaksi antar-asteroid.

Komputasi orbit dilakukan memanfaatkan fasilitas yang tersedia di Program Studi Astronomi FMIPA ITB dan Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI. Langkah waktu perhitungan ditetapkan senilai 1/1000 tahun (~9 jam) dan dicuplik setiap 1000 tahun. Evolusi orbit asteroid diikuti hingga terdapat asteroid yang menumbuk Matahari, terlempar keluar Tata Surya (asteroid dengan $a > 100$ sa), atau menumbuk planet-planet. Asteroid yang telah berevolusi mencapai nilai $a > 100$ sa akan memerlukan waktu yang sangat panjang untuk dapat menghuni kembali kawasan bagian dalam Tata Surya (kawasan dekat-Bumi), sehingga dieliminasi dari proses komputasi lebih lanjut.

Kami mengadopsi metode di dalam Emel'yanenko (2017) untuk menentukan apakah suatu asteroid dari populasi ADB telah menjadi anggota populasi ADM sepanjang waktu integrasi yang dilakukan. Kami menghitung nilai parameter q' , yakni nilai q terkecil yang mungkin dimiliki oleh asteroid yang dicapai pada saat $\cos(i) = 1$ (dengan i menyatakan sudut inklinasi orbit asteroid), menggunakan hubungan:

$$q' = a(1 - \sqrt{1 - c^2}) \dots \dots \dots (2-1)$$

dengan c berbentuk:

$$c = \sqrt{1 - e^2} \cos i \dots \dots \dots (2-2)$$

Dalam persamaan (2-1), a menyatakan setengah sumbu panjang orbit, sementara dalam persamaan (2-2) e dan i masing-masing adalah eksentrisitas dan inklinasi. Parameter c merupakan integral gerak di dalam

model sekular gerak asteroid yang diidealkan, yang diperkenalkan oleh Kozai (1962). Objek-objek yang menjadi penumbuk Matahari harus berada dalam orbit yang sangat eksentrik dan sebagai konsekuensinya memiliki nilai parameter c yang sangat kecil. Di dalam penelitian ini kami menggunakan nilai batas $q' < 0,1$ sa untuk menyatakan suatu asteroid telah menjadi anggota populasi ADM, meskipun nilai batas di atas tidak menjamin secara faktual bahwa asteroid memiliki nilai q sekecil itu.

Karena keanggotaan asteroid individual dalam suatu kelas hanya bersifat sementara, kami mengikuti skenario berikut untuk mencapai tujuan penelitian ini. Dari total sebanyak 3372 sampel ADB yang mewakili semua kelas (Amor, Apollo, Aten, dan Atira), evolusi orbitnya diikuti hingga 5×10^6 tahun ke depan sebagai Model I dan Model II. Tanpa memberikan suplai terhadap sampel awal, populasi sampel akan berkurang karena peralihan menjadi populasi ADM. Dengan bantuan program yang kami bangun, dapat diketahui kapan kali pertama sampel ADB berubah menjadi populasi ADM. Sekali dideteksi bahwa terdapat ADB yang sempat menjadi ADM, asteroid yang bersangkutan langsung menjadi pengurang jumlah sampel awal ADB. Dengan kata lain asteroid yang bersangkutan langsung dieliminasi meskipun masih eksis di dalam proses komputasi. Yang dimaksud dengan “dieliminasi” adalah keberadaan asteroid tersebut di dalam populasi ADB tidak lagi diperhitungkan. Berkurangnya populasi sampel ADB juga tidak menyertakan peluruhan akibat tumbukan dengan objek masif atau karena terlempar keluar dari Tata Surya. Dengan skenario di atas, berkurangnya anggota populasi ADB semata-mata karena anggota populasinya berevolusi menjadi ADM. Skenario yang sama telah diterapkan dalam mengestimasi fluks perpindahan antarkelas ADB; Apollo menjadi Aten dan

sebaliknya Aten menjadi Apollo (Utama *et al.*, 2016).

Dari populasi sampel ADB yang tersisa di kedua model Tata Surya pada akhir integrasi, dapat dibangun kurva peluruhan. Dengan menganggap proses peluruhan yang terjadi berlangsung secara eksponensial (Gladman *et al.*, 2000; Bottke *et al.*, 2002; Morais dan Morbidelli, 2002; Dobrovolskis *et al.*, 2007) dengan bentuk fungsi:

$$y = Ae^{-Bx} \dots\dots\dots(2-3)$$

dapat diperoleh laju peluruhan fraksional yang merupakan nilai mutlak gradien garis hasil pencocokan terhadap kurva peluruhan (Bottke *et al.*, 2002). Dalam persamaan (3), y menyatakan jumlah sampel tersisa, A jumlah awal sampel populasi, B laju peluruhan fraksional, dan x adalah waktu.

Memanfaatkan model populasi keadaan tunak ADB, dapat diestimasi besarnya fluks-masuk menjadi ADM dari populasi ADB melalui:

$$F_{ADB \rightarrow ADM} = |B|N_s \dots\dots\dots(2-4)$$

dengan $F_{ADB \rightarrow ADM}$ adalah fluks masuk menuju ADM dari populasi ADB dan N_s untuk jumlah keadaan tunak populasi ADB menurut model yang dirujuk. Jumlah keadaan tunak populasi ADM dapat diestimasi melalui informasi kala hidup sebagai ADM yang diperoleh dari simulasi dengan persamaan:

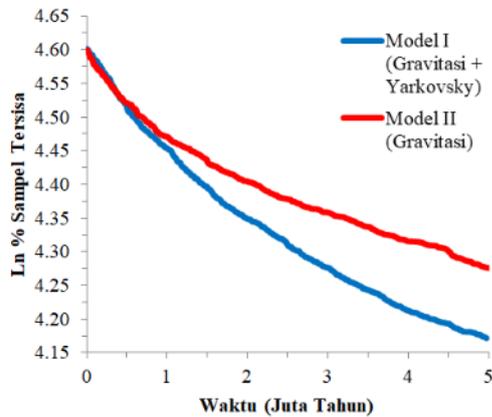
$$N_{ADM} = F_{ADB \rightarrow ADM} \times \langle L \rangle \dots\dots\dots(2-5)$$

Dalam persamaan (5), N_{ADM} dan $\langle L \rangle$ masing-masing menyatakan jumlah keadaan tunak populasi ADM dan rata-rata kala hidup sebagai ADM.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari simulasi orbit sampel populasi ADB yang telah dijalankan selama 5×10^6 tahun ke depan untuk kedua model Tata Surya, dijumpai terdapat peralihan ADB menjadi ADM.

Selama rentang waktu integrasi, terekam sebanyak 1186 ADB yang sempat beralih menjadi ADM di dalam Model I dan 946 kasus serupa di dalam Model II. Grafik peluruhan dari kedua model ditunjukkan dalam Gambar 3-1.



Gambar 3-1: Peluruhan ADB menjadi ADM untuk kedua model Tata Surya.

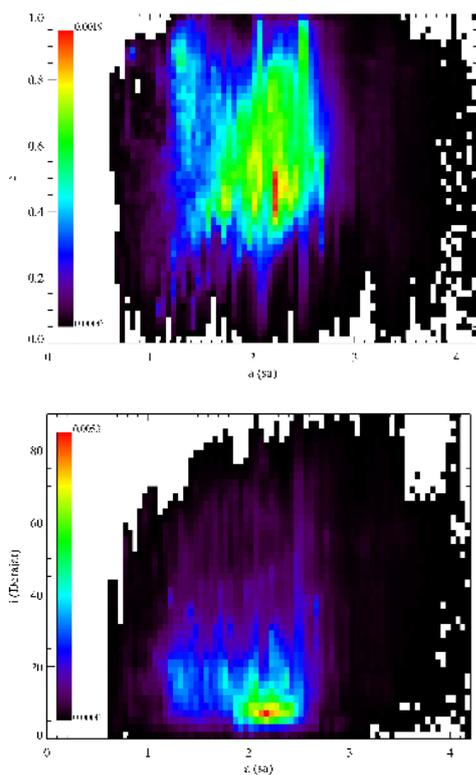
Dari Gambar 3-1 terlihat bahwa hingga tahun ~ 500.000 sejak *epoch* MJD57400, peluruhan yang terjadi di kedua model relatif sama. Setelah itu, Model I meluruh dengan lebih cepat daripada Model II. Model I memiliki gradien (nilai B dalam Persamaan 3) 0,02, sedangkan untuk Model II sebesar 0,01. Nilai mutlak gradien yang diperoleh dengan metode kuadrat terkecil regresi linier menyatakan pula laju peluruhan fraksional dari kedua model. Dengan demikian, nilai laju peluruhan fraksional untuk Model I dan Model II, masing-masing bernilai 0,02 per juta tahun dan 0,01 per juta tahun.

Memanfaatkan hasil observasi 9 program survei populasi ADB terdepan selama kurun waktu dua dekade terakhir, Tricarico (2017) memprediksi terdapat 920 ± 10 populasi ADB dalam keadaan tunak dengan diameter lebih besar dari 1 km (bersesuaian dengan magnitudo mutlak $H < 17,75$). Nilai estimasi beserta ketidakpastian yang diperoleh di atas lebih kecil daripada prediksi yang diberikan Bottke *et al.* (2002), Harris & D'Abramo (2015),

maupun Granvik *et al.* (2018). Kecuali Bottke *et al.* (2002) yang menggunakan $H < 18$ sebagai proksi untuk diameter rata-rata asteroid yang lebih besar dari 1 km, di dalam semua referensi yang disebutkan di atas digunakan nilai $H < 17,75$. Dengan mengadopsi nilai populasi ADB dalam keadaan tunak yang diberikan Tricarico (2017), menggunakan persamaan (2-4) dapat dihitung fluks-masuk menuju kawasan dekat-Matahari dari daerah dekat-Bumi untuk Model I dan Model II, yaitu masing-masing sebesar $19 \pm 0,21$ objek per juta tahun dan $13 \pm 0,14$ objek per juta tahun (semua untuk $H < 17,75$).

Simulasi dengan dua model Tata Surya yang telah dijalankan menghasilkan rata-rata kala hidup yang relatif berbeda (meskipun masih dalam orde yang sama) selama menjalani episode sebagai ADM, yaitu masing-masing sebesar $1,67 \times 10^5$ tahun (Model I) dan $2,05 \times 10^5$ tahun (Model II). Dalam Model I diperoleh nilai kala hidup dalam rentang 1×10^3 tahun– 5×10^6 tahun, sementara dalam Model II 1×10^3 tahun– $4,967 \times 10^6$ tahun. Menurut Marchi *et al.* (2009), sebanyak $\sim 1\%$ populasi ADB menghabiskan waktu selama 1×10^3 tahun– 1×10^6 tahun di dalam orbit dengan $q < 0,1$ sa.

Dalam skenario populasi keadaan tunak, waktu total yang dihabiskan suatu asteroid untuk berada di orbit tertentu (*residence times*—waktu tinggal) merupakan representasi kebolehjadian untuk menjumpai asteroid yang bersangkutan berada di orbit tersebut. Gambar 3-2 (panel atas dan bawah) dan Gambar 3-3 (panel atas dan bawah) memperlihatkan waktu tinggal sebagai ADM di orbit yang berbeda-beda, yang berarti pula sebagai distribusi orbital ADM. Kedua gambar dibangun dengan menggunakan sel-sel berukuran $a = 0,05$ sa, $e = 0,02$, dan $i = 2^\circ$ yang mencakup kawasan bagian-dalam Tata Surya dengan batasan $a < 4,2$ sa, $e < 1,0$ dan $i < 90^\circ$ (Greenstreet *et al.*, 2012).

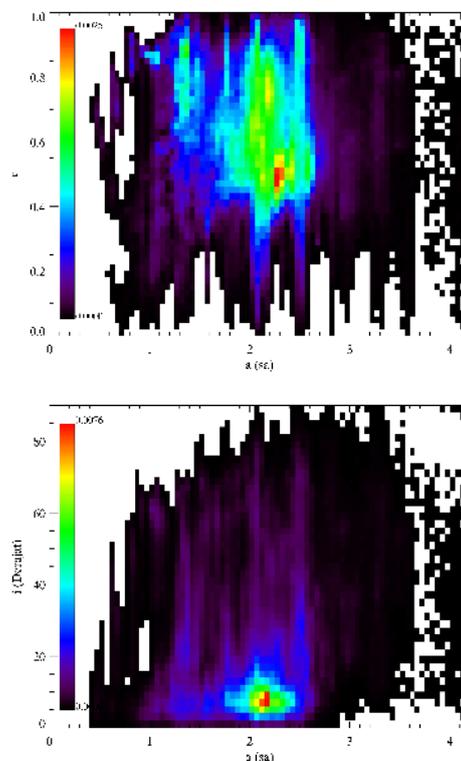


Gambar 3-2: Waktu tinggal ADM dalam Model I di pasangan sel (a,e) [panel atas] dan pasangan sel (a,i) [panel bawah].

Setiap ADM dicatat durasinya ketika menempati sel (a,e) dan (a,i) . Untuk suatu pasangan sel (a,e) dan (a,i) dimungkinkan untuk dihuni oleh sejumlah ADM dengan durasi waktu yang berbeda-beda. Untuk setiap pasang sel (a,e) dan (a,i) selanjutnya dihitung rasio durasi waktu total dari seluruh ADM yang sempat berdiam di sel tersebut terhadap waktu total yang dihabiskan semua ADM di seluruh sel. Warna merah menunjukkan sel yang ditempati ADM dalam waktu yang relatif panjang, warna hitam mengindikasikan selang waktu yang relatif singkat, dan warna putih adalah sel-sel yang tidak pernah dikunjungi oleh ADM selama waktu integrasi.

Menggunakan nilai rata-rata kala hidup yang diperoleh dari simulasi dengan kedua model Tata Surya, jumlah keadaan tunak populasi ADM diestimasi masing-masing sebesar $3,2 \pm 0,03$ objek (Model I) dan $2,6 \pm 0,03$ objek (Model II), semuanya untuk $H < 17,75$. Kedua model

Tata Surya konvergen dalam memberikan nilai estimasi jumlah keadaan tunak populasi ADM sebesar ~ 3 objek.



Gambar 3-3: Waktu tinggal ADM dalam Model II di pasangan sel (a,e) [panel atas] dan pasangan sel (a,i) [panel bawah].

Menurut informasi yang tersedia di laman https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi hingga saat ini (per tanggal 3 Desember 2019) hanya terdapat 2 ADM yang memiliki $q < 0,1$ sa dengan $H < 17,75$, yaitu objek dengan nama 137924 (2000 BD19) dan 394130 (2006 HY51). Fakta observasi ini $\sim 0,6$ kali lebih rendah daripada nilai estimasi yang diperoleh dari Model I dan $\sim 0,8$ kali lebih rendah dari nilai yang diberikan Model II. Dengan mengingat bahwa ketuntasan observasi untuk asteroid dengan $H < 17,75$ baru mencapai $\sim 90\%$ (Harris dan D’Abramo, 2015), fluktuasi kecil antara estimasi yang kami hasilkan dengan fakta observasi menjadi sangat mungkin dapat dieliminasi dalam beberapa waktu ke depan.

4. KESIMPULAN

Telah berhasil diperoleh fluks-masuk menuju kawasan dekat-Matahari dari daerah dekat-Bumi menggunakan dua model Tata Surya dari komputasi numerik problem N-benda. Nilai fluks-masuk dari kedua model adalah $19 \pm 0,21$ objek per juta tahun (Model I) dan $13 \pm 0,14$ objek per juta tahun (Model II), semua untuk $H < 17,75$.

Estimasi nilai jumlah keadaan tunak populasi ADM yang bersesuaian dengan fluks-masuk di atas, masing-masing adalah $3,2 \pm 0,03$ objek dan $2,6 \pm 0,03$ objek. Hadirnya perbedaan antara nilai estimasi yang diperoleh dalam penelitian ini terhadap jumlah populasi ADM nyata yang telah berhasil diamati, diharapkan dapat dieliminasi dalam beberapa waktu ke depan saat ketuntasan survei populasi asteroid dengan $H < 17,75$ berhasil dicapai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada *Jet Propulsion Laboratory* NASA yang telah menyediakan akses data publik bagi keperluan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan pula kepada Mitra Bestari. Penelitian ini didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia dengan surat kontrak No. 171A/UN40.D/PP/2019.

DAFTAR RUJUKAN

- Bottke, W.F., R. Jedicke, A. Morbidelli, J.M. Petit, dan B. Gladman, 2000. *Understanding the Distribution of Near-Earth Asteroids*, Science 288(5474), 2190-2194.
- Bottke, W.F., A. Morbidelli, R. Jedicke, J.M. Petit, H.F. Levison, P. Michel, dan T.S. Metcalfe, 2002. *Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects*. Icarus 156(2), 399-433.
- Bottke, W.F., D. Vokrouhlický, D.P. Rubincam, dan D. Nesvorný, 2006. *The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics*. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 34, 157-191.
- Cloutis, E.A., P. Hudon, T. Hiroi, dan M.J. Gaffey, 2012. *Spectral Reflectance Properties of Carbonaceous Chondrites 4: Aqueously Altered and Thermally Metamorphosed Meteorites*. Icarus 220(2), 586-617.
- Dobrovolskis, A.R., J.L. Alvarellos, dan J.J. Lissauer, 2007. *Lifetimes of Small Bodies in Planetocentric (or Heliocentric) Orbits*. Icarus 188(2), 481-505.
- Emel'yanenko, V.V., 2017. *Near-sun asteroids*, Solar System Research 51(1), 59-63.
- Farinella P., dan D. Vokrouhlický, 1999. *Semimajor Axis Mobility of Asteroidal Fragments*. Science 283(5407), 1507-1510.
- Farinella, P., R. Gonczi, Ch. Froeschlé, dan C. Froeschlé, 1993. *The Injection of Asteroid Fragments into Resonances*. Icarus 101(2), 174-187.
- Farinella, P., Ch. Froeschlé, C. Froeschlé, R. Gonczi, G. Hahn, A. Morbidelli, dan G.B. Valsecchi, 1994. *Asteroids Falling into the Sun*. Nature 371, 314-317.
- Foschini, L., P. Farinella, Ch. Froeschlé, R. Gonczi, T.J. Jopek, dan P. Michel, 2000. *Long-Term Dynamics of Bright Bolides*, Astron. Astrophys. 353, 797-812.
- Gladman, B., P. Michel, dan Ch. Froeschlé, 2000. *The Near-Earth Object Population*. Icarus 146, 176-189.
- Granvik, M., A. Morbidelli, R. Jedicke, B. Bolin, W.F. Bottke, E. Beshore, D. Vokrouhlický, M. Delbò, P. Michel, 2016. *Super-Catastrophic Disruption of Asteroids at Small Perihelion Distances*. Nature 530, 303-306.
- Granvik, M., A. Morbidelli, R. Jedicke, B. Bolin, W.F. Bottke, E. Beshore, D. Vokrouhlický, D. Nesvorný, dan P. Michel, 2018. *Debiased Orbit and Absolute-Magnitude Distributions for Near-Earth Objects*. Icarus, 181-207.
- Greenstreet, S., H. Ngo, dan B. Gladman, 2012. *The Orbital Distribution of Near-Earth Objects inside Earth's Orbit*. Icarus 217, 355-366.

- Harris, A.W., dan G. D'Abramo, 2015. *The Population of Near-Earth Asteroids*. Icarus 257, 302-312.
- Hiroi, T., M.E. Zolensky, C.M. Pieters, dan M.E. Lipschutz, 1996. *Thermal Metamorphism of the C, G, B, and F Asteroids Seen from the 0.7 μ m, 3 μ m, and UV Absorption Strengths in Comparison with Carbonaceous Chondrites*. M&PS 31(3), 321-327.
- Jewitt, D., 2012. *The Active Asteroids*. The Astronomical Journal 143(3), 143-166.
- Jewitt, D., dan J. Li, 2010. *Activity in Geminid Parent (3200) Phaethon*. The Astronomical Journal 140(5), 1519-1527.
- Kozai, Y., 1962. *Secular Perturbations of Asteroids with High Inclination and Eccentricity*. The Astronomical Journal 67(9), 591-598.
- Levison, H.F., dan M.J. Duncan, 1994. *The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets*. Icarus 108(1), 18-36.
- Marchi, S., M. Delbò, A. Morbidelli, P. Paolicchi, dan M. Lazzarin, 2009. *Heating of Near-Earth Objects and Meteoroids due to Close Approaches to the Sun*. Mon. Not. R. Astron. Soc. 400, 147-153.
- Milani, A., M. Charpino, G. Hahn, dan A.M. Nobili, 1989. *Dynamics of Planet-Crossing Asteroids: Classes of Orbital Behavior: Project SPACEGUARD*. Icarus 78(2), 212-269.
- Morais, M.H.M., dan A. Morbidelli, 2002. *The Population of Near-Earth Asteroids in Coorbital Motion with the Earth*. Icarus 160(1), 1-9.
- Rabinowitz, D.; E. Bowell, E. Shoemaker, dan K. Muinonen, 1994. *The Population of Earth Crossing Asteroids*, dalam T. Gehrel; M.S. Matthews dan A.M. Schumann (editor). Hazards due to Comets and Asteroids.
- Tricarico, P., 2017. *The Near-Earth Asteroid Population from Two Decades of Observations*. Icarus 284, 416-423.
- Utama, J.A., T. Hidayat, U. Fauzi, dan F.M. Simatupang, 2016. *Estimasi Rasio Populasi Asteroid Pelintas Orbit Bumi dari Simulasi Orbital yang Menyertakan Efek Termal*. Prosiding Seminar Sains Antariksa 2016: Bandung, 22 November 2016.