

Frekuensi Tumbukan Populasi Asteroid dekat-Bumi Berukuran Kecil dengan Planet-Planet Kebumian (Impact Frequency of Small Near-Earth Asteroids Population with Terrestrial Planets)

Judhistira Aria Utama¹, Wahyudin¹, Nanang Dwi Ardi¹, Taufiq Hidayat², Lala Septem Riza³

¹Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung

²KK Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung

³Departemen Pendidikan Ilmu Komputer, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung

Riwayat naskah

Diterima: 13-12-2021

Direvisi: 26-06-2022

Disetujui: 27-06-2022

Korespondensi:

j.aria.utama@upi.edu

ABSTRAK

Peristiwa papasan dekat antara populasi asteroid dekat-Bumi (ADB) dengan planet-planet kebumian sering kali terjadi dan menyebabkan orbit ADB mudah sekali berubah. Salah satu akibat dari perubahan orbit ini adalah terjadinya peristiwa tumbukan antara asteroid dengan planet-planet kebumian. Penelitian ini memanfaatkan 2387 sampel ADB nyata berukuran kecil ($36 \text{ m} \leq D < 1 \text{ km}$, dalam rentang $17,90 < H < 24,97$) dengan orbit yang telah dikenal sangat baik ($U = 0$), yang dibagi ke dalam 13 kelompok ukuran. Perhitungan orbit selama 5×10^6 tahun ke masa depan dilakukan dengan menggunakan paket integrator orbit `Swift_RMVS4` hasil modifikasi sehingga dapat memperhitungkan gaya termal Yarkovsky. Langkah waktu perhitungan orbit dibuat sebesar 1/1000 tahun. Pada akhir komputasi orbit diperoleh fluks masuk sampel ADB ke zona pembuangan sebesar ~161 hingga ~335.330 asteroid per juta tahun. Probabilitas tumbukan intrinsik, P_i , terkecil dimiliki oleh planet Mars, yaitu $7,42 \times 10^{-18} \text{ tahun}^{-1} \text{ km}^{-2}$ dan yang terbesar dimiliki oleh Bulan, yaitu $1,08 \times 10^{-16} \text{ tahun}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Waktu antartumbukan paling singkat dimiliki oleh Bumi, dengan terjadinya satu tumbukan setiap 1374 tahun yang melibatkan asteroid berdiameter $D \geq 36 \text{ m}$. Hal berlawanan berlaku untuk Mars, yang memiliki selang waktu antartumbukan terpanjang, yaitu 4709 tahun. Survei terhadap populasi objek berdiameter dalam orde ratusan meter perlu dilakukan karena frekuensi tumbukannya yang relatif lebih tinggi dengan potensi dampak kerusakan berskala lokal hingga regional.

Kata kunci: Asteroid Dekat-Bumi, Laju Peluruhan, Frekuensi Tumbukan

ABSTRACT

Close encounters between near-Earth asteroids (NEAs) population and terrestrial planets frequently happen, making NEAs' orbits chaotic. One of the consequences of this orbital change is the occurrence of collisions between asteroids and terrestrial planets. This study utilized 2387 small real NEAs samples ($36 \text{ m} \leq D < 1 \text{ km}$ or $17.90 < H < 24.97$) with very well-known orbits ($U = 0$), which were divided into 13 size groups. Orbits computation for 5×10^6 years into the future was carried out using the modified `Swift_RMVS4` orbit integrator package to consider the Yarkovsky thermal force, with time step as small as 1/1000 years. The entrance flux of the NEAs sample into the sinks is ~161 to ~335,330 asteroids per million years. Planet Mars has the smallest intrinsic collision probability, P_i , which is $7.42 \times 10^{-18} \text{ yr}^{-1} \text{ km}^{-2}$ and the largest is for the Moon by $1.08 \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1} \text{ km}^{-2}$. The Earth has the shortest collisional lifetime, namely one collision every 1374 years (for asteroids with $D \geq 36 \text{ m}$). Contrary to this, Mars has the longest interval, namely 4709 years. A survey for sub-kilometer objects' population needs to be carried out because of their relatively higher impact frequency with locally to regionally devastating effects.

Keywords: Near-Earth Asteroids, Decay Rate, Impact Frequency

1. Pendahuluan

Asteroid dekat-Bumi (ADB) merupakan objek langit yang terletak di kawasan dengan jarak perihelion kurang dari 1,3 satuan astronomi (1 sa setara dengan $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$). Berdasarkan konvensi, populasi asteroid dekat-Bumi dibagi ke dalam 4 kelas utama, yaitu Apollo, Aten, Amor, dan Atira. Pada Februari 2020 telah ditemukan asteroid pertama anggota kelas baru, yaitu Vatira (de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos, 2020), yang seluruh orbitnya berada di sebelah dalam orbit planet Venus ($0,307 \text{ sa} < Q < 0,718 \text{ sa}$). Keberadaan kelas baru ini telah lama diprediksikan melalui simulasi numerik (Greenstreet dkk., 2012).

ADB merupakan salah satu dari dua jenis benda langit yang disebut sebagai Objek dekat-Bumi (ODB), dengan satu jenis objek lainnya adalah komet. ODB dengan magnitudo absolut $H \leq 22$ dan jarak perpotongan orbit minimum (*Minimum Orbit Intersection Distance* - MOID) $< 0,05 \text{ sa}$, dikategorikan sebagai objek yang berpotensi membahayakan (*Potentially Hazardous Object* - PHO). Jika objek tersebut merupakan asteroid, maka dinamakan PHAs (*Potentially Hazardous Asteroids*). Objek tersebut memiliki konsekuensi bencana jika sampai menumbuk Bumi. Karenanya, frekuensi kejadian tumbukan antara asteroid dengan Bumi perlu diketahui sebagai bagian mitigasi bencana antariksa.

Orbit ADB mudah sekali berubah, sebagai akibat seringnya mengalami papasan dekat dengan planet-planet kebumian. Tumbukan antara populasi ini dengan planet-planet kebumian dapat berakibat fatal bagi kehidupan, seperti kepunahan masal K/T 65 juta tahun lalu (Bottke dkk., 2007), peristiwa Tunguska (Napier & Asher, 2009), maupun peristiwa Chelyabinsk (Brown dkk., 2013). Dengan demikian pengetahuan tentang frekuensi kejadian tumbukan menjadi relevan untuk diketahui. Wahyudin dkk. (2021), dengan memanfaatkan data hasil komputasi orbit dari 2404 ADB berukuran kecil ($D < 1 \text{ km}$) selama 5 juta tahun ke masa depan, mendapatkan terjadi satu tumbukan antara ADB dengan Bumi setiap ~ 655 tahun. Namun demikian, untuk mendapatkan hasil yang lebih teliti, dipandang perlu melakukan pembagian populasi ADB berdasarkan rentang ukurannya.

Salah satu cara untuk memperoleh frekuensi tumbukan antara dua objek dalam

dua orbit heliosentrik adalah menggunakan nilai MOID (lihat misalnya, Rickman dkk. (2014, 2017); JeongAhn & Malhotra (2015, 2017); Fauziah dkk. (2020)). Melalui penggunaan nilai MOID, penentuan frekuensi tumbukan dapat menyertakan pula konfigurasi orbit yang tidak berpotongan, yaitu selama nilai MOID kurang dari jarak minimum tertentu yang ditetapkan.

Berangkat dari uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh frekuensi tumbukan antara populasi ADB berukuran kecil ($36 \text{ m} \leq D < 1 \text{ km}$) yang dibagi ke dalam rentang ukuran tertentu dengan planet-planet kebumian melalui simulasi numerik berdurasi panjang, dengan mengimplementasikan metode baru dalam menghitung jarak minimum orbit untuk sepasang orbit heliosentrik (Wiśniowski & Rickman, 2013).

2. Metodologi

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi numerik masalah N-benda (*N-body problem*). Data populasi sampel asteroid diperoleh dari laman https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.htm. Batasan parameter orbit untuk menyeleksi sampel asteroid mengikuti definisi untuk masing-masing kelas (Morbidelli dkk., 2002), yaitu Apollo (a (setengah sumbu panjang) $\geq 1 \text{ sa}$, q (jarak perihelion) $\leq 1,02 \text{ sa}$), Aten ($a < 1 \text{ sa}$, Q (jarak aphelion) $\geq 0,98 \text{ sa}$), Amor ($a > 1 \text{ sa}$, $1,02 < q \leq 1,3 \text{ sa}$), dan Atira ($a < 1 \text{ sa}$, $Q < 0,98 \text{ sa}$). Kualitas orbit dari sampel juga dibatasi hanya untuk objek dengan orbit yang telah dikenal sangat baik (parameter $U = 0$), yaitu yang memiliki galat orbit kurang dari 1 detik busur per dekade. Parameter U merupakan bilangan bulat 0 hingga 9 dalam skala logaritmik; semakin kecil nilainya semakin baik kualitas orbit objek yang bersangkutan.

Komputasi orbit dilakukan dengan memanfaatkan paket integrator *Swift_RMVS4* (Levison & Duncan, 1994) yang merupakan perbaikan dari *Mixed-Variable Symplectic* (MVS) yang dikembangkan oleh Wisdom & Holman (1991). Integrator yang digunakan telah dimodifikasi untuk dapat mengakomodasi pula gaya termal Yarkovsky (Dermawan dkk., 2013). Versi ke-4 dari *Regularized Mixed-Variable Symplectic* (RMVS) 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. Model Tata Surya yang digunakan menyertakan Matahari, kedelapan planet (Merkurius hingga Neptunus), dan Bulan dengan waktu komputasi selama 5×10^6 tahun ke masa depan. Komputasi dijalankan dengan langkah waktu 1/1000 tahun (~9 jam) dan hasilnya dicuplik tiap 1000 tahun. Dengan paket integrator yang digunakan, interaksi gravitasi hanya terjadi antarbenda masif dan antara benda masif dengan seluruh asteroid, sementara tidak terjadi interaksi antarasteroid.

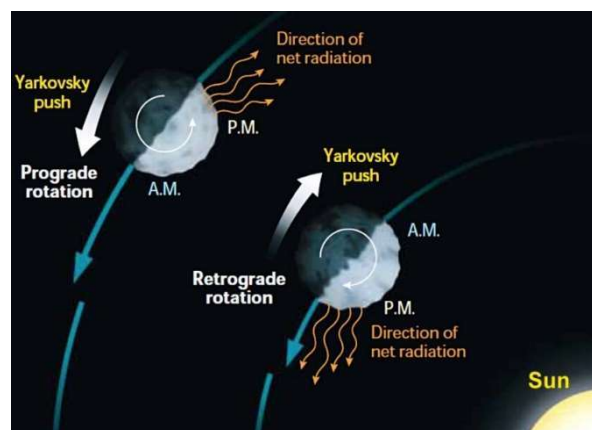
Penyertaan gaya termal Yarkovsky selain gaya gravitasi berimplikasi pada diperlukannya informasi fisis, seperti radius, periode rotasi, kerapatan *bulk*, kerapatan permukaan, konduktivitas termal, kapasitas termal, emisivitas, dan orientasi sumbu rotasi seluruh sampel asteroid. Tabel 1 menunjukkan nilai dari besaran-besaran fisis yang dimaksud.

Tabel 1. Nilai dari besaran-besaran fisis yang diperlukan untuk memperhitungkan gaya termal Yarkovsky.

Besaran Fisis	Nilai
Radius	18 - 499 m
Periode rotasi	0,0411 - 1880 jam
Kerapatan <i>bulk</i>	1000 - 8000 kg/m ³
Kerapatan permukaan	1000 - 3500 kg/m ³
Konduktivitas termal	0,001005 - 40 W/K.m
Kapasitas termal	500 - 1500 J/kg.K
Emisivitas	0,8 - 0,95

Gaya termal Yarkovsky diketahui bekerja efektif pada benda kecil ($D < 40$ km) yang berotasi akibat emisi termal yang tidak isotropik. Bergantung pada rotasi benda kecilnya (*prograde* ataukah *retrograde*), di ruang yang minim kejadian papasan dekat dengan objek-objek masif, efek dari gaya ini

mampu membuat orbit benda kecil bertambah besar (*prograde*) atau justru bertambah kecil (*retrograde*). Gambar 1 mengilustrasikan efek Yarkovsky yang berbeda. Fenomena transfer asteroid dari kawasan Sabuk Utama menuju ruang dekat-Bumi dapat dijelaskan bila menyertakan gaya termal Yarkovsky ini. Ulasan lengkap tentang pentingnya pengaruh gaya termal Yarkovsky dalam komputasi orbit berdurasi panjang dapat dijumpai dalam Bottke dkk. (2006).



Gambar 1. Ilustrasi gaya termal Yarkovsky dalam mengubah orbit benda kecil (<https://skyandtelescope.org/astronomy-news/a-tumbling-apophis-good-news-for-earth/>).

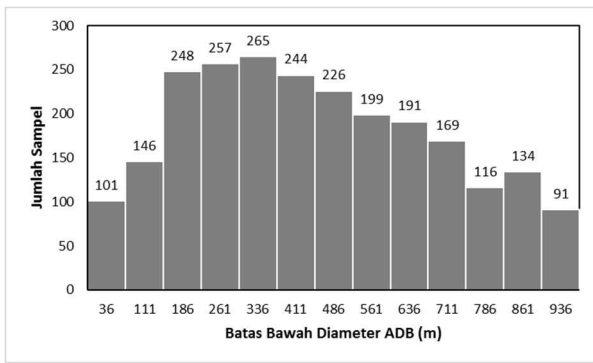
3. Hasil dan Pembahasan

Sebanyak 2387 ADB terpilih dibagi ke dalam 13 kelas (Gambar 2). Dengan menggunakan Persamaan (1) (Fowler & Chillemi, 1992):

$$H = -5 \log \left(\frac{D \sqrt{p_v}}{1329} \right) \tag{1}$$

dengan asumsi albedo geometrik $p_v = 0,14$ (Stuart, 2003), diperoleh magnitudo absolut H . Selanjutnya, menggunakan Persamaan (2) (Sanchez & McInnes, 2011):

$$N(> D [\text{km}]) = CD^{-b} \tag{2}$$



Gambar 2. Histogram jumlah sampel ADB yang digunakan.

dapat dihitung taksiran populasi kumulatif sesungguhnya dari asteroid untuk D tertentu. Dalam Persamaan (2), b adalah konstanta bernilai 2,354 dan C merupakan populasi asteroid dengan $H < 17,75$ ($D > 1$ km), yaitu sebanyak 920 ± 10 asteroid (Tricarico, 2017). Nilai H dan $N(> D$ [km]) yang diperoleh disajikan dalam Tabel 2. Populasi ADB untuk setiap kelas diameter dihitung dengan Persamaan (3) (Sanchez & McInnes, 2011):

$$\Delta N(D_{min} < D < D_{maks}) = C(D_{min}^{-b} - D_{maks}^{-b}) \quad (3)$$

dan ditampilkan di Tabel 3.

Tabel 2. Nilai H untuk setiap nilai diameter ADB beserta estimasi populasinya.

Diameter ADB (m)	H	Estimasi Populasi ADB
≥ 36	$\leq 24,97$	2.302.776
≥ 111	$\leq 22,53$	162.591
≥ 186	$\leq 21,40$	48.234
≥ 261	$\leq 20,67$	21.728
≥ 336	$\leq 20,12$	11.989
≥ 411	$\leq 19,68$	7461
≥ 486	$\leq 19,32$	5029
≥ 561	$\leq 19,01$	3587
≥ 636	$\leq 18,74$	2670
≥ 711	$\leq 18,49$	2053
≥ 786	$\leq 18,28$	1622
≥ 861	$\leq 18,08$	1309
≥ 936	$\leq 17,90$	1075

Tabel 3. Rentang nilai D dan populasi ADB untuk setiap kelas.

D (m)	Estimasi Populasi ADB
36 - 111	2.140.185
111 - 186	114.357
186 - 261	26.506
261 - 336	9739
336 - 411	4528
411 - 486	2433
486 - 561	1442
561 - 636	917
636 - 711	616
711 - 786	432
786 - 861	313
861 - 936	234
936 - 1000	155

Tabel 4. Persamaan grafik peluruhan, nilai R^2 (koefisien determinasi: ukuran tingkat kecocokan model dengan data) dan R (koefisien korelasi: ukuran kekuatan hubungan antarvariabel) dari masing-masing persamaan hampiran, nilai rata-rata laju peluruhan, dan fluks masuk ke zona pembuangan untuk setiap kelas.

D (m)	Persamaan Hampiran	R^2	R	r_{ISf} (10^{-3} Tahun)	F (10^{-6} Tahun)
≥ 36	$y = -1,46 \times 10^{-4}x + 7,614$	0,99784	0,9989	$1,46 \times 10^{-4}$	335.330
≥ 111	$y = -1,42 \times 10^{-4}x + 7,589$	0,99733	0,9987	$1,42 \times 10^{-4}$	23.163
≥ 186	$y = -1,38 \times 10^{-4}x + 7,538$	0,99752	0,9988	$1,38 \times 10^{-4}$	6670
≥ 261	$y = -1,28 \times 10^{-4}x + 7,426$	0,99753	0,9988	$1,28 \times 10^{-4}$	2771
≥ 336	$y = -1,18 \times 10^{-4}x + 7,302$	0,99650	0,9982	$1,18 \times 10^{-4}$	1410
≥ 411	$y = -1,10 \times 10^{-4}x + 7,155$	0,99696	0,9985	$1,10 \times 10^{-4}$	878
≥ 486	$y = -1,14 \times 10^{-4}x + 6,960$	0,99532	0,9977	$1,14 \times 10^{-4}$	560
≥ 561	$y = -1,23 \times 10^{-4}x + 6,731$	0,99733	0,9987	$1,23 \times 10^{-4}$	443
≥ 636	$y = -1,45 \times 10^{-4}x + 6,487$	0,99649	0,9982	$1,45 \times 10^{-4}$	388
≥ 711	$y = -1,83 \times 10^{-4}x + 6,166$	0,99512	0,9976	$1,83 \times 10^{-4}$	376
≥ 786	$y = -2,12 \times 10^{-4}x + 5,770$	0,99495	0,9975	$2,12 \times 10^{-4}$	344
≥ 861	$y = -1,94 \times 10^{-4}x + 5,308$	0,99043	0,9952	$1,94 \times 10^{-4}$	253
≥ 936	$y = -1,50 \times 10^{-4}x + 4,308$	0,96808	0,9839	$1,50 \times 10^{-4}$	161

3.1. Laju Peluruhan

Peluruhan populasi sampel ADB untuk setiap kelas diameter ditunjukkan oleh Gambar 3. Peluruhan terjadi karena tumbukan yang dialami ADB dengan Matahari atau planet/Bulan dan terlempar keluar dari Tata Surya ($a > 100$ sa). Dengan melakukan pencocokan pada bagian linier di tiap kurva peluruhan ADB, diperoleh persamaan hampiran yang ditunjukkan Tabel 4.

Dari persamaan hampiran dalam Tabel 4, dapat ditentukan nilai rata-rata laju peluruhan fraksional (r_{ISf}) dan fluks masuk menuju zona pembuangannya (F) berdasarkan persamaan (4) dan (5) (Bottke dkk., 2002; Morais & Morbidelli, 2002):

$$r_{ISf} = -\frac{\ln \frac{N(t)}{N_{IS}}}{t} \quad (4)$$

$$F = r_{ISf} N_{IS} \quad (5)$$

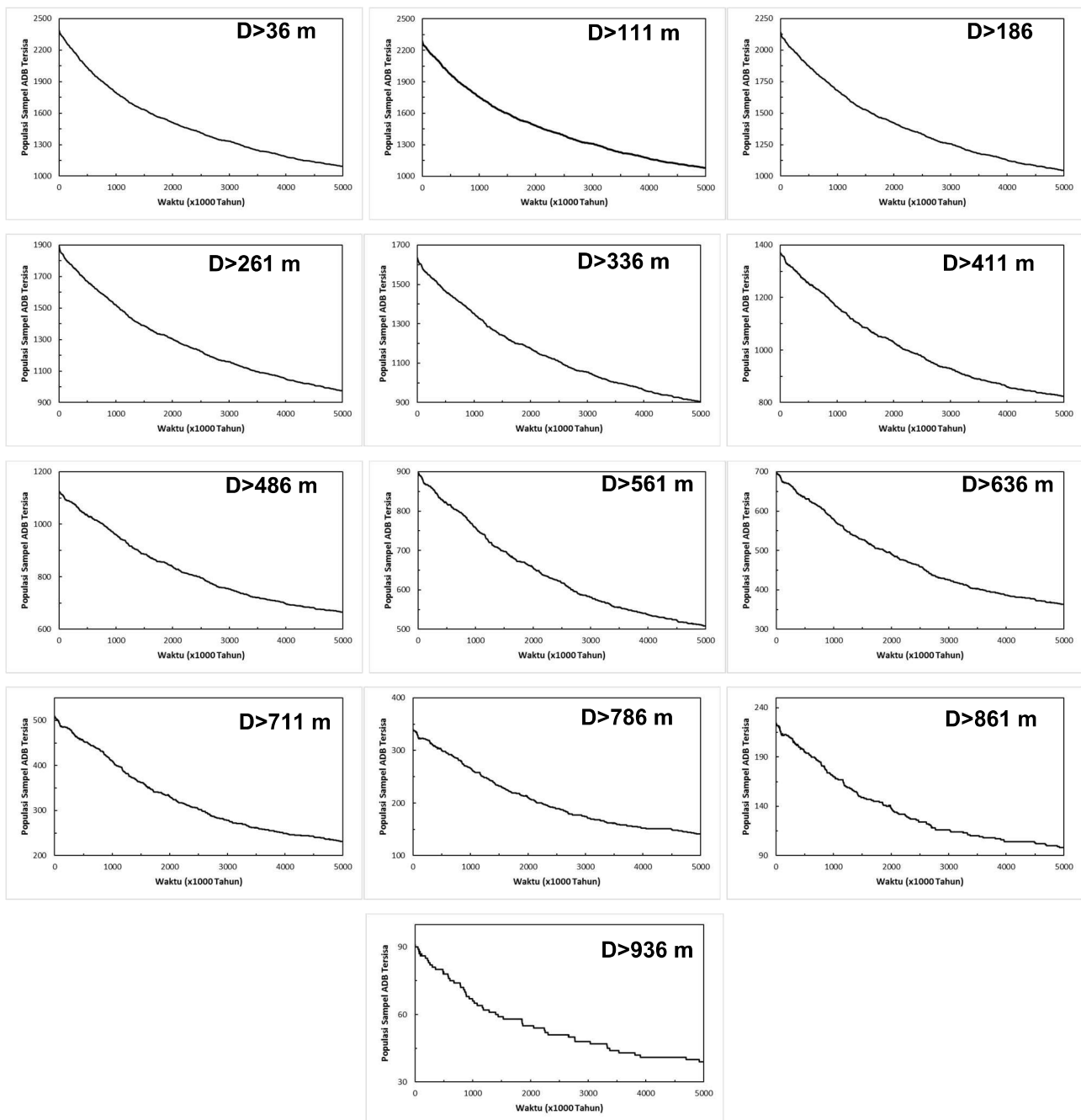
dengan N_{IS} menyatakan populasi sumber dalam keadaan tunak, yang tidak lain merupakan nilai estimasi populasi ADB sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2.

Dari tabel 4, tampak kecenderungan bahwa semakin kecil diameter ADB maka semakin banyak yang masuk zona pembuangan setiap tahunnya. Nilai-tengah kala hidup asteroid, yaitu waktu yang diperlukan bagi sampel asteroid menjadi

setengah dari jumlah semula, dan persentase sampel asteroid tersisa dalam 5 juta tahun ke masa depan disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Nilai-tengah kala hidup dan persentase sampel ADB tersisa.

D (m)	Nilai-tengah kala hidup (10^6 Tahun)	Persentase sampel asteroid tersisa (%)
≥ 36	3,75	45,79
≥ 111	4,14	47,29
≥ 186	4,05	48,88
≥ 261	4,50	51,48
≥ 336	5,06	55,35
≥ 411	5,32	60,15
≥ 486	5,62	58,97
≥ 561	5,04	56,44
≥ 636	4,32	51,93
≥ 711	3,41	45,29
≥ 786	2,98	41,35
≥ 861	3,03	43,56
≥ 936	3,27	42,86



Gambar 3. Grafik laju peluruhan sampel ADB yang berakhir di zona pembuangan untuk tiap ukuran ADB selama durasi komputasi 5×10^6 tahun.

Nilai-nilai di Tabel 5 berbeda dengan hasil yang diperoleh Gladman dkk. (2000) yang mengintegrasikan 117 sampel ADB selama 60 juta tahun. Gladman dkk. (2000) memperoleh nilai-tengah kala hidup sebesar 10^7 tahun dan menyisakan hanya 16% asteroid pada akhir waktu komputasi. Selain itu, hasil penelitian ini juga berbeda dengan hasil penelitian Fauziah dkk. (2020) yang mendapatkan nilai-tengah kala hidup sebesar 9×10^6 tahun dan masih menyisakan 79%

sampel asteroid dari 3372 sampel ADB dengan $H < 18$ hingga akhir waktu komputasi selama 2 juta tahun. Komputasi orbit dalam kedua pekerjaan tersebut hanya melibatkan interaksi gravitasi antara sampel ADB dengan Matahari, planet, dan Bulan, tanpa menyertakan efek Yarkovsky sebagaimana yang dilakukan dalam pekerjaan ini. Penggunaan sampel ADB yang berbeda ukuran fisiknya, jumlah sampel yang

digunakan, dan durasi komputasi dapat memunculkan perbedaan yang dijumpai.

3.2. Frekuensi Tumbukan Populasi ADB

Cara untuk mendapatkan nilai probabilitas tumbukan antara dua orbit heliosentrik salah satunya adalah dengan memperkirakan laju tumbukan yang diamati secara langsung dalam simulasi numerik. Namun untuk menghindari permasalahan *small number statistics*, dalam penelitian ini peristiwa tumbukan diidentifikasi dengan kriteria MOID < radius Hill (Galiazzo dkk., 2013).

Radius Hill untuk setiap planet dan Bulan dihitung menggunakan persamaan (6) (Hamilton & Burns, 1991).

$$r_{Hill} = a (1 - e) \left[\left(\frac{m}{3M} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \tag{6}$$

dengan *a* merupakan setengah sumbu panjang planet, *e* eksentrisitas planet, *m* massa planet dan *M* massa Matahari. Merujuk

Galad (2005), frekuensi tumbukan dapat dihitung berdasarkan Persamaan (7) berikut:

$$f = N(< H) P_i R_C^2 \tag{7}$$

dengan *N(< H)* merupakan estimasi populasi ADB yang setara dengan *N(> D)* sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2. Radius tangkapan gravitasi planet *R_C* ditentukan menggunakan persamaan (8):

$$R_C = R \sqrt{1 + \frac{V^2}{v^2}} \tag{8}$$

dengan *R* merupakan radius geometri planet/Bulan, *V* kelajuan lepas dari permukaan planet/Bulan, dan *v* kelajuan planetosentrik asteroid. Nilai *v* yang digunakan untuk planet-planet kebumihan merupakan median kelajuan tumbukan (*v_{imp}*) asteroid terhadap masing-masing planet mengikuti Minton & Malhotra (2010). Nilai *v_{imp}* yang digunakan untuk Bulan diperoleh dari

Tabel 6. Besar radius Hill (*R_H*), median kelajuan tumbukan (*v_{imp}*), radius tangkapan gravitasi (*R_C*), dan probabilitas tumbukan intrinsik setiap planet kebumihan.

Objek	<i>R_H</i> (sa)	<i>v_{imp}</i> (km/s)	<i>R_C</i> (sa)	<i>P_i</i> (tahun ⁻¹ km ⁻²)
Merkurius	1,17×10 ⁻³	38,1	1,64×10 ⁻⁵	1,99×10 ⁻¹⁷
Venus	6,71×10 ⁻³	23,4	4,42×10 ⁻⁵	6,31×10 ⁻¹⁸
Bumi	9,83×10 ⁻³	18,9	4,95×10 ⁻⁵	6,20×10 ⁻¹⁸
Bulan	3,89×10 ⁻⁴	42,6	1,16×10 ⁻⁵	1,08×10 ⁻¹⁶
Mars	6,58×10 ⁻³	12,4	2,44×10 ⁻⁵	7,42×10 ⁻¹⁸

Tabel 7. Waktu antartumbukan antara ADB dengan planet-planet kebumihan dan Bulan.

<i>D</i> (m)	1/ <i>f</i> (tahun)				
	Merkurius	Venus	Bumi	Bulan	Mars
≥ 36	3618	1571	1277	1335	4376
≥ 111	51.248	22.249	18.089	18.901	61.983
≥ 186	172.750	74.999	60.975	63.711	208.938
≥ 261	383.491	166.493	135.361	141.435	463.826
≥ 336	695.003	301.735	245.315	256.322	840.593
≥ 411	1.116.780	484.849	394.189	411.877	1.350.724
≥ 486	1.657.012	719.391	584.874	611.119	2.004.125
≥ 561	2.322.964	1.008.513	819.935	856.727	2.809.581
≥ 636	3.121.203	1.355.068	1.101.689	1.151.123	3.775.035
≥ 711	4.057.747	1.761.668	1.432.260	1.496.528	4.907.768
≥ 786	5.138.172	2.230.734	1.813.617	1.894.996	6.214.521
≥ 861	6.367.682	2.764.525	2.247.596	2.348.449	7.701.590
≥ 936	7.751.170	3.365.165	2.735.925	2.858.690	9.374.893

median kecepatan ADB ketika berpapasan dengan Bulan dari komputasi numerik yang dijalankan. Tabel 6 menyajikan nilai v_{imp} yang digunakan dalam pekerjaan ini.

Dengan mengetahui banyaknya papasan yang terjadi (M) di jarak kurang dari nilai tertentu (r) selama waktu t , probabilitas tumbukan intrinsik (P_i) dapat dihitung menggunakan Persamaan 9 (Galad, 2005):

$$P_i = \frac{M}{Nt r^2} \quad (9)$$

yang nilainya spesifik untuk setiap objek masif. Nilai *collisional lifetime* (CLT), yaitu $1/f$, yang menyatakan rata-rata selang waktu antartumbukan antara ADB dengan planet-planet kebumihan dan Bulan ditunjukkan dalam Tabel 7. Perhitungan yang sama untuk setiap rentang diameter ADB disajikan dalam Tabel 8.

Dari Tabel 7 dan Tabel 8, terlihat bahwa frekuensi tumbukan antara asteroid dengan planet dan Bulan berbanding terbalik dengan ukuran asteroid. Berdasarkan Tabel 7 dan Tabel 8, planet kebumihan yang memiliki frekuensi tumbukan terbesar hingga terkecil dengan ADB berukuran kecil ($D < 1$ km) berturut-turut adalah Bumi, Bulan, Venus, Merkurius, dan Mars. Perbedaan nilai CLT yang diperoleh untuk setiap objek masif dalam Tabel 7 dan Tabel 8 semata karena adanya pembagian rentang ukuran (Tabel 8) yang berdampak pada perbedaan jumlah taksiran

kumulatif populasi yang digunakan dalam perhitungan.

Orde selang waktu antartumbukan yang melibatkan ADB berukuran kecil (hingga $H \leq \sim 25$ yang setara dengan $D \geq 36$ m) dengan planet Bumi yang diperoleh dalam pekerjaan ini konsisten dengan hasil dari Emel'yanenko & Naroenkov (2015) yang menggunakan sampel ADB hingga $H < 27$ (bersesuaian dengan $D > 14$ m). Untuk objek dengan diameter berorde beberapa ratus meter, hasil kami menunjukkan pula kesesuaian dengan prediksi yang diberikan oleh Stuart & Binzel (2004). Semakin besar ukuran objek penumbuk, semakin lama CLT yang diperoleh. Untuk populasi ADB dengan $H < 22,75$ ($D > 100$ m), taksiran yang kami hasilkan adalah ~ 14.000 tahun, sangat dekat dengan perolehan Morbidelli dkk. (2020), yaitu sebesar ~ 15.000 tahun. Nesvorný & Roig (2018) yang secara khusus meninjau ADB berukuran besar ($D > 10$ km) menunjukkan bahwa untuk populasi ini selang waktu antartumbukan dengan Bumi terjadi dalam interval yang lebih lama, yaitu 1 tumbukan setiap ~ 1 miliar tahun. Hasil yang kami peroleh menegaskan bahwa potensi bahaya dalam skala waktu yang jauh lebih singkat daripada skala waktu geologi maupun kosmik namun dengan dampak kerusakan berskala lokal hingga regional yang melibatkan energi $\sim 10^{16} - 10^{18}$ Joule atau lebih besar (Stuart & Binzel, 2004), dapat ditimbulk-

Tabel 8. Waktu antartumbukan antara ADB dengan planet-planet kebumihan dan Bulan untuk tiap rentang D .

D (m)	$1/f$ (tahun)				
	Merkurius	Venus	Bumi	Bulan	Mars
36 - 111	3893	1690	1374	1436	4709
111 - 186	72.863	31.633	25.718	26.872	88.127
186 - 261	314.357	136.478	110.958	115.937	380.208
261 - 336	855.595	371.456	301.999	315.550	1.034.826
336 - 411	1.840.226	798.933	649.543	678.689	2.225.719
411 - 486	3.425.411	1.487.140	1.209.065	1.263.317	4.142.970
486 - 561	5.779.967	2.509.369	2.040.151	2.131.695	6.990.760
561 - 636	9.083.051	3.943.400	3.206.038	3.349.897	10.985.778
636 - 711	13.523.174	5.871.077	4.773.266	4.987.448	16.356.022
711 - 786	19.297.415	8.377.960	6.811.396	7.117.031	23.339.857
786 - 861	26.610.795	11.553.058	9.392.794	9.814.261	32.185.251
861 - 936	35.675.746	15.488.601	12.592.444	13.157.483	43.149.137
936 - 1000	53.761.046	23.340.321	18.976.000	19.827.477	65.022.963

kan oleh tumbukan antara Bumi dengan objek-objek angkasa berdiameter beberapa ratus meter. Mengingat ketuntasan observasi terhadap total populasi ADB dalam orde ukuran ini masih jauh dari 100%, survei langit baik landas Bumi maupun landas layang menjadi penting untuk dilakukan.

4. Kesimpulan

Selama rentang waktu komputasi orbit 5×10^6 tahun ke masa depan untuk 2387 sampel ADB dengan orbit yang dikenal baik ($U = 0$) dan $D < 1$ km, telah ditunjukkan bahwa fluks masuk ke zona pembuangan berbanding terbalik dengan diameternya. Pada akhir komputasi orbit diperoleh fluks masuk sampel ADB ke zona pembuangan sebesar ~ 161 hingga ~ 335.330 asteroid per juta tahun.

Probabilitas tumbukan intrinsik, P_i , terkecil dimiliki oleh planet Mars, yaitu $7,42 \times 10^{-18}$ tahun⁻¹ km⁻² dan yang terbesar dimiliki oleh Bulan, senilai $1,08 \times 10^{-16}$ tahun⁻¹ km⁻². Frekuensi tumbukan yang dihitung untuk suatu rentang diameter (Tabel 8) memiliki nilai lebih kecil daripada frekuensi tumbukan tanpa menerapkan batas atas diameter (Tabel 7). Planet kebumihan dengan frekuensi tumbukan mulai dari yang terbesar, berturut-turut adalah Bumi, Bulan, Venus, Merkurius, dan Mars. Waktu antartumbukan paling singkat dimiliki oleh Bumi, yaitu terjadi satu tumbukan tiap 1374 tahun dan paling lama dimiliki oleh Mars dengan satu tumbukan tiap 4709 tahun tahun yang melibatkan asteroid hingga seukuran $D = 36$ m.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Riset dan Teknologi (KEMDIKBUD-RISTEK) Republik Indonesia dengan kontrak bernomor 281/UN40.LP/ PT.01.03/2021.

Pernyataan Kontribusi

Judhistira Aria Utama berkontribusi dalam akuisisi data, komputasi, analisis hasil komputasi, dan berpartisipasi dalam semua aspek diskusi serta penulisan artikel; Wahyudin berpartisipasi dalam diskusi dan penulisan artikel; Nanang Dwi Ardi terlibat dalam diskusi dan koreksi penulisan artikel; Taufiq Hidayat dan Lala Septem Riza melakukan analisis hasil komputasi dan berpartisipasi dalam diskusi.

Rujukan

- 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.
- 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.
- Bottke Jr, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., & Nesvorný, D. (2006). The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, 157-191.
- Brown, P. G., Assink, J. D., Astiz, L., Blaauw, R., Boslough, M. B., Borovička, J., ... & Krzeminski, Z. (2013). A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503(7475), 238-241.
- De La Fuente Marcos, C., & De La Fuente Marcos, R. (2020). On the orbital evolution of 2020 AV2, the first asteroid ever observed to go around the Sun inside the orbit of Venus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 494(1), L6-L10.
- Dermawan, B., Hidayat, T., & Utama, J. A. (2013). Pengembangan integrator swift_rmvs4 dengan melibatkan efek termal. In *Prosiding Seminar HAI (Himpunan Astronomi Indonesia)* (Vol. 90, pp. 1-4).
- Emel'yanenko, V. V., & Naroenkov, S. A. (2015). Dynamical features of hazardous near-Earth objects. *Astrophysical Bulletin*, 70(3), 342-348.
- Fauziah, A. N. I., Utama, J. A., & Simatupang, F. M. (2020). Jarak Minimum Orbit dan Tumbukan Populasi Asteroid dekat-Bumi dengan Planet Bumi. *Wahana Fisika*, 5(1), 18-27.
- Fowler, J. W., & Chillemi, J. R. (1992). IRAS asteroid data processing. *The IRAS Minor Planet Survey*, 17.
- Galad, A. (2005). On intrinsic collision probability of subkilometer asteroids with the Earth. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 35, 65-75.
- Galiazzo, M. A., Bazsó, Á., & Dvorak, R. (2013). Fugitives from the Hungaria region: Close encounters and impacts with terrestrial planets. *Planetary and Space Science*, 84, 5-13.

- Gladman, B., Michel, P., & Froeschlé, C. (2000). The near-Earth object population. *Icarus*, 146(1), 176-189.
- Greenstreet, S., Ngo, H., & Gladman, B. (2012). The orbital distribution of near-Earth objects inside Earth's orbit. *Icarus*, 217(1), 355-366.
- Hamilton, D. P., & Burns, J. A. (1991). Orbital stability zones about asteroids. *Icarus*, 92(1), 118-131.
- JeongAhn, Y., & Malhotra, R. (2015). The current impact flux on Mars and its seasonal variation. *Icarus*, 262, 140-153.
- JeongAhn, Y., & Malhotra, R. (2017). Simplified derivation of the collision probability of two objects in independent Keplerian orbits. *The Astronomical Journal*, 153(5), 235.
- Levison, H. F., & Duncan, M. J. (1994). The long-term dynamical behavior of short-period comets. *Icarus*, 108(1), 18-36.
- Minton, D. A., & Malhotra, R. (2010). Dynamical erosion of the asteroid belt and implications for large impacts in the inner Solar System. *Icarus*, 207(2), 744-757.
- Morais, M. H. M., & Morbidelli, A. (2002). The population of near-earth asteroids in coorbital motion with the earth. *Icarus*, 160(1), 1-9.
- Morbidelli, A., Delbo, M., Granvik, M., Bottke, W. F., Jedicke, R., Bolin, B., ... & Vokrouhlicky, D. (2020). Debaised albedo distribution for Near Earth Objects. *Icarus*, 340, 113631.
- Morbidelli, A., Bottke, W. F., Froeschlé, C., & Michel, P. (2002). Origin and evolution of near-Earth objects. *Asteroids III*, 409.
- Napier, B., & Asher, D. (2009). The Tunguska impact event and beyond. *Astronomy & Geophysics*, 50(1), 1-18.
- Nesvorný, D., & Roig, F. (2017). Dynamical origin and terrestrial impact flux of large near-Earth asteroids. *The Astronomical Journal*, 155(1), 42.
- Rickman, H., Wiśniowski, T., Wajer, P., Gabryszewski, R., & Valsecchi, G. B. (2014). Monte Carlo methods to calculate impact probabilities. *Astronomy & Astrophysics*, 569, A47.
- Rickman, H., Wiśniowski, T., Gabryszewski, R., Wajer, P., Wójcikowski, K., Szutowicz, S., ... & Morbidelli, A. (2017). Cometary impact rates on the Moon and planets during the late heavy bombardment. *Astronomy & Astrophysics*, 598, A67.
- Sanchez, J. P., & McInnes, C. (2011). Asteroid resource map for near-Earth space. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 48(1), 153-165.
- Stuart, J. S. (2003). *Observational constraints on the number, albedos, size, and impact hazards of the near-Earth asteroids* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Stuart, J. S., & Binzel, R. P. (2004). Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects. *Icarus*, 170(2), 295-31.
- Tricarico, P. (2017). The near-Earth asteroid population from two decades of observations. *Icarus*, 284, 416-423.
- Wahyudin, Utama, J. A., & Rusdiana, D. (2020). Frekuensi Tumbukan Populasi Asteroid dekat-Bumi Berukuran Kecil terhadap Planet-Planet Kebumihan. In *Seminar Nasional Fisika* (Vol. 1, No. 1, pp. 275-280).
- Wisdom, J., & Holman, M. (1991). Symplectic maps for the n-body problem. *The Astronomical Journal*, 102, 1528-1538.
- Wiśniowski, T., & Rickman, H. (2013). Fast geometric method for calculating accurate minimum orbit intersection distances. *Acta Astronomica*, 63(2), 293-307.