

RELASI APROKSIMASI ANTARA DIAMETER KAWAH TUMBUKAN DI BUMI DAN UKURAN OBJEK PENUMBUK DARI SIMULASI NUMERIK (THE APPROXIMATE RELATION BETWEEN THE DIAMETER OF TERRESTRIAL IMPACT CRATER AND THE IMPACTOR'S SIZE FROM NUMERICAL SIMULATION)

Judhistira Aria Utama^{1*}, Taufiq Hidayat², Ferry Mukharradi Simatupang², Umar Fauzi³

¹Program Studi Doktor Astronomi FMIPA Institut Teknologi Bandung

²KK Astronomi FMIPA Institut Teknologi Bandung

³KK Fisika Bumi dan Sistem Kompleks FMIPA Institut Teknologi Bandung

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

Diterima 20 Februari 2018; Direvisi 28 Mei 2018; Disetujui 22 Juni 2018

ABSTRACT

Impact craters can be found on the surface of the Moon and terrestrial planets. This study aimed to obtain an approximate relation between the diameters of the impact craters on Earth against the size of the causative objects. The study was conducted by employing N-body numerical simulation of thousands of real near-Earth asteroids in well-known orbits with the use of Swift_RMVS4 integrator. Accommodating the assumption that the number of craters formed on the Earth's surface is equal to the number of near-Earth asteroids as impactors in a given period of time, it is found that asteroids with diameter of 8.5 km and ~6 km are required to produce large known craters, Chicxulub (~180 km) and Popigai (~100 km) craters, respectively. These values are smaller than previously predicted by *hydrocode* model. The knowledge of impactor's physical size can be used to estimate the amount of impact energy, which is also related to the strategy of required mitigation.

Keywords: *near-Earth asteroids, impact craters, impact energy*

ABSTRAK

Kawah-kawah hasil tumbukan benda-benda angkasa dapat dijumpai di permukaan Bulan dan planet-planet terestrial. Studi ini mencoba memperoleh relasi aproksimasi antara diameter kawah tumbukan di Bumi terhadap ukuran objek yang diperlukan untuk membentuk kawah tersebut. Studi dilakukan menggunakan simulasi numerik N-benda berbantuan integrator Swift_RMVS4 terhadap ribuan sampel asteroid dekat-Bumi nyata dalam orbit yang telah dikenal dengan baik. Dengan asumsi bahwa jumlah kawah yang dibentuk di permukaan Bumi sama dengan banyaknya asteroid dekat-Bumi yang menumbuk dalam kurun waktu tertentu, diperoleh bahwa kawah-kawah besar yang dikenal, Chicxulub (D ~180 km) dan Popigai (D ~100 km), dihasilkan oleh tumbukan asteroid dengan diameter masing-masing 8,5 km dan ~6 km. Nilai ini lebih kecil dibandingkan prediksi sebelumnya oleh model *hydrocode*. Pengetahuan tentang ukuran fisik asteroid penumbuk dapat digunakan untuk mengestimasi besarnya energi tumbukan yang dihasilkan, berhubungan pula dengan strategi metode mitigasi yang diperlukan.

Kata kunci: *asteroid dekat-Bumi, kawah tumbukan, energi tumbukan*

1 PENDAHULUAN

Per tanggal 5 September 2017, terdapat 16.530 asteroid yang memiliki jarak perihelion $q < 1,3$ sa dan jarak aphelion $Q > 0,983$ sa.¹ Mayoritas dari kelompok yang dikenal sebagai asteroid dekat-Bumi (ADB) ini berakhir sebagai penumbuk Matahari atau terlempar ke bagian luar Tata Surya ($a > 100$ sa) (Farinella *et al.*, 1994; Gladman *et al.*, 1997). Sementara hanya sekitar 1% yang berakhir dengan menumbuk planet Bumi (Gladman *et al.*, 1997; Morbidelli dan Gladman, 1998).

Perbedaan strategi pencarian dan hadirnya batasan fluks yang mampu dipindai oleh beragam program survei asteroid, telah menghasilkan bias pengamatan yang muncul dalam distribusi elemen orbit teramati (Bottke *et al.*, 2000; Bottke *et al.*, 2002). Populasi ADB berukuran besar dan terang akan relatif lebih mudah untuk ditemukan saat ber-ada di dekat Bumi dibandingkan dengan yang berukuran kecil dan gelap.

Bumi senantiasa mengalami peristiwa tumbukan dengan fragmen-fragmen beragam ukuran. Yang perlu diantisipasi adalah keberadaan objek-objek berukuran besar (dalam orde kilometer) dan gelap (memiliki albedo yang rendah) dengan nilai-nilai elemen orbit (e , i) yang besar sehingga sulit untuk dideteksi. Objek-objek seperti ini diyakini dapat mengakibatkan bencana dalam skala regional hingga global bila bertumbukan dengan Bumi.

Menggunakan simulasi numerik terhadap sampel ADB nyata yang mendapati 50 kejadian aktual tumbukan dengan planet Bumi, pekerjaan ini hendak memperoleh hubungan antara diameter kawah tumbukan yang terbentuk dengan garis tengah objek penumbuknya. Informasi ukuran fisik objek diperlukan dalam mengestimasi besarnya energi tumbukan yang

dihasilkan dan strategi metode mitigasi yang diperlukan.

2 LANDASAN TEORI

Dengan memanfaatkan data populasi ADB dalam rentang $17 \leq H \leq 20$ (H menyatakan magnitudo mutlak asteroid di jarak 1 sa dengan sudut fase 0°) yang orbitnya berpotongan dengan orbit Bumi dan telah diamati selama lebih dari 30 hari, Galad (2005) menjumpai adanya indikasi bahwa probabilitas tumbukan intrinsik P_i memiliki kebergantungan terhadap H sebagai akibat hadirnya bias pengamatan. Kecenderungan umum berkurangnya nilai P_i dengan semakin terangnya asteroid adalah konsekuensi dari lebih mudah diamati dan lebih seringnya asteroid-asteroid dengan nilai a (setengah sumbu panjang orbit), e (eksentrisitas orbit), dan i (inklinasi orbit) yang kecil untuk berada di dekat Bumi dibandingkan dengan asteroid-asteroid yang memiliki nilai-nilai (a , e , i) besar, yang menghadirkan bias pengamatan sebagaimana dimaksud.

Dari berbagai simulasi numerik (lihat misalnya, Farinella *et al.*, 1994; Gladman *et al.*, 1997) telah diketahui bahwa mayoritas populasi ADB mengakhiri evolusinya karena mengalami tumbukan dengan Matahari dan terlempar ke bagian luar Tata Surya. Dalam jumlah minor (Gladman *et al.*, 1997; Morbidelli dan Gladman, 1998), ADB dapat pula bertumbukan dengan planet-planet.

Bukti nyata bahwa telah terjadi tumbukan antara populasi ADB dengan planet-planet adalah dengan ditemukannya kawah-kawah hasil tumbukan di permukaan planet-planet terestrial dan permukaan Bulan, yang bukan diakibatkan oleh aktivitas vulkanik. Distribusi ukuran ADB penghasil kawah-kawah besar di permukaan pla-net dan satelit alam dipercaya meme-nuhi hukum pangkat,

¹ Data tersedia di laman http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi

yang secara logaritmik dapat dituliskan sebagai (Hughes, 2003),

$$\log N(D) = C_1 - C_2 \log D \quad (2-1)$$

dengan $N(D)$ menyatakan jumlah penumbuk dengan diameter D lebih besar daripada nilai tertentu dari sampel yang spesifik. Observasi terhadap asteroid-asteroid besar di Sabuk Utama dan keluarga asteroid dengan banyak anggota, mengindikasikan nilai gradien C_2 mendekati -3 (Zappalà *et al.*, 1984; Hughes dan Harris, 1994).

Sementara itu, laju pembentukan kawah tumbukan dengan diameter D' yang lebih besar daripada nilai tertentu per satuan waktu di seluruh permukaan objek target, secara logaritmik dapat dituliskan sebagai (Hughes, 2002),

$$\log \varphi = \log F + \gamma \log D' \quad (2-2)$$

dengan F suatu konstanta dan γ gradien bagian linier dari rajah $\log(\varphi)$ terhadap $\log(D')$. Hughes (2000) telah memperoleh nilai laju pembentukan kawah-kawah besar ($D' \geq 20$ km) hasil tumbukan sebesar $3,46 \times 10^{-15}$ km⁻² tahun⁻¹.

3 DATA DAN METODE

Dari jumlah total data asteroid per tanggal 3 Maret 2016, melalui proses seleksi yang hanya menyertakan objek berupa asteroid dengan orbit yang telah dikenal sangat baik, berhasil diperoleh 3372 sampel ADB yang akan diikuti jejak evolusinya. Yang dimaksud dengan orbit yang telah dikenal sangat baik adalah orbit yang memiliki ketidakpastian terkecil. *Minor Planet Center* mengkuantisasi ketidakpastian orbit ini melalui penggunaan parameter U yang memiliki nilai bilangan bulat dari 0 (memiliki ketidakpastian sangat kecil) hingga 9 (memiliki ketidakpastian sangat besar).

Seluruh ADB yang terseleksi adalah asteroid dengan nilai parameter $U = 0$, yaitu asteroid dengan batas galat orbit kurang dari 1" (detik busur) per dekade. Orbit dari sampel terpilih,

sebanyak 1407 asteroid diketahui berasal dari kelas Amor ($a > 1$ sa, 1,017 sa < $q < 1,3$ sa), 1740 asteroid kelas Apollo, 222 asteroid kelas Aten, dan 3 asteroid kelas Atira ($a < 1$ sa, $Q < 0,983$ sa).

Komputasi numerik dilakukan dengan memanfaatkan paket *integrator* Swift_RMVS4 (Levison dan Duncan, 1994) yang telah dimodifikasi untuk mengakomodasi efek termal (Yarkovsky) selain gravitasi (Dermawan, 2013).

Paket *integrator* yang digunakan merupakan pengembangan atas program Swift dari Levison dan Duncan (1994). Versi RMVS4 merupakan varian terakhir yang memungkinkan per-hitungan peristiwa papasan dekat antara asteroid dan objek masif dengan lebih teliti, karena pada saat asteroid mendekati planet, misalnya, asteroid akan dipandang sebagai objek yang mengorbit planet dengan gangguan dari Matahari dan otomatis program akan memperhalus langkah waktu (*time-step*) perhitungan. Dengan demikian, melalui penggunaan paket *integrator* Swift_RMVS4 ini dapat dilakukan perhitungan evolusi orbit dengan lebih akurat, terutama saat terjadi papasan dekat antara ADB dengan Matahari ataupun planet dan untuk waktu evolusi yang panjang (>10⁵ tahun) dengan telah disertakannya pula kontribusi efek termal (Yarkovsky).

Komputasi numerik dijalankan dengan melibatkan 10 objek masif di Tata Surya (Matahari dan kedelapan planet serta Bulan yang diperlakukan sebagai objek mandiri) dengan strategi segmentasi waktu (kelipatan 5×10^5 tahun) selama 5×10^6 tahun. Komputasi berjalan dengan langkah waktu 10⁻³ tahun (~9 jam) dan hasilnya dicuplik setiap 10³ tahun. Jejak evolusi orbital sampel ADB diikuti hingga ada objek yang tereliminasi karena menumbuk objek masif atau terlempar ke bagian luar Tata Surya di jarak > 100 sa. Proses tumbukan antar-asteroid dan peristiwa disrupsi yang juga dapat menjadi sebab

tereliminasi objek tidak ditinjau di dalam pekerjaan ini.

Dengan disertakannya efek Yarkovsky di dalam komputasi, diperlukan nilai-nilai parameter fisis untuk setiap asteroid. Dalam hal informasi tersebut tidak tersedia, nilai yang disematkan kepada asteroid mengacu pada sejumlah literatur yang tersedia (lihat misalnya, Brož, 2006; Holsapple, 2007; Kryszczyńska *et al.*, 2007; Usui *et al.*, 2013; dan Farnocchia *et al.*, 2013).

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Keluaran komputasi numerik berupa sampel ADB yang berakhir dengan menumbuk planet Bumi telah dimanfaatkan untuk memperoleh distribusi ukuran penumbuk. Ukuran asteroid dinyatakan oleh diameter D atau diwakilli oleh nilai H . Besaran H inilah yang tersedia lengkap di laman JPL-NASA *Small Body Database Search Engine*² untuk seluruh sampel ADB terpilih. Nilai H dapat dikonversi menjadi informasi diameter D (dalam satuan kilometer) melalui nilai albedo geometrik p_v yang diketahui atau diasumsikan nilainya, memanfaatkan hubungan berikut (Fowler dan Chillemi, 1992),

$$D = \frac{1329}{p_v} 10^{-\frac{H}{5}} \quad (4-1)$$

Hasil keluaran sebanyak 50 data ini belum pernah digunakan untuk menghitung distribusi ukuran aktual ADB kandidat penumbuk planet Bumi. Gambar 4–1 merupakan rajah kumulatif jumlah asteroid dengan $D > D_0$ (disimbolkan dengan N) sebagai fungsi D dalam skala logaritma. Profil garis lurus terlihat dengan jelas di sisi kanan kumpulan data asteroid berdiameter besar dan merepresentasikan data yang lengkap. Garis ini memiliki gradien sekitar -5.

Hughes (2003) berpendapat bahwa populasi ADB memiliki distribusi ukuran yang tidak berbeda dari asteroid-asteroid Sabuk Utama. Observasi terhadap asteroid-asteroid besar di Sabuk Utama dan keluarga asteroid dengan banyak anggota, mengindikasikan nilai gradien sekitar -3 (Zappalà *et al.*, 1984; Hughes dan Harris, 1994).

Di dalam pekerjaan ini justru dijumpai bahwa distribusi ukuran ADB sangat mungkin berbeda dari asteroid Sabuk Utama, mengingat populasi ADB yang memperoleh suplai dari kawasan Sabuk Utama merupakan “asteroid pilhan”. Dikatakan “asteroid pilihan” karena mekanisme yang mengirimkan asteroid dari Sabuk Utama menuju daerah resonansi kuat dan sekular melalui efek Yarkovsky, diketahui memiliki kebergantungan terhadap ukuran. Hanya objek dengan diameter 10 cm hingga 40 km yang dapat mengalami perubahan sekular di dalam energi orbitnya akibat efek ini melalui emisi termal non-isotropik yang mengakibatkan sistem kehilangan momentum dan kalor. Hal ini sejalan dengan temuan Morbidelli dan Vokrouhlický (2003) melalui simulasi numerik yang memodelkan daerah asal ADB dari kawasan Sabuk Utama yang memperoleh bahwa distribusi ukuran ADB berbeda dari asteroid Sabuk Utama. Dengan kata lain ADB terdiri atas objek-objek dengan ukuran yang relatif lebih kecil daripada asteroid Sabuk Utama.

Data asteroid penumbuk Bumi keluaran komputasi numerik dalam pekerjaan ini terlihat menyimpang dari hubungan linier logaritmik untuk diameter asteroid kurang dari ~2 km. Tidak ada alasan khusus yang membuat batas nilai diameter ini mempunyai arti istimewa dalam konteks ADB. Salah satu interpretasi yang dimungkinkan terkait hal ini berkaitan dengan hasil

² Data tersedia di laman http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi

survei ADB yang telah dilakukan, yaitu bahwa kita sudah mengetahui dengan baik populasi asteroid dengan $D > 2$ km, namun tidak demikian halnya untuk $D < 2$ km. Dengan menggunakan hubungan linier terhadap kumpulan data di bagian kanan Gambar 4-1 yang berbentuk,

$$\log N = 2,94 - 4,82 \log D \tag{4-2}$$

dapat diketahui jumlah ADB dengan $D > D_0$ yang menumbuk Bumi.

Dengan memanfaatkan informasi nilai ϕ dalam Persamaan (2-2) sebesar $3,46 \times 10^{-15} \text{ km}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$ (Hughes, 2000), laju pembentukan kawah tumbukan per 5×10^6 tahun di seluruh permukaan Bumi adalah,

$$\log \phi = 4,32 - 2,59 \log D' \tag{4-3}$$

Nilai laju pembentukan kawah tumbukan di permukaan planet-planet terestrial dan satelitnya adalah konstan. Dengan mengasumsikan jumlah kawah tumbukan yang terbentuk di permukaan Bumi sama dengan jumlah ADB penumbuk dalam selang waktu yang sama, ruas kanan dalam Persamaan (4-2) dan Persamaan (4-3) haruslah identik, yaitu,

$$\log D' = 0,53 + 1,86 \log D \tag{4-4}$$

Persamaan (4-4) dapat digunakan untuk memperoleh diameter kawah tumbukan D' di permukaan Bumi sebagai fungsi diameter asteroid D ($D > 2$ km). Hasil penerapan Persamaan (4-4) untuk memperoleh estimasi diameter objek penumbuk terhadap sejumlah kawah-kawah tumbukan³ berusia kurang dari $1,20 \times 10^8$ tahun di permukaan Bumi disajikan dalam Tabel 4-1.

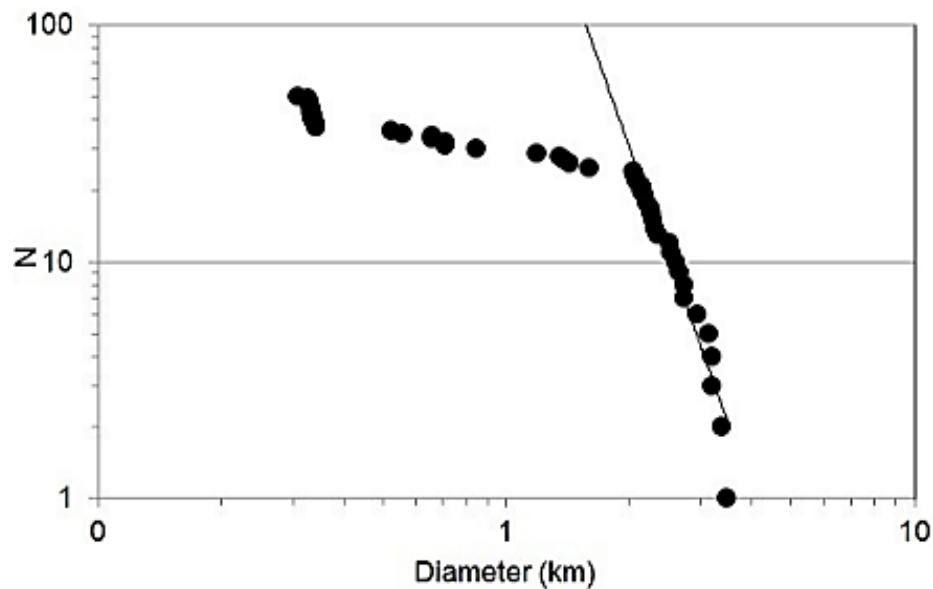
Estimasi ukuran proyektil dengan $D \geq 2$ km yang menghasilkan kawah-kawah tumbukan yang dikenal, dapat dibandingkan dengan prediksi hasil penelitian lainnya yang dijumpai dalam literatur. Untuk kawah tumbukan dengan $D' > 85$ km, Hughes (2003) memprediksi diperlukan asteroid dengan ukuran yang lebih besar daripada yang diperoleh menggunakan Persamaan (4-4). Perbedaan ukuran proyektil tersebut bisa mencapai ~26% untuk kawah dengan $D' = 180$ km. Kecenderungan sebaliknya terjadi untuk ukuran kawah yang memiliki $D' < 85$ km.

Bottke *et al.* (2016) menentukan *scaling law* (lihat misalnya, Horedt dan Neukum, 1984) untuk kawah-kawah tumbukan secara empirik memanfaatkan ADB yang telah diketahui saat ini ($D > 1$ km) dalam memproduksi kawah-kawah tumbukan muda ($\leq 3 \times 10^9$ tahun) berdiameter $D' > 10$ km-20 km di Bulan, Venus, dan Mars.

Tabel 4-1: KAWAH-KAWAH TUMBUKAN DI PERMUKAAN BUMI.

Nama Kawah	Diameter Kawah (D') dalam km	Diameter Asteroid (D) dalam km	D'/D
Sierra Madera	13	2,06	6,31
Boltysh	24	2,86	8,39
Steen River	25	2,93	8,53
Carswell	39	3,72	10,48
Montagnais	45	4,02	11,19
Chesapeake Bay	85	5,65	15,04

³ Data tersedia di laman <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase>



Gambar 4-1: Distribusi ukuran ADB penumbuk planet Bumi

Dengan fungsi *scaling law* sederhana berupa $f = D_{\text{kawah}}/D_{\text{asteroid}}$ dan mengasumsikan *scaling law* untuk Bulan, Venus, dan Mars berlaku pula untuk Bumi, diperoleh bahwa diperlukan asteroid dengan ukuran lebih kecil daripada yang diperkirakan model *hydrocode* (Collins *et al.*, 2002) untuk dapat menghasilkan kawah-kawah besar hasil tumbukan di Bumi. Dengan menjadikan kawah-kawah Chicxulub ($D' \sim 180$ km) dan Popigai ($D' \sim 100$ km) sebagai kawah uji, Bottke *et al.* (2016) memperoleh diameter asteroid penumbuk Bumi masing-masing sebesar 7-8 km dan 3-4,5 km, yang bersesuaian dengan estimasi dari analisis kandungan Iridium (Ir).

Dengan menerapkan Persamaan (4-4) untuk kedua kawah besar tersebut, diperoleh diameter asteroid masing-masing adalah 8,5 km dan ~ 6 km, sementara dengan model Hughes (2003) diperoleh 11,5 km dan ~ 7 km.

Morbidelli *et al.* (2002) telah mampu mengestimasi frekuensi tumbukan dan distribusi orbital objek penumbuk memanfaatkan model orbital-magnitudo-albedo yang mereka bangun. Dengan mengasumsikan asteroid penumbuk memiliki massa jenis rata-rata 3650 kg m^{-3} (sama dengan massa

jenis rata-rata meteorit batuan yang ditemukan di Bumi; lihat misalnya, Sears, 1978) dan rata-rata kelajuan tumbukan sebesar $20,8 \text{ km s}^{-1}$ (Harris dan Hughes, 1994), memanfaatkan Persamaan (11) dalam Morbidelli *et al.* (2002) dapat diperoleh energi tumbukan yang membentuk kawah Chicxulub dan Popigai, yaitu masing-masing sebesar $2,50 \times 10^{23} \text{ J}$ ($5,98 \times 10^7$ megaton TNT) dan $9,70 \times 10^{22} \text{ J}$ ($2,32 \times 10^7$ megaton TNT).

5 KESIMPULAN

Memanfaatkan hasil keluaran komputasi numerik berupa kejadian faktual tumbukan antara Bumi dan asteroid, telah berhasil diperoleh relasi aproksimasi yang menghubungkan diameter kawah tumbukan dengan garis tengah objek penumbuknya. Penerapan relasi yang diperoleh terhadap kawah-kawah Chicxulub ($D' \sim 180$ km) dan Popigai ($D' \sim 100$ km), mendapatkan diameter asteroid pembentuk masing-masing kawah adalah 8,5 km dan ~ 6 km. Hasil ini relatif dekat dengan estimasi diameter asteroid yang diperoleh dari analisis kandungan Iridium (Ir) untuk kedua kawah tersebut, yaitu masing-masing sebesar 7-8 km dan 3-4,5 km.

UCAPAN TERIMA KASIH

Judhistira Aria Utama mengucapkan terima kasih kepada Dr. Budi Dermawan yang telah memperkenalkan topik Benda Kecil Tata Surya dan untuk dedikasinya dalam berbagi ilmu. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada *Jet Propulsion Laboratory* NASA dan *Regional Geophysics Section of Natural Resources Canada* yang telah menyediakan akses data bagi keperluan pekerjaan ini.

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, 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, 399–433.
- Bottke, W. F., D. Vokrouhlický, B. Ghent, S. Mazrouei, S. Robbins, dan S. Marchi, 2016. *On Asteroid Impacts, Crater Scaling Laws, and a Proposed Younger Surface Age for Venus*, Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 47, 1–2.
- Brož, M., 2006. *Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System*, Doctoral Dissertation Charles University.
- Collins, G. S., H. J. Melosh, J. V. Morgan, dan M. R. Warner, 2002. *Hydrocode Simulations of Chicxulub Crater Collapse and Peak-Ring Formation*, *Icarus*, 157, 24–33.
- Dermawan, B., T. Hidayat, dan J. A. Utama, 2013. *Pengembangan Integrator Swift_RMVS4 dengan Melibatkan Efek Termal*, Prosiding Seminar HAI (Himpunan Astronomi Indonesia) – 90 Tahun Observatorium Bosscha, Lembang, Indonesia.
- Farinella, P., C. Froeschlé, C. Froeschlé, R. Gonczi, G. Hahn, A. Morbidelli, dan G. B. Valsecchi, 1994. *Asteroids Falling onto the Sun*, *Nature*, 371, 314–317.
- Farnocchia, D., S. R. Chesley, P. W. Chodas, M. Micheli, D. J. Tholen, A. Milani, G. T. Elliott, dan F. Bernardi, 2013. *Yarkovsky-Driven Impact Risk Analysis for Asteroid (99942) Apophis*, *Icarus*, 224, 192–200.
- Fowler, J. W. dan Chillemi, J. R., 1992. *IRAS Asteroid Data Processing*, dalam Tedesco, E.F. (editor), *The IRAS Minor Planet Survey*, 456 hal., Tech. Rep. PL-TR-92-2049, Phillips Laboratory, Hanscom Air Force Base, Massachusetts, USA.
- Galad, A., 2005. *On Intrinsic Collision Probability of Subkilometer Asteroids with the Earth*, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, 35, 65–75.
- Gladman, B. J., F. Migliorini, A. Morbidelli, V. Zappalà, P. Michel, A. Cellino, C. Froeschlé, H. Levison, M. Bailey, dan M. Duncan, 1997. *Dynamical Life-Times of Objects Injected into Asteroid Belt Resonances*, *Science*, 277, 197–201.
- Harris, N. W., dan D. W. Hughes, 1994. *Asteroid-Earth Collision Velocities*, *Planet. Space Sci.*, 42, 285–289.
- Holsapple, K. A., 2007. *Spin Limits of Solar System Bodies: From the Small Fast-Rotators to 2003 EL61*, *Icarus*, 187, 500–509.
- Horedt, G. P., dan G. Neukum, 1984. *Comparison of Six Crater-Scaling Laws, Earth, Moon, and Planets*, 31(3), 265–269.
- Hughes, D. W., 2000. *A New Approach to the Calculation of the Cratering Rate of the Earth Over the Last 125±20 Myr*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 317, 429–437.
- Hughes, D. W., 2002. *A Comparison between Terrestrial, Cytherean and Lunar Impact Cratering Records*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 334, 713–720.
- Hughes, D. W., 2003. *The Approximate Ratios between the Diameters of Terrestrial Impact Craters and the Causative Incident Asteroids*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 338, 999–1003.
- Hughes, D. W., dan N. W. Harris, 1994. *The Distribution of Asteroid Sizes and Its Significance*, *Planet. Space Sci.*, 42,

- 291–295.
- Kryszczyńska, A., A. La Spina, P. Paolicchi, A. W. Harris, S. Breiter, dan P. Pravec, 2007. *New Findings on Asteroid Spin-Vector Distributions*, Icarus, 192, 223–237.
- Levison, H. F., dan M. J. Duncan, 1994. *The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets*, Icarus, 108, 18–36.
- Morbidelli, A., dan B. Gladman, 1998. *Orbital and Temporal Distributions of Meteorites Originating in the Asteroid Belt*, Meteorit. Planet. Sci., 33, 999–1016.
- Morbidelli, A., R. Jedicke, W. F. Bottke, P. Michel, dan E. F. Tedesco, 2002. *From Magnitudes to Diameters: The Albedo Distribution of Near Earth Objects and the Earth Collision Hazard*, Icarus, 158, 329–342.
- Morbidelli, A., dan D. Vokrouhlický, 2003. *The Yarkovsky-Driven Origin of Near-Earth Asteroids*, Icarus, 163, 120–134.
- Sears, D. W., 1978. *The Nature and Origin of Meteorites*, Bristol, Adam Hilger.
- Usui, F., T. Kasuga, S. Hasegawa, M. Ishiguro, D. Kuroda, T. G. Müller, T. Ootsubo, dan H. Matsuhara, 2013. *Albedo Properties of Main Belt Asteroids Based on the All-Sky Survey of the Infrared Astronomical Satellite Akari*, Astrophys. J., 762:56, 1–14.
- Zappalà, Z., P. Farinella, Z. Knežević, P. Paolicchi, 1984. *Collisional Origin of the Asteroid Families - Mass and Velocity Distributions*, Icarus, 59, 261–285.