

**METODE SEDERHANA UNTUK MEMPEROLEH KARAKTERISTIK
ASTEROID KECIL YANG JATUH DI CHELYABINSK RUSIA
PADA 15 FEBRUARI 2013
(A SIMPLE METHOD TO OBTAIN THE CHARACTERISTICS OF A
SMALL ASTEROID FELL IN CHELYABINSK RUSIA IN
15 FEBRUARY 2013)**

Abdul Rachman

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djundjuna 133 Bandung 40173 Indonesia

e-mail: abdul.rachman@lapan.go.id

ABSTRACT

An air blast resulting from an entering of a small asteroid can be devastating as happened in Chelyabinsk, Russia on February 15, 2013. This research has used a simple method to further understand the characteristics of the asteroid based on information and results from initial analysis that were available on the internet. The result shows similarity with that found by a team led by Peter Brown from *University of Western Ontario* in the size of the object, impact energy, and the altitude of explosion but not in the peak overpressure and impact frequency. It seems that the air blast model used in this study underestimates the overpressure for diameter less than 20 m.

Keywords: *Chelyabinsk, Reentry space object, Asteroid, Airburst, Air blast*

ABSTRAK

Gelombang kejut yang diakibatkan oleh meledaknya asteroid kecil di udara bisa menimbulkan korban yang cukup besar seperti yang terjadi di Chelyabinsk, Rusia pada 15 Februari 2013. Penelitian ini menggunakan sebuah metode sederhana untuk mengetahui lebih jauh karakteristik asteroid tersebut berdasarkan informasi dan hasil analisis awal yang telah tersedia di internet. Hasilnya menunjukkan kesesuaian dengan yang didapatkan oleh tim yang dipimpin oleh Peter Brown dari *University of Western Ontario* dalam ukuran benda, energi tumbukan, dan ketinggian meledaknya benda di udara (*airburst*) namun tidak pada *peak overpressure* dan frekuensi terjadinya tumbukan. Nampaknya model gelombang kejut akibat *airburst* yang digunakan dalam penelitian ini *underestimate* untuk kasus asteroid berukuran di bawah 20 m.

Kata kunci: *Chelyabinsk, Benda jatuh antariksa, Asteroid, Ledakan di udara, Gelombang kejut akibat ledakan di udara*

1 PENDAHULUAN

Pada 15 Februari 2013 beberapa media luar negeri, di antaranya CNN dan SPACE.com, memberitakan ledakan di atas Chelyabinsk, Rusia sekitar pukul 09:20 waktu lokal (10:20 WIB). Ledakan

yang disertai kilatan cahaya menyilaukan dari luar angkasa ini dipastikan bukan karena benda jatuh buatan. Mengingat besarnya kecepatan dan ledakan yang ditimbulkan. Hasil analisis awal mengindikasikan bahwa peristiwa ini

adalah jatuhnya sebuah asteroid kecil berukuran sekitar 17 m yang kemudian pecah di atas Chelyabinsk (NASA, 2013). Pecahnya asteroid ini menghasilkan gelombang kejut (dinamakan *air blast* atau *blast wave*) yang memecahkan kaca dan merusak sebagian bangunan di Chelyabinsk serta mencederai lebih dari 1000 orang (Space.com, 2013).

Peristiwa di Chelyabinsk adalah satu dari tiga kejadian ledakan di udara (*air burst*) akibat jatuhnya asteroid/komet dalam dua abad terakhir ini yang menarik perhatian umum. Ledakan pertama terjadi di Tunguska, Siberia pada 1908 (Kundt, 2003) dengan energi ledakan diperkirakan sekitar 10 Mton TNT. Ledakan kedua terjadi di atas Teluk Bone pada 8 Oktober 2009 yang diperkirakan akibat jatuhnya asteroid kecil berukuran sekitar 9 m dengan frekuensi waktu jatuh sekitar sembilan tahun sekali (Rachman, 2010).

Dibanding kasus Tunguska dan Teluk Bone, kasus Chelyabinsk jauh lebih berlimpah informasinya. Banyak orang Rusia yang merekam peristiwa di Chelyabinsk melalui kamera *dashboard* di mobilnya sehingga hasilnya bisa disaksikan di *YouTube*. Salah satu citra penampakan meteoarnya terlihat pada Gambar 0-1. Adapun peristiwa di Tunguska tidak ditemukan rekaman kejadiannya (yang ada hanya foto setelah kejadian) sedangkan peristiwa di Teluk Bone hampir tidak ada rekaman kejadiannya kecuali yang diperoleh dari detektor nuklir milik *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization* (CTBTO). Untuk kasus Chelyabinsk, meteoritnya diklaim telah ditemukan kurang dari sebulan setelah kejadian (Duluth News Tribune, 2013).

Tulisan ini menjelaskan metode sederhana yang bisa digunakan untuk mengetahui lebih jauh karakteristik asteroid yang jatuh di Chelyabinsk berdasarkan informasi dan hasil analisis

awal yang telah tersedia di internet. Hasil metode ini akan dibandingkan dengan hasil analisis yang lebih lengkap dan mendalam berdasarkan referensi yang diperoleh.

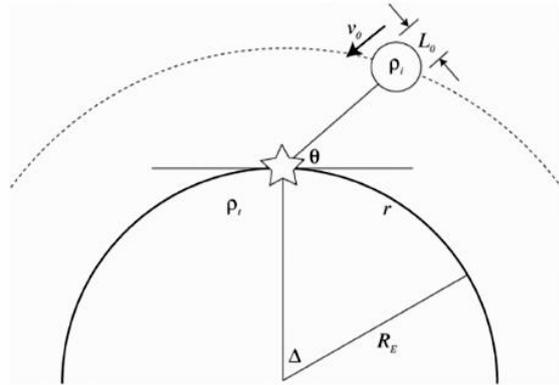


Gambar 0-1: Penampakan meteor sebelum meledak di atas kota Chelyabinsk, Rusia pada 15 Februari 2013 (sumber: www.perthnow.com.au)

2 DATA DAN METODE

Penelitian ini menggunakan data perkiraan energi tumbukan sebelum benda memasuki atmosfer, sudut jatuh berdasarkan informasi dari saksi yang melihat peristiwa tersebut, hasil pengukuran kerapatan serpihan benda yang berhasil ditemukan, dan mengasumsikan besarnya laju benda sebelum memasuki atmosfer. Untuk simulasi potensi kerusakan, dibutuhkan juga jarak pengamat dari tempat tumbukan (*impact site*) yang pada penelitian ini dipilih sejauh 1 km.

Definisi sudut jatuh dan jarak pengamat ini bisa dilihat di Gambar 0-1. Pada gambar tersebut, L_0 adalah diameter benda sebelum memasuki atmosfer, v_0 adalah laju jatuh benda sebelum memasuki atmosfer, ρ_i adalah kerapatan benda, ρ_t adalah kerapatan benda target, θ adalah sudut jatuh benda, r adalah jarak pengamat dari tempat tumbukan yang diukur sepanjang permukaan bumi, R_E adalah radius bumi, dan Δ adalah sudut (yang berpusat di pusat bumi) antara tempat tumbukan dengan jarak pengamat.



Gambar 0-1: Diagram parameter yang digunakan pada penelitian ini (Collins *et al.*, 2005)

Untuk perkiraan energi tumbukan (*impact energy*), digunakan nilai 500 kton TNT berdasarkan hasil analisis NASA (2013) yang memanfaatkan *International Monitoring System (IMS)* milik CTBTO (CTBTO, 2013). Untuk sudut jatuh benda, digunakan nilai 20 derajat mengacu pada *Universe Today* (2013). Laju benda sebelum memasuki atmosfer diasumsikan 19 km/s berdasarkan informasi bahwa laju saat kecerlangannya maksimum (telah memasuki atmosfer) adalah 18,6 km/s (NASA, 2013). Untuk kerapatan benda, digunakan nilai 3300 kg/m³ yang merupakan rata-rata *bulk density* untuk meteorit tipe *ordinary chondrites* (Britt dan Consolmagno, 2003). Tipe *ordinary chondrites* dipilih berdasarkan hasil Viktor Grokhovsky (Ural Federal University) pada kasus Chelyabinsk (Sky & Telescope, 2013).

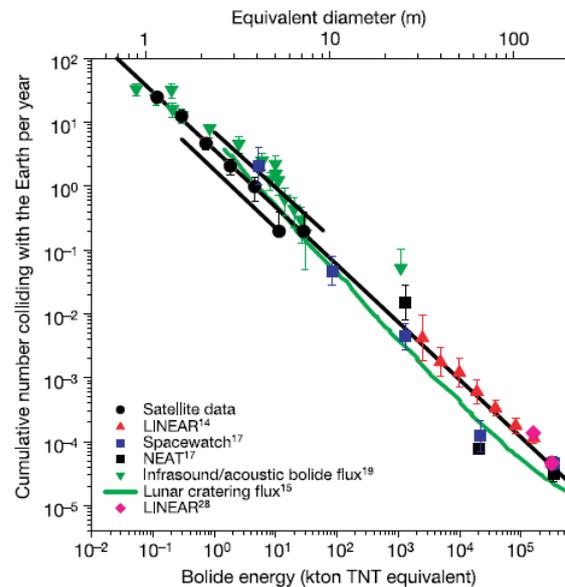
Selanjutnya, data energi tumbukan digunakan untuk memperkirakan diameter D dan frekuensi jatuhnya benda ke Bumi ($1/N$). Untuk itu digunakan persamaan berikut (Brown *et al.*, 2002):

$$\log N = a_0 - b_0 \log E \tag{2-1}$$

$$\log N = c_0 - d_0 \log D \tag{2-2}$$

dengan N adalah jumlah kumulatif benda yang bertumbukan dengan Bumi setiap tahun dengan energi E (dalam kton TNT) atau lebih besar, konstanta

$a_0 = 0,5677 \pm 0,015$, $b_0 = 0,90 \pm 0,03$,
 $c_0 = 1,568 \pm 0,03$, $d_0 = 2,70 \pm 0,08$. Kedua persamaan ini diperoleh dari *fitting* terhadap data yang ditunjukkan pada Gambar 0-2. Pada gambar tersebut, garis lurus berwarna hitam yang memanjang dari kiri atas ke kanan bawah adalah *best-fit line* terhadap data dari pengamatan sensor optik (ditandai dengan bulatan hitam) yang ditempatkan di satelit geostasioner sejak 1994 hingga 2002.



Gambar 0-2: Fluks kumulatif benda alami berukuran kurang dari 200 m yang menabrak Bumi hasil dari berbagai pengukuran (Brown *et al.*, 2002)

Diameter yang telah diperoleh beserta jarak pengamat dari tempat tumbukan, kerapatan benda, laju tumbukan, dan sudut jatuh kemudian digunakan sebagai masukan pada *Earth Impact Effects Program* (untuk selanjutnya disingkat EIEP) yang dibuat berdasarkan model yang dijelaskan oleh Collins *et al.* (2005) dan bisa diakses di <http://impact.ese.ic.ac.uk/>. Program ini digunakan untuk memperkirakan seberapa besar konsekuensi interaksi meteoroid dengan Bumi termasuk menghitung energi tumbukan (sebelum benda memasuki atmosfer). Iterasi dilakukan memakai program tersebut dengan

memvariasikan nilai diameter hingga didapatkan energi tumbukan yang mendekati 500 kton.

3 HASIL

Persamaan 2-1 dan 2-2 memberikan ukuran benda sebesar 18,6 m dan frekuensi 71,6 tahun dengan mengambil nilai tengah untuk konstanta-konstantanya. Setelah iterasi dengan EIEP, diperoleh masukan yang menghasilkan nilai energi sebelum terjadinya tumbukan (*atmospheric entry*) sebesar 503 kton TNT (mendekati nilai yang diharapkan yaitu 500 kton TNT) adalah: diameter benda 18,9 m (lebih besar 0,3 m daripada diameter awal sebelum iterasi), kerapatan 3300 kg/m³, laju tumbukan 19 km/s, dan sudut jatuh 20°. Masukan lain yang diperlukan namun tidak berperan pada penelitian ini adalah *target density* sebesar 2500 kg/m³, dan *target type* adalah *sedimentary rock*.

Hasil lain yang diperoleh dari EIEP adalah frekuensi kejadian (*average interval between impacts on Earth*) 64,8 tahun, tumbukan tidak mempengaruhi Bumi secara kuat sehingga mengurangi massanya, serta tumbukan tidak mengubah kemiringan orbit bumi dan menggeser orbitnya. Selain itu, diperoleh juga informasi bahwa asteroid mulai retak pada ketinggian 52,7 km dari permukaan bumi, asteroid meledak menjadi awan serpihan pada ketinggian 30,3 km, laju sisa (*residual velocity*) serpihan setelah ledakan 14,6 km/s, energi ledakan 210 kton TNT, dan tidak ada kawah yang terbentuk kendati serpihan-serpihan yang berukuran besar bisa mencapai permukaan bumi. Terkait dengan gelombang kejut yang terjadi di udara akibat tumbukan, gelombang itu akan tiba di pengamat 1,53 menit setelah tumbukan terjadi, tekanan akibat *air blast* melebihi tekanan atmosfer (dinamakan *overpressure*) dengan nilai maksimum (*peak overpressure*) sebesar 70,8 Pa, laju angin maksimum 0,167

m/s, dan intensitas suara 37 dB (mudah didengar).

4 PEMBAHASAN

Sebuah tim yang terdiri dari 33 orang peneliti yang dipimpin oleh Prof. Peter Brown dari *University of Western Ontario* Kanada telah melakukan analisis yang lebih lengkap dan lebih mendalam untuk kasus Chelyabinsk dan mempublikasikan hasilnya pada November 2013 (Brown *et al.*, 2013). Mereka menemukan bahwa ukuran asteroid yang jatuh di Chelyabinsk adalah sekitar 19 m (17 hingga 20 m), energi tumbukan 500±100 kton TNT. Selain memakai data dari pengamatan *infrasound station*, Brown *et al.*, juga memakai data dari stasiun-stasiun gempa dan melakukan analisis kurva cahaya ledakan berdasarkan rekaman video yang banyak tersedia. Kedua nilai ini (diameter dan energi tumbukan) serupa yang penulis dapatkan dalam penelitian ini yakni 18,9 m dan 503 kton TNT. Dengan diameter 19 m dan kerapatan 3300 kg/m³ maka diperkirakan massa benda sekitar 12 kton.

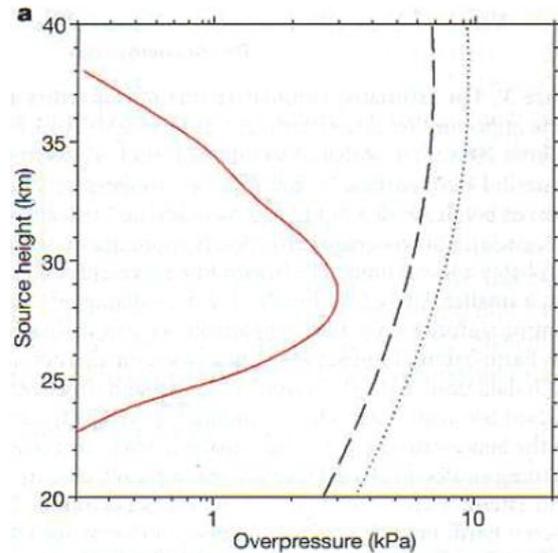
Brown *et al.* (2013) juga menemukan bahwa ledakan yang akhirnya menghantam kota Chelyabinsk terjadi pada ketinggian 24–30 km. Mereka menyimpulkan bahwa gelombang kejut yang pertama kali menimpa Chelyabinsk berasal dari lokasi dan ketinggian yang berbeda-beda yang mendukung teori bahwa ledakan yang terjadi berupa *cylindrical shock* dari sebuah *extended airburst* (bukan sebuah *point-like explosion*). Ketinggian yang didapatkan Brown *et al.*, ini cukup sesuai dengan yang penulis peroleh dalam penelitian ini yakni 30,3 km.

Terkait dengan kerusakan yang ditimbulkan, Brown *et al.*, menemukan bahwa *peak overpressure* yang terjadi di Chelyabinsk adalah sebesar 3,2±0,6 kPa berdasarkan pengukuran kerusakan pada jendela. Nilai ini jauh lebih besar daripada nilai yang diperoleh dari

penelitian ini yakni 70,8 Pa berdasarkan perhitungan dengan EIEP. Nilai tersebut belum mampu menggetarkan kaca jendela (Collins *et al.*, 2005) yang tentu saja berbeda dengan yang sebenarnya terjadi di Chelyabinsk.

Penulis menduga rendahnya nilai *peak overpressure* yang diperoleh dalam penelitian ini terkait dengan kelemahan model gelombang kejut yang digunakan dalam EIEP. Untuk memperkirakan *peak overpressure* hasil ledakan di udara (*airburst*), Collins *et al.*, menggunakan kumpulan persamaan yang sama dengan yang digunakan pada *fitting* data *peak overpressure* untuk berbagai jarak memakai data ledakan-ledakan nuklir yang terjadi di berbagai ketinggian dari permukaan bumi (Glasstone dan Dolan, 1977). Namun, Brown *et al.* (2013) menampilkan hasil yang berbeda. Kendati sama-sama berdasarkan teori ledakan nuklir, model yang mereka gunakan pada gambar tersebut memberikan nilai *overpressure* yang lebih besar dari 3,2 kPa seperti pada Gambar 0-1. Gambar tersebut berdasarkan pada teori ledakan nuklir standar yang mengasumsikan sumber ledakan berupa *spherical point* dengan besar energi 500 kton (pada gambar dinyatakan dengan *dashed line*) dan 1 megaton (pada gambar dinyatakan dengan *dotted line*).

Walaupun model yang digunakan dalam EIEP untuk memperkirakan kerusakan akibat ledakan di udara nampaknya *underestimate* terhadap kasus Chelyabinsk, model ini cukup baik menangani kasus Tunguska di Siberia 1908. Dengan parameter masukan jarak pengamat 1 km, diameter benda 60 m, kerapatan 2700 kg/m³, laju tumbukan 20 km/s, dan sudut jatuh 45°, EIEP memberikan *peak overpressure* sebesar 193 kPa. Tekanan sebesar ini telah mampu meruntuhkan jembatan dan dianggap cukup untuk menimbulkan kerusakan sekelas kasus Tunguska.



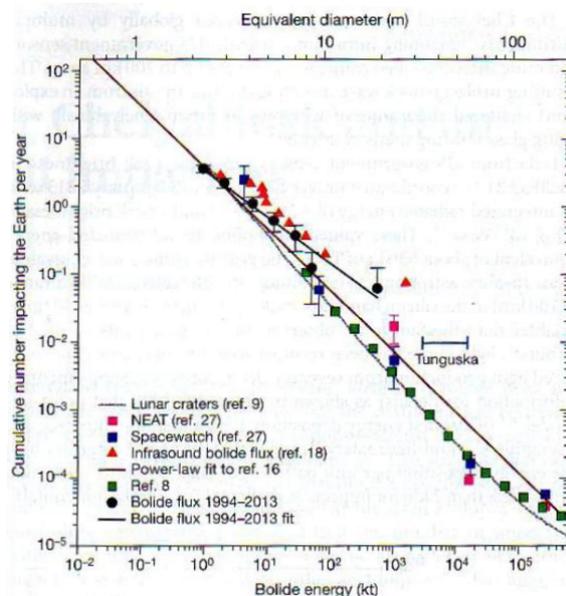
Gambar 0-1: *Overpressure* akibat gelombang kejut berdasarkan teori *cylindrical-line source blast* (garis merah) yang dianggap cocok dengan kejadian di Chelyabinsk (Brown dkk., 2013) dan berdasarkan teori ledakan nuklir standar (garis hitam)

Nampaknya, untuk perkiraan kerusakan terkait ledakan di udara, EIEP kurang cocok digunakan untuk asteroid berukuran kecil misalnya di bawah 20 m. Selain untuk kasus Chelyabinsk, Rachman (2010) menemukan bahwa EIEP juga *underestimate* ketika menghitung *overpressure* yang terjadi pada kasus ledakan di atas Teluk Bone (8 Oktober 2009) yang ukurannya diperkirakan 9 m. Ketika itu program ini bahkan memberikan nilai yang lebih rendah lagi daripada yang diberikannya saat ini kendati berdasarkan model yang sama yakni model yang diterangkan di Collins *et al.* (2005).

Menganalogikan ledakan di udara akibat asteroid jatuh dengan ledakan nuklir di udara memang kurang tepat karena energi yang dihasilkan oleh asteroid jatuh lebih terarah dan bukan isotropik (seperti halnya ledakan nuklir) sehingga memungkinkan timbulnya kerusakan yang lebih hebat pada area di bawahnya (Boslough, 2013). Pemahaman bahwa faktor utama yang menentukan

potensi kerusakan akibat *air blast* (baik karena asteroid jatuh maupun ledakan nuklir) adalah energi yang dilepaskan dan ketinggian saat terjadi ledakan (Toon *et al.*, 1994, Collins *et al.*, 2005) nampaknya memang perlu disempurnakan.

Brown *et al.* (2013) juga menemukan indikasi bahwa *fluks* asteroid berdiameter 15–30 m yang menumbuk Bumi dalam kurun waktu 1994–2013 lebih besar daripada yang dipahami sebelumnya (Brown *et al.*, 2002). Dengan menggunakan hasil mereka (Gambar 0-2), asteroid yang jatuh di Chelyabinsk (dan yang lebih besar dari itu) memiliki frekuensi jatuh sekitar 17 tahun sekali. Pada gambar tersebut, *fitting* untuk *fluks bolide* sejak 1994–2013 ditunjukkan oleh garis lurus pendek berwarna hitam sedang *fitting* untuk *fluks bolide* hasil penelitian sebelumnya (Brown *et al.*, 2002, yang digunakan pada penelitian ini) ditunjukkan oleh garis lurus panjang berwarna coklat. Kasus Chelyabinsk (*equivalent diameter* sekitar 20 m) ditunjukkan oleh bulatan hitam paling kanan.



Gambar 0-2: Perkiraan *fluks* kumulatif asteroid yang menabrak Bumi (Brown *et al.*, 2013)

Frekuensi yang diperoleh Brown *et al.*, (2013) jauh lebih besar daripada

yang penulis peroleh dalam penelitian ini yakni sekitar 70 tahun sekali. Penyebab utama perbedaan ini diduga terletak pada digunakannya data ledakan akibat asteroid (*bolide*) yang lebih lengkap pada Brown *et al.*, yang memungkinkan mereka memperoleh hasil yang jauh lebih akurat. Mereka memakai data pengamatan *bolide* selama 20 tahun terakhir. Data ini hampir dua kali lebih banyak dibanding Brown *et al.*, (2002) yang hasilnya digunakan pada penelitian ini. Masih sangat sedikitnya jumlah asteroid dekat Bumi yang berukuran 10–20 m yang sudah ditemukan hingga saat ini memungkinkan lebih besarnya persentase asteroid seukuran tersebut dalam populasi asteroid dekat Bumi dibanding yang selama ini dipercaya.

5 KESIMPULAN

Ledakan di udara akibat jatuhnya asteroid di atas kota Chelyabinsk pada 15 Februari 2013 telah membuktikan bahwa sebuah asteroid kecil mampu mengakibatkan kerugian yang cukup besar. Penelitian ini menunjukkan bahwa informasi awal tentang karakteristik asteroid Chelyabinsk dan ledakannya seperti ukuran dan ketinggian terjadinya ledakan di udara (*airburst*) dapat diperkirakan memakai sebuah metode sederhana yang pada dasarnya mengandalkan hanya pada empat masukan yaitu energi tumbukan, kerapatan benda penumbuk, laju tumbukan, dan sudut jatuh. Keempat masukan ini adalah perkiraan awal yang biasanya bisa segera diperoleh tidak lama setelah kejadian dengan asumsi ada serpihan benda yang segera ditemukan.

Metode sederhana yang digunakan dalam penelitian ini memberikan informasi diameter sekitar 19 m, energi tumbukan 503 kton TNT, ketinggian ledakan sekitar 30 km dari permukaan bumi, *peak overpressure* 70,8 Pa, dan frekuensi tumbukan 70 tahun. Jika digunakan kerapatan benda

sebesar 3300 kg/m³, diperoleh berat benda sekitar 12 ribu ton. Dibandingkan dengan hasil analisis yang lebih lengkap dan mendalam oleh Brown *et al.*, (2013), diameter benda, energi tumbukan, dan ketinggian ledakan hampir sama nilainya namun *peak overpressure* dan frekuensi tumbukan jauh lebih rendah. Rendahnya *peak overpressure* diduga dikarenakan model *air blast* (gelombang kejut akibat ledakan di udara) yang digunakan dalam penelitian ini *underestimate* untuk kasus asteroid berukuran di bawah 20 m. Adapun frekuensi tumbukan yang jauh lebih rendah diperkirakan terkait dengan kurangnya data yang digunakan dan adanya indikasi bahwa *fluks* asteroid berdiameter 15–30 m yang menumbuk Bumi dalam kurun waktu 1994–2013 lebih besar daripada yang diyakini sebelumnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Disampaikan ucapan terima kasih kepada Kapus Sains Antariksa-LAPAN, Ibu Ely dari Observatorium Boscha ITB dan dewan penyunting atas koreksi dan masukannya.

DAFTAR RUJUKAN

- Boslough M., 2013. *Airburst warning and response*, Acta Astronautica, <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.09.007>.
- Britt D. T. and Consolmagno G. J., 2003. *Stony Meteorite Porosities and Densities: A Review of the Data Through 2001*, Meteoritics & Planetary Science 38, 8, 1161–1180.
- Brown P., R. E. Salding, D. O. ReVelle, E. Tagliaferri, and S. P. Worden, 2002. *The Flux of Small Near-Earth Objects Colliding with the Earth*, Nature 420, 294–296.
- Brown P. G., J. D. Assink, L. Astiz, R., Blaauw, M. B. Boslough, J. Borovička, N. Brachet, D. Brown, M. Campbell-Brown, L. Ceranna, W. Cooke, C. de Groot-Hedlin, D. P. Drob, W. Edwards, L. G. Evers, M. Garces, J. Gill, M. Hedlin, A. Kingery, G. Laske, A. Le Pichon, P. Mialle, D. E. Moser, A. Saffer, E. Silber, P. Smets, R. E. Spalding, P. Spurný, E. Tagliaferri, D. Uren, R. J. Weryk, R. Whitaker and Z. Krzeminski, 2013. *A 500-kton Airburst Over Chelyabinsk and an Enhanced Hazard from Small Impactors*, Nature 503, 238–241.
- Collins G. S., H. Jay Melosh, and Robert A. Marcus, 2005. *Earth Impact Effects Program: A Web-based Computer Program for Calculating the Regional Environmental Consequences of a Meteoroid Impact on Earth*, Meteoritics & Planetary Science 40, 6, 817–840.
- CTBTO, 2013. *Russian Fireball Largest Ever Detected by CTBTO's infrasound sensors*, www.ctbto.org/press-centre/press-releases/2013/russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors/, diakses pada 28 Februari 2013.
- Duluth News Tribune, 2013. *Russian Scientists Recover Meteor Fragments*, <http://www.duluthnewtribune.com/event/article/id/259313/>, diakses pada 22 Februari 2013.
- Glasstone S. and P. J. Dolan, 1977. *The Effects of Nuclear Weapons*, www.fourmilab.ch/etexts/www/effects/, diakses pada Maret 2013.
- Kundt W., 2003. *Tunguska 1908*, Chin. J. Astron. Astrophys. Vol. 3, Suppl., 545–554.
- NASA, 2013. *Russia Meteor not Linked to Asteroid Flyby*, www.nasa.gov/mission_pages/asteroids/news/asteroid20130215.html, diakses pada 20 Februari 2013.

- Rachman, A., 2010. *Identifikasi Benda Jatuh Antariksa di Teluk Bone, Matahari dan Lingkungan Antariksa*, Seri ke-4, 58-66.
- Sky & Telescope, 2013. *Update on Russia's Mega-meteor*, www.skyandtelescope.com/news/Update-on-the-Russian-Mega-Meteor-195553631.html, diakses pada Maret 2013.
- Space.com, 2013. *Meteor Blast Over Russia Feb. 15: Complete coverage*, www.space.com/19823-russia-meteor-explosion-complete-coverage.html, diakses pada 20 Februari 2013.
- Toon, O. B., K. Zahnle, R. P. Turco, dan C. Covey, 1995. *Environmental Perturbation Caused by Asteroid Impacts, Hazards Due to Comets & Asteroids*, The University of Arizona Press.
- Universe Today, 2013. *Airburst Explained: NASA Addresses the Russian Meteor Explosion*, www.universetoday.com/100025/, diakses pada Maret 2013.