



FREKUENSI TUMBUKAN POPULASI ASTEROID DEKAT-BUMI (ADB) BERUKURAN BESAR DAN TERANG TERHADAP PLANET-PLANET KEBUMIHAN

Ananda Meliyana Maharani¹, Judhistira Aria Utama^{2*}, Andhy Setiawan³

^{1,2,3}Physics Education Department, Universitas Pendidikan Indonesia

*Alamat Korespondensi: j.aria.utama@upi.edu

ABSTRAK

Asteroid dekat-Bumi (ADB) memiliki orbit yang mudah berubah akibat pengaruh papasan dekat yang dialami populasi objek ini dengan planet-planet terestrial (Merkurius hingga Mars) dan Bulan. Konsekuensi dari orbit yang mudah berubah ini salah satunya membuat populasi ADB berakhir dengan menumbuk planet-planet kebumihian. Pada penelitian ini digunakan 980 sampel ADB nyata berukuran besar ($D \geq 1$ km) dan terang ($H \leq 17,75$) dengan orbit yang dikenal baik ($U = 0$). Perhitungan evolusi orbit sampel dilakukan selama lima juta tahun ke masa depan dengan langkah waktu komputasi sebesar 10^{-3} tahun menggunakan paket integrator orbit Swift_RMVS4 yang telah dimodifikasi untuk mengakomodasi pula gaya termal Yarkovsky. Di akhir komputasi orbit diperoleh fluks masuk sampel ADB yang berakhir di zona pembuangan (menumbuk Matahari atau menumbuk planet dan terlempar ke luar Tata Surya, yaitu saat $a > 100$ sa) sebesar 149 asteroid per juta tahun. Dengan memanfaatkan nilai MOID (*Minimum Orbit Intersection Distance*) melalui pendekatan geometri, diperoleh nilai rata-rata probabilitas tumbukan intrinsik (P_i) sebesar $1,74E-17$, $4,38E-18$, $3,44E-18$, $6,50E-17$, dan $5,62E-18$ km^{-2} tahun^{-1} , secara berturut-turut masing-masing untuk planet Merkurius, Venus, Bumi, Bulan, dan Mars. Nilai P_i yang diperoleh bersesuaian dengan selang waktu antartumbukan dengan masing-masing objek masif di atas setiap $9,75E+06$ tahun, $5,32E+06$ tahun, $5,42E+06$ tahun, $5,19E+06$ tahun, dan $1,36E+07$ tahun. Frekuensi tumbukan yang diperoleh dari sampel ADB berukuran besar ini lebih kecil daripada nilai laju tumbukan yang dimiliki ADB berukuran kecil yang telah dihasilkan dari penelitian lain sebelumnya.

© 2021 Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI

Kata kunci: Asteroid Dekat-Bumi (ADB), Frekuensi Tumbukan, MOID, Probabilitas Tumbukan Intrinsik

PENDAHULUAN

Asteroid merupakan objek berbatu yang berukuran jauh lebih kecil dari planet namun lebih besar dari meteoroid yang mengorbit matahari dan tersebar di beberapa bagian Tata Surya. Kumpulan asteroid yang disebut sebagai asteroid Sabuk Utama (*Main Belt*) berada di antara orbit planet Mars dan Jupiter, dianggap sebagai sumber untuk sebagian besar Asteroid dekat-Bumi (ADB/*Near Earth Asteroids*) dikarenakan mengalami peralihan orbit melalui mekanisme diantaranya tumbukan antar-asteroid di Sabuk Utama dengan arah lontaran yang tepat dan kecepatan lontar yang cukup besar (beberapa ratus ms^{-2} , Zappalá dkk., 1996), ditemukan lebih dari sepuluh rute peralihan orbit yang jelas dari asteroid Sabuk Utama ke wilayah asteroid dekat-Bumi, biasanya bertepatan dengan resonansi gerak rata-rata orde rendah (*low-*

order mean-motion resonance) dengan Jupiter dan resonansi sekuler (*secular resonance*) (Granvik dkk., 2017). Interaksi gravitasi dengan planet Mars memegang peranan penting dalam mengantarkan pecahan-pecahan hasil tumbukan antar-asteroid tersebut untuk memasuki kawasan bagian dalam Tata Surya membentuk populasi baru, yang disebut populasi asteroid dekat-Bumi (ADB).

Papasan dekat (*close encounter*) yang dialami populasi asteroid dekat-Bumi dengan planet-planet Terestrial (Merkurius hingga Mars) dan Bulan memberi pengaruh sehingga asteroid dekat-Bumi memiliki orbit yang mudah sekali berubah. Selain itu, dinamika resonansi pula memberi pengaruh pada peluruhan populasi asteroid dekat-Bumi ke zona pembuangan (Michel dkk., 2005).

ADB merupakan salah satu Objek dekat Bumi (ODB/*Near Earth*

Objects (NEOs)) dari dua jenis dengan satu jenis objek lainnya merupakan komet. ODB dengan magnitudo absolut $H \leq 22$ dan jarak perpotongan orbit minimum (MOID) $< 0,05$ sa, maka dikategorikan sebagai objek yang berpotensi membahayakan (*Potentially Hazardous Object (PHO)*), jika objek tersebut merupakan asteroid maka disebut asteroid yang berpotensi membahayakan (*Potentially Hazardous Asteroids (PHA)*) dan memiliki konsekuensi yang dapat menghancurkan jika menumbuk Bumi. Sehingga laju kejadian tumbukan antara asteroid dengan Bumi perlu diketahui untuk menambah informasi supaya semakin relevan untuk diketahui sebagai bagian mitigasi bencana dari antariksa.

METODE

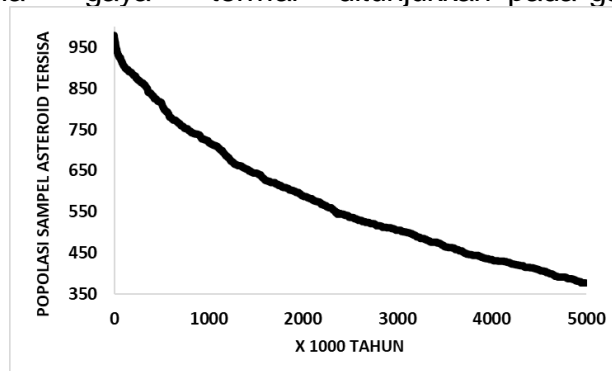
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui simulasi numerik dalam bentuk *N-body problem*. Dengan memanfaatkan data hasil komputasi orbit yang melibatkan gaya gravitasi dan gaya termal (Yarkovsky) untuk kedelapan planet, Bulan, dan 980 sampel ADB ($D \geq 1$ km) dengan orbit yang telah dikenal dengan sangat baik. Keseluruhan sampel yang digunakan diperoleh dari laman <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb-query.cgi>.

Komputasi orbit dilakukan dengan menggunakan paket integrator Swift_RMVS4 (Levison & Duncan, 1994) yang merupakan pengembangan dari Mixed-Variable Symplectic (MVS) yang dikembangkan oleh Wisdom & Holman (1991) dan telah dimodifikasi untuk dapat mengakomodasi pula gaya termal

Yarkovsky (Dermawan dkk., 2013). Versi ke-4 dari Regularized Mixed-Variable Symplectic ini dapat menghitung peristiwa papasan dekat yang terjadi antara asteroid dengan objek-objek masif dengan lebih teliti dibandingkan versi sebelumnya. Proses komputasi orbit dilakukan dengan memanfaatkan fasilitas cluster Perseus dan sebuah PC dengan spesifikasi Intel® Core™ i7-2600K CPU @3,40 GHz, RAM 4,00 GB, 64 bit operating system di KK Astronomi FMIPA ITB serta dua buah PC lainnya (Intel® Core™ i3-3240T CPU @2,90 GHz, RAM 4,00 GB, 64 bit operating system) yang terdapat di laboratorium Komputasi Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia untuk 980 sampel ADB [bersesuaian jumlah keadaan tunak populasi ADB dgn $D \geq 1$ km ada 980 +/- 120 objek dalam Bottke dkk.(2002)] nyata berdiameter $D \geq 1$ km [setara dengan (bersesuaian dengan rentang $H \leq 17,75$)], Matahari, kedelapan planet (Merkurius hingga Neptunus), dan Bulan selama 5×10^6 tahun ke depan. Komputasi berjalan dengan langkah waktu $1/10^{-3}$ tahun (~9 jam) dan hasilnya dicuplik tiap 10^3 tahun.. Dengan paket integrator yang digunakan, interaksi gravitasi hanya terjadi antar benda masif dan antara benda masif dengan seluruh asteroid, sementara interaksi antar asteroid diabaikan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada akhir komputasi, didapat 38,57% sampel asteroid telah berakhir menuju zona pembuangan. Peluruhan populasi sampel ditunjukkan pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Grafik laju peluruhan sampel ADB dan berakhir menuju zona pembuangan selama durasi waktu komputasi 5×10^6 tahun.

Peluruhan tersebut dapat dihampiri oleh persamaan berikut.

$$y = + 6,6790E^{-1,5E-04x} \quad \dots(1)$$

Mengikuti Bottke dkk. (2002), dari persamaan di atas, didapatkan nilai rata-rata laju peluruhan fraksional menuju zona pembuangan sebesar 0,1516 per juta tahun atau sebanyak 149 asteroid per juta tahun.

Dalam menghitung laju tumbukan asteroid dekat-Bumi dengan planet dan bulan, telah tersedia data hasil komputasi yang menghitung nilai jarak minimum orbit (MOID). Nilai probabilitas tumbukan antara dua orbit heliosentrik didapatkan salah satunya dengan cara memperkirakan laju tumbukan yang diamati secara langsung dalam simulasi numerik. Namun, untuk

menghindari permasalahan *small number statistik* dalam penelitian ini peristiwa tumbukan diidentifikasi dengan kriteria $MOID < \text{Radius Hill}$ (Galiazzo dkk., 2013). Radius Hill dihitung menggunakan persamaan berikut

$$r_{HILL} = R \left[\left(\frac{m}{3M} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad \dots(2)$$

dengan R merupakan jarak planet dari Matahari, m massa planet dan M massa Matahari yang besarnya $1,989 \times 10^{30}$ kg. Dari kriteria tersebut, didapatkan jarak minimum seperti pada Tabel 2 untuk memperkirakan terjadinya tumbukan.

Tabel 1. Radius Hill masing-masing planet dan Bulan

No	Objek Target	Radius Hill (km)
1	Merkurius	$1,75 \times 10^5$
2	Venus	$1,00 \times 10^6$
3	Bumi	$1,47 \times 10^6$
4	Bulan	$5,82 \times 10^4$
5	Mars	$9,84 \times 10^5$

Tabel 2. Kriteria jarak minimum yang digunakan untuk memperkirakan terjadinya peristiwa tumbukan.

No	Objek Target	Kriteria MOID < (AU)
1	Merkurius	$1,17 \times 10^{-3}$
2	Venus	$6,71 \times 10^{-3}$
3	Bumi	$9,83 \times 10^{-3}$
4	Bulan	$3,89 \times 10^{-4}$
5	Mars	$6,58 \times 10^{-3}$

Pada Galad (2005), frekuensi tumbukan di objek target oleh objek proyektil dinyatakan melalui persamaan

$$f = (< H) P_i R_c^2 \quad \dots(3)$$

dengan R_c merupakan radius tangkapan gravitasi planet yang dihitung melalui persamaan berikut

$$R_c = R \sqrt{1 + \frac{V^2}{V_\infty^2}} \quad \dots(4)$$

dengan radius efektif planet R , kelajuan lepas dari permukaan planet V , dan ∞ kelajuan asteroid dalam orbit hiperbolik v_∞ .

Distribusi jumlah kumulatif MOID untuk suatu jarak yang lebih dari d adalah

$$N(D > 1[km]) = CD^{-b} \quad \dots(5)$$

dengan $C = 942$ dan $b = 2.354$. Distribusi ini mengasumsikan diameter rata-rata 1 km Objek memiliki magnitudo absolut $H = 17,75$.

Tabel 3. Nilai v_{∞} setiap planet kebumihan dan bulan.

No	Objek	v_{∞} (kms ⁻¹)
1	Merkurius	38,1
2	Venus	23,4
3	Bumi	18,9
4	Bulan	42,6
5	Mars	12,4

Probabilitas tumbukan intrinsik dinyatakan menggunakan persamaan sebagaimana diberikan oleh Galad (2005) sebagai berikut

$$P_i = M/(Ntr^2) \dots(6)$$

dengan N jumlah sampel asteroid, M banyaknya MOID yang terjadi, r jarak yang dipilih untuk menentukan kriteria jumlah M (MOID), dan t selang waktu yang ditinjau.

Tabel 4. Nilai probabilitas tumbukan intrinsik dan frekuensi tumbukan asteroid terhadap masing-masing planet dan bulan.

No	Objek Target	P_i (km ² per tahun)	f (per tahun)
1	Merkurius	$1,74 \times 10^{-17}$	$1,03 \times 10^{-7}$
2	Venus	$4,38 \times 10^{-18}$	$1,88 \times 10^{-7}$
3	Bumi	$3,44 \times 10^{-18}$	$1,85 \times 10^{-7}$
4	Bulan	$6,50 \times 10^{-17}$	$1,93 \times 10^{-7}$
5	Mars	$5,62 \times 10^{-18}$	$7,36 \times 10^{-8}$

Menggunakan Persamaan (3) dan (6), diperoleh hasil berupa nilai probabilitas tumbukan intrinsik dan frekuensi tumbukan asteroid terhadap masing-masing planet dan bulan disajikan dalam Tabel 4.

Collisional lifetime merupakan kebalikan dari nilai f yaitu skala waktu yang dibutuhkan suatu proyektil untuk

bertumbukan dengan target tertentu. Dari nilai f yang telah diperoleh didapatkan bahwa terjadi 1 tumbukan antara asteroid dengan masing-masing planet dan bulan seperti yang disajikan dalam Tabel 5. Dan terlihat bahwa ADB berukuran besar paling sering menabrak Bulan dan paling jarang menabrak Mars.

Tabel 5. *Collisional Lifetime* asteroid terhadap masing-masing planet dan bulan.

No.	Objek Target	<i>Collisional Lifetime</i> (tahun)
1	Merkurius	$9,75 \times 10^6$
2	Venus	$5,32 \times 10^6$
3	Bumi	$5,42 \times 10^6$
4	Bulan	$5,19 \times 10^6$
5	Mars	$1,36 \times 10^7$

Berikut merupakan perbandingan dengan hasil yang didapat oleh (Wahyudin dkk., 2020) untuk ADB berukuran kecil ($D < 1$ km)

dan (Nesvorný & Roig, 2017) untuk ADB berukuran besar ($D > 10$ km).

Tabel 6. Perbandingan jumlah tumbukan ADB dengan planet-planet kebumian dan bulan tiap 10^9 tahun.

No.	Objek Target	Fluks Tumbukan tiap 10^9 tahun		
		Nesvorný & Roig (D>10km)	Penelitian ini (D>1km)	Wahyudin, dkk (D<1km)
1	Merkurius	-	103	$6,08 \times 10^6$
2	Venus	0,84	188	$2,97 \times 10^6$
3	Bumi	0,82	185	$1,53 \times 10^6$
4	Bulan	0,42	193	$1,53 \times 10^6$
5	Mars	0,044	74	$4,80 \times 10^5$

Ketiganya menunjukkan nilai frekuensi tumbukan yang sangat berbeda. Fluks tumbukan ADB berukuran besar terhadap planet-planet kebumian jauh lebih kecil daripada fluks tumbukan ADB berukuran kecil.

Penelitian oleh (Emel'Yanenko & Naroenkov, 2015) mendapatkan 1 peristiwa tumbukan ADB terhadap Bumi terjadi setiap $0,53 \times 10^6$ tahun untuk $H < 18$. Hasil ini sekitar 10 kali lebih sering dari pada yang didapat pada penelitian ini. Hal ini bisa disebabkan karena pada penelitian ini asteroid yang dilibatkan khusus untuk asteroid berukuran besar ($D \geq 1$ km) dan terang ($H \leq 17,75$).

PENUTUP

Dari 980 sampel ADB nyata berukuran besar ($D \geq 1$ km) dan terang ($H \leq 17,75$) mengalami peluruhan dengan fluks masuk populasi asteroid sebanyak 149 asteroid per juta tahun ke zona pembuangan. Dari jumlah tersebut, diperkirakan terjadi 1 tumbukan setiap $9,75 \times 10^6$ tahun dengan planet Merkurius, $5,32 \times 10^6$ tahun dengan planet Venus, $5,42 \times 10^6$ tahun dengan Bumi, $5,19 \times 10^6$ tahun dengan Bulan, dan $1,36 \times 10^7$ tahun dengan Mars. Selain itu, penelitian ini juga mendapati Frekuensi tumbukan yang dialami planet kebumian dengan ADB berukuran besar ini lebih kecil daripada nilai laju tumbukan yang dimiliki ADB berukuran kecil. Penelitian ini menguatkan keyakinan bahwa tumbukan yang dialami planet kebumian dengan ADB berukuran besar terjadi lebih jarang dibandingkan

dengan ADB berukuran kecil, maka estimasi dari frekuensi tumbukan populasi ADB dengan planet-planet harus memisahkan sampel dengan membaginya berdasarkan rentang ukurannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia dengan kontrak bernomor 281/UN40.LP/PT.01.03/2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J. M., Levison, H. F., Michel, P., & Metcalfe, T. S. (2002). Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects. *Icarus*, *156*(2), 399–433. <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6788>
- Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., & Nesvorný, D. (2007). An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. *Nature*, *449*(7158), 48–53. <https://doi.org/10.1038/nature06070>
- Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., & Nesvorný, D. (2006). The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *34*, 157–191. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125154>
- Dermawan, B., Hidayat, T., & Utama, J. A. (2013). Pengembangan integrator swift_rmvs4 dengan melibatkan efek

- termal. Prosiding Seminar Himpunan Astronomi Indonesia.
- Emel'Yanenko, V. V., & Naroenkov, S. A. (2015). Dynamical features of hazardous near-earth objects. *Astrophysical Bulletin*, *70*(3), 342–348. <https://doi.org/10.1134/S199034131503013X>
- Galiazzo, M. A., Bazzó, Á., & Dvorak, R. (2013). Fugitives from the Hungaria region: Close encounters and impacts with terrestrial planets. *Planetary and Space Science*, *84*, 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.03.017>
- Granvik, M., Morbidelli, A., Vokrouhlický, D., Bottke, W. F., Nesvorný, D., & Jedicke, R. (2017). Escape of asteroids from the main belt. *Astronomy and Astrophysics*, *598*, 1–13. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629252>
- Levison, H. F., & Duncan, M. J. (1994). The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets. In *Icarus* (Vol. 108, Issue 1, pp. 18–36). <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1039>
- Michel, P., Zappalà, V., Cellino, A., & Tanga, P. (2000). Estimated abundance of Atens and asteroids evolving on orbits between Earth and Sun. *Icarus*, *143*(2), 421–424.
- Nesvorný, D., & Roig, F. (2017). Dynamical Origin and Terrestrial Impact Flux of Large Near-Earth Asteroids. *The Astronomical Journal*, *155*(1), 42. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa9a47>
- Wahyudin, Utama, J. A., & Rusdiana, D. (2021). Frekuensi Tumbukan Populasi Asteroid dekat-Bumi Berukuran Kecil terhadap Planet-Planet Kebumihan. *Proceeding Seminar Nasional Fisika*, *0*, 275–280.
- Wisdom, J., & Holman, M. (1991). Symplectic Maps for the N-Body Problem. *The Astronomical Journal*, 102.
- Wiśniowski, T., & Rickman, H. (2013). Fast geometric method for calculating accurate Minimum Orbit Intersection Distances. *Acta Astronomica*, *63*(2), 293–307