

TUMBUKAN METEOR GIANYAR, BALI, INDONESIA 1 JANUARI 2008 00:30 WITA



M. Ma'rufin Sudibyo
Rukyatul Hilal Indonesia

A. DATA KASAR

Pada 1 Januari 2008 pukul 00:30 WITA Ida Ayu Made Puspa, Wayan Rajin, Nyoman Warta dan penduduk lainnya di Banjar Gelumpang, Sukawati, Kabupaten Gianyar (Bali), mendengar dentuman keras yang menyertai kilatan sinar turun dari langit, yang selanjutnya menghilang di tengah persawahan. Keesokan harinya di tengah sawah milik Nyoman Miasa ditemukan kubangan sedalam 30 cm dengan diameter 110 cm yang terisi air dan tepiannya dibatasi "tanggul" alami (Suara Merdeka, 03/01/2008). Penyelidikan aparat kepolisian sektor Sukawati menemukan 3 serpihan mirip batu apung di sekitar kubangan (Liputan 6, 02/01/2008). Analisis Pusat Laboratorium Forensik (Puslabfor) Polri Cabang Denpasar menunjukkan serpihan tersebut didominasi senyawa silikat. Dengan kondisi fisik di sekitar kubangan yang tidak menunjukkan adanya kerusakan atau bekas lemparan akibat benda keras yang ditunjukkan oleh tidak rusaknya tanaman padi di sekitar kubangan, maka Puslabfor menyimpulkan tidak ada faktor pendukung kubangan tersebut berkaitan dengan suara ledakan sebagaimana yang diinformasikan oleh masyarakat setempat (Kompas, 29/01/2008).

B. ANALISIS SINGKAT

B.1. Karakteristik Kawah dan Tipe Meteorit

Hanya meteoroid–meteoroid yang berasal dari pecahan asteroid dekat Bumi (*near Earth*) dan berkecepatan awal (v_{inf}) rendah saja yang sanggup mencapai permukaan Bumi. Salah satu ciri khas dalam kejadian tumbukan benda langit adalah munculnya cekungan/kawah di permukaan Bumi, yang diameternya bergantung pada diameter meteor penumbuk.



Gambar 1

3 serpihan yang diduga adalah fragmen meteorit Gianyar
(Sumber : Liputan 6, 2008)

Ketika meteorit menghantam Bumi, terbentuklah kawah transisi (*transient crater*) yang kemudian dibawah pengaruh gravitasi Bumi berubah menjadi kawah sederhana (*simple crater*) bila diameter kawah transisi ($D_{transisi}$) < 3,2 km. Untuk *simple crater*, hubungan antara diameter kawah transisi dengan diameter final (D_{final}) dipenuhi oleh (Collins dkk, 2005) :

$$D_{final} = 1,25D_{transisi} \quad (1)$$

Kedalaman kawah transisi dinyatakan dalam :

$$h_{transisi} = \frac{D_{transisi}}{2\sqrt{2}} \quad (2)$$

Salah satu ciri khas kawah tumbukan adalah adanya endapan breksi di dasar kawah yang berbentuk lensa (*lens*) dan tanggul/punggungan melingkar yang membatasi kawah dengan lingkungan sekitarnya (disebut cincin). Ketebalan lensa breksi dinyatakan dalam :

$$t_{breksi} = 2,8V_{breksi} \left(\frac{h_{transisi} + t_{cincin}}{h_{transisi} D_{final}^2} \right) \quad (3)$$

Dengan :

$$V_{breksi} = 0,032D_{final}^3$$

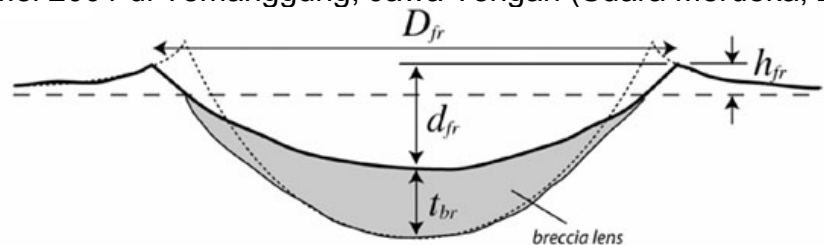
$$t_{cincin} = 0,07 \frac{D_{transisi}^4}{D_{final}^3}$$

Dan kedalaman *simple crater* (h_{final}) dinyatakan sebagai :

$$h_{final} = h_{transisi} + t_{cincin} - t_{breksi} \quad (4)$$

Jika diterapkan pada kawah Gianyar, dengan $D_{final} = 1,1$ m diperoleh $D_{transisi} = 0,88$ m; $h_{transisi} = 0,311$ m dan $t_{cincin} = 0,032$ m. Mengingat ukuran kawah sangat kecil, pembentukan breksi memiliki kemungkinan sangat kecil dan bisa diabaikan mengingat syarat utamanya yakni terjadinya pelelehan (pada meteorit dan batuan target) akibat tumbukan tidak terjadi¹. Dengan demikian $V_{breksi} = 0$ m³ dan $t_{breksi} = 0$ m. Sehingga kedalaman kawah Gianyar (h_{final}) adalah 0,343 m (34,3 cm).

Kedalaman ini tersebut tidak berbeda jauh dengan kedalaman kawah yang dilaporkan (yakni 30 cm) sehingga kawah Gianyar kemungkinan besar memang dibentuk oleh tumbukan meteor, seperti halnya kawah Luhy (gambar 3). Ini didukung oleh penemuan 3 serpihan mirip batu apung (*pumice*) di sekitar kawah, yang menurut *American Meteor Society* (AMS, 2001) adalah ciri khas dari meteorit batu (aerolit) dengan tipe kondritik ataupun akondrit. Kandungan silikat yang dominan menunjukkan serpihan tersebut kemungkinan adalah meteorit akondrit, sebagaimana meteorit Wonotirto yang jatuh pada 11 Mei 2001 di Temanggung, Jawa Tengah (Suara Merdeka, 20/02/2002).

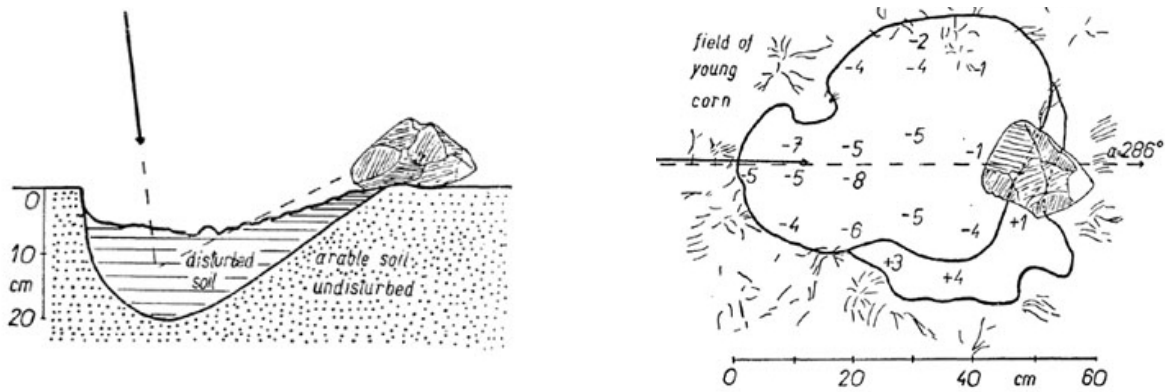


Gambar 2

Penampang melintang kawah sederhana (*simple crater*) dengan endapan breksi di dasarnya. $D_{fr} = D_{final}$ (diameter kawah), $h_{fr} = t_{cincin}$ (ketinggian tanggul/cincin kawah), $t_{br} = t_{breksi}$ (ketebalan lensa breksi di dasar kawah), $d_{fr} = h_{final}$ (kedalaman kawah).

(Sumber : Collins dkk, 2005)

¹ Seperti disinggung pada bagian B.2, volume produksi lelehan dalam kejadian tumbukan Gianyar adalah sangat kecil sehingga bisa diabaikan.



Gambar 3

Sketsa kawah “Luhy” yang terbentuk saat jatuhnya meteorit pasca munculnya *fireball* sangat cemerlang di Pribram (Cekoslovakia), 7 April 1959. Kawah dilihat dari samping (kiri) dan dari atas (kanan). Meteorit jatuh dari azimuth 286° dan dari ketinggian nyaris tegak lurus ($\alpha \approx 90^\circ$) di ladang jagung, membentuk kawah berkedalaman 20 cm dengan diameter 60 cm. Meteorit terpental kembali dan selanjutnya ‘mendarat’ di tepi kawah. Pada waktu yang bersamaan kawah mengalami penimbunan kembali oleh material produk tumbukan, sehingga kedalamannya (h_{final}) berubah menjadi maksimum 8 cm saja. Sebagian materi produk tumbukan membentuk timbunan setinggi 4 cm di sisi selatan kawah.
(Sumber : Ceplecha, 1961)

B.2. Dinamika Meteoroid dan *Ejecta*

Eugene Shoemaker telah mengembangkan *rule-of-thumb* rasio diameter kawah terhadap diameter meteorit penumbuk, yakni 12 : 1 untuk target batuan lunak (tanah berlumpur, pasir, tanah jenuh air). Menggunakan *rule-of-thumb* ini, pada kawah Gianyar dengan diameter kawah 110 cm, maka diameter meteorit penumbuk adalah $\frac{110}{12} = 9,167$ cm \approx 10 cm. Dengan $\rho_{\text{meteor}} = 4.000 \text{ kg/m}^3$ untuk meteorit akondrit, maka jika dianggap meteorit berbentuk sferis, massanya ketika menumbuk Bumi adalah 2,094 kg. Meteorit akondrit tersusun oleh komposisi basalt-silikat dan berasal dari lapisan terluar (kerak) asteroid besar yang telah mengalami diferensiasi kimiawi sebagaimana halnya planet-planet.

Meteor jatuh menumbuk lahan persawahan Banjar Gelumpang, Sukawati. Jika dianggap lahan persawahan ini tersusun oleh alluvial ($\rho_{\text{target}} = 2.000 \text{ kg/m}^3$) maka kecepatan tumbuk meteorit dideduksi dengan formula berikut (Schmidt & Housen, 1987 dalam Collins dkk, 2005) :

$$D_{\text{transisi}} = 1,161 \left(\frac{\rho_{\text{meteor}}}{\rho_{\text{target}}} \right)^{\frac{1}{3}} d^{0,78} g_E^{-0,22} v_{\text{tumbuk}}^{0,44} \sin^{\frac{1}{3}} \alpha \quad (4)$$

dimana ρ_{meteor} = densitas meteorit (kg/m^3), ρ_{target} = densitas target (kg/m^3), d = diameter meteorit penumbuk (m), g_E = percepatan gravitasi Bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$), v_{tumbuk} = kecepatan meteorit menumbuk target (m/detik) dan α = tinggi awal meteor ($^\circ$).

Eugene Shoemaker (Shoemaker, 1962 dalam Collins dkk, 2005) menyatakan umumnya meteor jatuh ke Bumi dengan $\alpha = 45^\circ$. Nilai α ini diestimasi muncul kejadian tumbukan Gianyar, mengingat bentuk kawah Gianyar juga terelongasi (eliptik) dan dijumpai endapan mirip *ejecta*, yang mirip dengan situasi kawah 11 m di kompleks kawah Wabar, Saudi Arabia (gambar 4) yang dibentuk oleh meteoroid dengan $\alpha = 22-45^\circ$ (Shoemaker & Wynn, 1998). Maka dengan $D_{\text{transisi}} = 0,88 \text{ m}$, $\rho_{\text{meteor}} = 4.000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{target}} = 2.000 \text{ kg/m}^3$ dan $d = 0,1 \text{ m}$ didapatkan $v_{\text{tumbuk}} = 76 \text{ m/detik}$. Sebagai perbandingan, saat jatuhnya meteorit kondritik di Peekskill (New York) pada 9 Oktober 1992, $v_{\text{tumbuk}} = 80 \text{ m/detik}$ (Ceplecha dkk, 1995).



Gambar 4

Perbandingan antara kawah Gianyar (kiri) dengan kawah 11 meter, salah satu kawah di kompleks kawah meteor Wabar, Saudi Arabia (kanan). Keduanya sama-sama berbentuk ellips. Kawah meteor Wabar dibentuk oleh tumbukan meteoroid yang jatuh dengan $\alpha = 22^\circ - 45^\circ$. Perhatikan tanda panah merah pada kedua gambar, yang menunjukkan arah sebaran produk tumbukan (*ejecta*) terhadap kawah. (sumber gambar : Suara Merdeka, 2008 dan Shoemaker & Wynn, 1998)

Hubungan antara kecepatan tumbukan (v_{tumbuk}) dengan diameter awal meteoroid (d_{awal}) dinyatakan dalam (Collins dkk, 2005) :

$$v_{tumbuk} = v_{inf} \exp\left(-\frac{3\rho_{udara} C_D H}{4\rho_{meteor} d_{awal} \sin\alpha}\right) \quad (5)$$

Dengan ρ_{udara} = massa jenis udara di permukaan Bumi (1 kg/m^3), C_D = koefisien gesekan udara (2), H = *atmospheric scale height* (8.000 m) dan v_{inf} = kecepatan awal meteoroid tepat saat akan memasuki atmosfer Bumi (m/detik). v_{inf} meteoroid Gianyar sebenarnya tidak diketahui. Namun merujuk kejadian *fireball/bolide* Pribram 7 April 1959, Moravka 6 Mei 2000 dan Neuchswantein 6 April 2002 yang menyisakan meteorit (kondritik), v_{inf} meteoroid Gianyar diestimasikan sebesar 20 km/detik (Spurny dkk, 2002; Borovicka dkk, 2001). Maka lewat persamaan (5) didapatkan $d_{awal} = 77 \text{ cm}$.

Untuk menguji apakah meteoroid ini mengalami fragmentasi selama perjalanan menembus atmosfer, Collins memperkenalkan parameter I_f yang dinyatakan sebagai berikut :

$$I_f = 4,07 \frac{C_D H Y_i}{\rho_{meteor} d_{awal} v_{tumbuk}^2 \sin\alpha} \quad (6)$$

dimana :

$$\log Y_i = 2,107 + 0,0624 \sqrt{\rho_{meteor}} \quad (7)$$

dengan Y_i = kekuatan meteoroid (Pa). Penyelesaian persamaan (6) dan (7) secara bersamaan menghasilkan $I_f = 5.164,16$. Dengan demikian meteoroid ini tidak mengalami fragmentasi selama perjalanan menembus atmosfer (atau $z^* = 0$), sebab nilai $I_f > 1$ dan ini dibuktikan dengan tiadanya penemuan fragmen meteorit lain di sekitar kawah Gianyar. Hal ini berbeda dengan kejadian tumbukan Wonotirto dimana meteor terfragmentasi menjadi sedikitnya 3 buah bagian dan memproduksi 3 buah meteorit. Sebagai konsekuensinya meteoroid Gianyar juga tidak meledak di atmosfer (atau $z_b = 0$).

Collins juga menyebut atmosfer Bumi membatasi hanya meteoroid–meteoroid yang diameternya melebihi diameter kritis (d_{kritis}) saja yang sanggup melewati proses ablasi selama menembus atmosfer hingga bisa mencapai permukaan. Jika meteoroid dianggap berbentuk sferis, diameter kritis dinyatakan dengan :

$$d_{kritis} = 0,15 \frac{P_o}{\rho_{meteor} g \sin\alpha} = \frac{1,529 \cdot 10^3}{\rho_{meteor} \sin\alpha} \quad (8)$$

Pada tumbukan Gianyar didapatkan $d_{kritis} = 54 \text{ cm}$. Sehingga $d_{awal} > d_{kritis}$ dan meteoroid memang bisa sampai di permukaan Bumi.

Syarat lain yang harus dipenuhi agar sebuah meteoroid bisa memproduksi meteorit setelah melintasi atmosfer Bumi adalah *fireball/bolide* yang dihasilkannya harus lebih terang dari magnitudo -8 (AMS, 2001). Jeniskens dkk (Jeniskens dkk, 1968 dalam Withers, 2001) telah mengembangkan formula untuk memprediksi magnitudo visual *fireball* (m_{vis}), sebagai berikut :

$$\log M = 6,06 - 0,62m_{vis} - 3,89 \log v_{inf} - 0,67 \log(\sin \alpha) \quad (9)$$

dengan M = massa meteoroid (gram) dan v_{inf} = kecepatan awal meteoroid (km/detik). Dengan asumsi meteoroid berbentuk sferis, massa awalnya adalah $9,562 \cdot 10^5$ gram, sehingga didapatkan $m_{vis} = -7,9 \approx -8$. Dengan demikian meteoroid Gianyar memang bisa memproduksi meteorit. Suara ledakan yang menyertai kilatan cahaya yang disaksikan penduduk Banjar Gelumpang memang menjadi salah satu ciri khas *bolide*, yang menghasilkan *sonic boom* ketika menembus lapisan atmosfer yang padat.

American Meteor Society juga menyebutkan sebuah *fireball/bolide* yang memproduksi meteorit tidak akan terus bercahaya sepanjang lintasan perjalanannya, karena pada titik terminal proses ablasi akan berhenti dimana pada saat itu kecepatan meteor ($v_{terminal}$) adalah sebesar 2–4 km. Menggunakan $v_{terminal} = 4$ km dan modifikasi persamaan (5) diperoleh pada titik terminal, densitas atmosfer (ρ) adalah sebesar $0,292 \text{ kg/m}^3$. Bila atmosfer Bumi dianggap sepenuhnya bersifat eksponensial, maka densitasnya pada ketinggian tertentu Z (dalam m) dinyatakan oleh :

$$\rho = \rho_{udara} e^{-Z/H} \quad (10)$$

Menggunakan persamaan tersebut, pada $\rho = 0,292 \text{ kg/m}^3$ didapatkan $Z = 9.850$ m. Hasil ini bersesuaian dengan *American Meteor Society* yang menyebutkan bahwa *fireball/bolide* yang sanggup memproduksi meteorit adalah *fireball/bolide* yang masih bercahaya setelah menembus batas ketinggian 20 km di atas permukaan Bumi. Dan *darkflight* bagi meteor Gianyar dimulai dari ketinggian 9,85 km di atas permukaan laut

Dari uraian di atas diketahui bahwa massa awal meteoroid Gianyar adalah 956 kg. Dengan kecepatan awal 20 km/detik, meteoroid mempunyai energi awal sebesar $1,912 \cdot 10^{11}$ Joule atau setara 0,05 kiloton TNT. Namun pada saat menumbuk Bumi, energi tumbukannya hanyalah sebesar $6,055 \cdot 10^3$ Joule atau hanya setara 1,5 gram TNT sehingga tidak berdampak serius bagi lingkungan.

Akibat pembentukan kawah, material di titik target terlempar keluar dan membentuk deposit *ejecta* di sekitar kawah. Collins (Collins dkk, 2005) telah mengembangkan formula guna mengestimasi volume *ejecta* dengan mengabaikan pengaruh hembusan angin, yakni:

$$V_e = \frac{\pi}{2} \left[h_{tr} D_{tr}^2 + h_{transisi} \left(\frac{D_{tr}^4 - D_{transisi}^4}{4D_{transisi}^2} - \frac{D_{tr}^2 - D_{transisi}^2}{2} \right) \right] \quad (11)$$

dimana :

$$D_{tr} = D_{transisi} \sqrt{\frac{h_{transisi} + h_{tr}}{h_{transisi}}}$$

$$h_{tr} = \frac{D_{transisi}}{14,1}$$

Kawah Gianyar memiliki $D_{transisi} = 0,88$ m dan $h_{transisi} = 0,311$ m, sehingga didapatkan $D_{tr} = 0,062$ m dan $D_{tr} = 0,924$ m. Maka lewat persamaan (11) didapatkan estimasi volume *ejecta* kawah Gianyar adalah hanya $0,0841 \text{ m}^3$.

Sementara distribusi (ketebalan) *ejecta* di sekeliling kawah diestimasi oleh :

$$t_{ejecta} = \frac{D_{transisi}^4}{112r^3} \quad (12)$$

dengan r = jarak dari tanggul/cincin kawah (m). Dari persamaan (12) bisa diketahui bahwa untuk kawah Gianyar, dalam jarak 1 m saja dari cincin kawah ketebalan *ejectanya* sangat kecil, yakni hanya 0,5 cm. Perlu diketahui bahwa model distribusi *ejecta* ini dibangun dengan asumsi batuan target adalah material saling lepas (seperti butir-butir pasir) sehingga mengabaikan kemungkinan daya ikat dan sifat liat materi seperti alluvial yang digenangi air. Dengan memperhitungkan sifat alluvial itu, maka diduga volume *ejecta* kawah Gianyar dan ketebalannya lebih kecil dari nilai yang disebutkan tersebut. Maka dengan sifat distribusi sedemikian itu, bisa dimengerti mengapa tumbukan tersebut tidak menimbulkan kerusakan/perubahan yang dramatik di sekitar kawah.

Selain memproduksi *ejecta*, tumbukan juga menghasilkan lelehan (fluida) di kawah, yang berasal baik dari batuan meteorit maupun target yang terlelehkan oleh tingginya suhu di titik tumbukan. Volume lelehan yang dibentuk oleh tumbukan memiliki formula :

$$V_m = 8,9 \cdot 10^{-12} E \quad (13)$$

dengan E = energi tumbukan (Joule). Pada kawah Gianyar didapatkan $V_m = 5,39 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$, jumlah yang terlalu kecil sehingga bisa diabaikan.

B.3. Estimasi Orbit

Orbit asal (heliosentris) meteoroid Gianyar bisa disimulasikan dengan *spreadsheet* Langbroek (Langbroek, 2004) dibantu *input* koordinat heliosentrik ekliptik Bumi pada saat tumbukan terjadi dari Francou (Francou & Chapront, ____). Koordinat titik tumbuk tidak diketahui secara pasti, namun bisa diaproksimasi dari koordinat *interest point* terdekat yakni kota kecamatan Sukawati ($8^\circ 36' \text{ LS } 115^\circ 17' \text{ BT}$).

Untuk bisa memprediksi orbit asal meteoroid Gianyar, harus diketahui lebih dulu tipe *fireball* yang dihasilkannya. Ceplecha (Ceplecha dkk, 1976 dalam Ceplecha, 1988) telah memperkenalkan kriteria P_E yang menjadi dasar bagi klasifikasi *fireball*, dalam bentuk :

$$P_E = \log \rho_E - 0,42 \log m + 1,49 \log v_{inf} - 1,29 \log \cos(90 - \alpha) \quad (14)$$

dengan ρ_E = densitas atmosfer di titik terminal (gram/cm^3) dan m = massa awal meteoroid (gram). Menggunakan nilai $\rho_E = 0,292 \text{ kg/m}^3 = 2,92 \cdot 10^{-4} \text{ gram/cm}^3$, $m = 9,56 \cdot 10^5 \text{ gram}$, $v_{inf} = 20 \text{ km/detik}$ dan $\alpha = 45^\circ$ didapatkan $P_E = -3,91$. Dengan demikian *fireball* dari meteoroid Gianyar diklasifikasikan ke dalam *fireball* tipe I karena memiliki $PE > -4,6$. Induk dari *fireball* tipe I adalah asteroid dan terutama adalah yang berada di dekat celah Kirkwood (Kirkwood gap)² di dalam sabuk asteroid, yang berada dalam jarak 2,5 AU dari Matahari (Wetheril, 1985 dalam Ceplecha, 1988). Ceplecha menunjukkan meteoroid dari *fireball* tipe I memiliki eksentrisitas orbit rata-rata 0,68.

Menggunakan $v_{inf} = 20 \text{ km/detik}$ dan $\alpha = 45^\circ$, simulasi menunjukkan meteoroid itu tidak mungkin datang dari barat karena orbitnya berbentuk hiperbola, suatu hal yang tak mungkin untuk *fireball* tipe I. Meteoroid juga tidak mungkin berasal dari barat daya ataupun barat laut, karena orbitnya sangat ellips (eksentrisitas $> 0,8$). Meteoroid pun sulit untuk berasal dari timur laut, timur dan selatan karena orbitnya tidak menjangkau celah

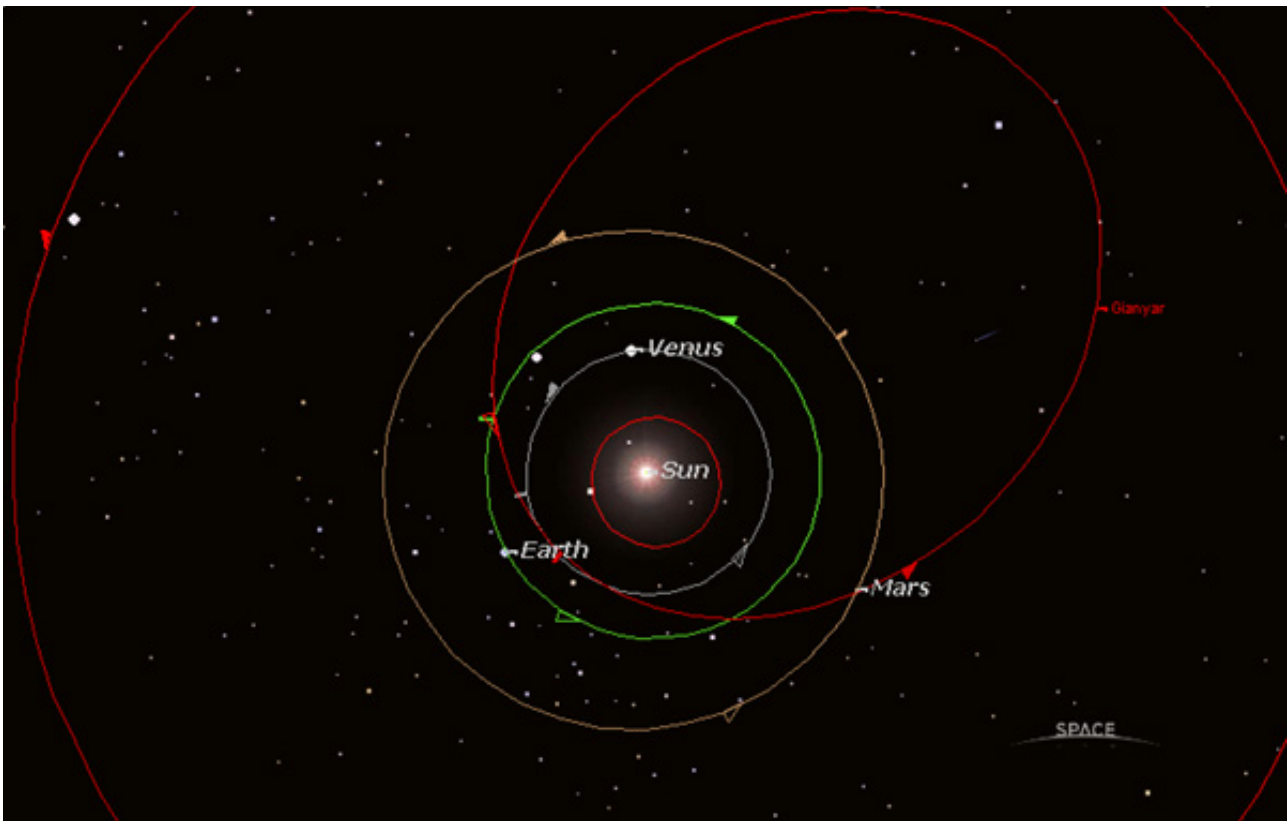
² Kirkwood gap adalah celah dalam sabuk asteroid utama (sabuk asteroid yang membentang di antara orbit Mars dan Jupiter), dimana asteroid yang menempati celah ini akan memiliki resonansi periode sebagai kelipatan bilangan bulat dari periode revolusi Jupiter, sehingga asteroid tersebut akan dipercepat untuk keluar dari celah.

Kirkwood. Maka satu–satunya arah kedatangan meteoroid yang mungkin adalah dari utara, tepatnya dari azimuth 350°.

Untuk waktu tumbukan 31 Desember 2007 16:30 UT elemen heliosentrik orbit meteoroid Gianyar adalah sebagai berikut :

Right Ascension (RA) toposentrik	: 93° 50'
Deklinasi (Dec) toposentrik	: 35° 39'
Jarak perihelion (q)	: 0,764 AU (115 juta km)
Jarak aphelion (Q)	: 3,16 AU (474 juta km)
Setengah sumbu utama orbit (a)	: 1,96 AU (294 juta km)
Eksentrisitas orbit (e)	: 0,611
Inklinasi orbit (i)	: 11,48°
Argumen perihelion (ω)	: 245,67°
Titik potong naik (node)dengan ekliptika (Ω)	: 280,461°
Periode sideris (P)	: 2,75 tahun
Waktu saat obyek menempati perihelion	: 11 Februari 2008 14:09 UT
Sifat pergerakan obyek	: prograde

Simulasi dengan menggunakan *software* Starry Night Bakyard v3.1 menyajikan visualisasi sebagai berikut :



Gambar 5

Orbit meteoroid Gianyar di antara orbit – orbit planet dalam di lingkungan tata surya.

C. KESIMPULAN

- ❖ Cekungan/kawah di Gianyar yang terbentuk pada 1 Januari 2008 kemungkinan besar memang dibentuk oleh tumbukan meteor.
- ❖ Meteor yang menumbuk kemungkinan besar berasal dari tipe akondrit, yang kaya akan silikat.
- ❖ Meteor jatuh menumbuk dengan kecepatan 76 m/detik; massa 2,094 kg; energi tumbukan $6,055 \cdot 10^3$ Joule dan berasal dari utara (azimuth 350°) dengan ketinggian awal 45° .
- ❖ Meteor tersebut kemungkinan besar berasal dari meteoroid berdiameter 77 cm dengan massa awal 956 kg, kecepatan awal 20 km/detik dan energi awal 0,05 kiloton TNT ($1,912 \cdot 10^{11}$ Joule). Meteoroid ini semula beredar mengelilingi Matahari secara prograde dengan orbit ellips (eksentrisitas = 0,611).
- ❖ Saat memasuki atmosfer Bumi, meteoroid tersebut terbakar menjadi *fireball/bolide* dengan magnitude visual ≈ -8 dan diikuti dengan *sonic boom*. Meteor tidak mengalami fragmentasi di atmosfer dan dengan demikian juga tidak meledak di atmosfer. Meteor mulai menjalani darkflight sejak ketinggian 9,85 km.
- ❖ Saat menumbuk Bumi, terbentuk kawah tumbukan bertipe *simple crater* dengan estimasi volume *ejecta* $0,0841 \text{ m}^3$. Tidak terbentuk lelehan dan juga lensa breksi. Estimasi distribusi *ejecta* menunjukkan pada jarak 1 m saja dari cincin kawah, ketebalan *ejecta* tinggal 0,5 cm. Sehingga tumbukan relatif tidak menghasilkan hamburan material yang berarti ke sekelilingnya.

D. REFERENSI

- American Meteor Society. 2001. **Frequently Asked Questions about Fireballs and Meteorite Dropping Fireballs**. <http://www.amsmeteors.org/fireball/faqf.html>
- Borovicka, et.al. 2001. **The Moravka Meteorite Fall : Fireball Trajectory Orbit and Fragmentation from Video Records**. 64th Annual Meteoritical Society Meeting (2000).
- Ceplecha. 1961. **Multiple Fall of Pribram Meteorites Photographed : 1. Double Station Photographs of The Fireball and Their Relations to The Found Meteorites**. Bulletin of Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences, vol. 2 (1961), p. 21–47.
- Ceplecha. 1988. **Earth's Influx of Different Populations of Sporadic Meteoroids from Photographic and Television Data**. Bulletin of Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences, vol. 39 (1988), p. 221–236.
- Ceplecha, et.al. 1995. **Video Observations of The Peekskill Meteorite Fireball : Atmospheric Trajectory and Orbit**. Abstract of Meteoritic & Planetary Science, Meteoritical Society (1995), p. 455.
- Collins, et.al. 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 vol. 40 (2005), no. 6, p. 817–840.
- Francou & Chapront. _____. **Planetary Ephemerides v4.2**. <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/VI/87/>
- Langbroek. 2004. **A Spreadsheet That Calculates Meteor Orbits**. J. IMO (2004) 32:4, p. 109–111.
- Masuk Muri, Monumen Meteorit Wonotirto Hari Ini Diresmikan**, Suara Merdeka Cybernews, edisi 20 Februari 2002, <http://www.suaramerdeka.com/harian/0202/20/dar26.htm>
- Meteor Meledak di Tengah Sawah**. Liputan 6, 2 Januari 2008, http://www.liputan6.com/news/?id=153021&c_id=7
- Meteor Jatuh di Bali**. Harian Suara Merdeka edisi Kamis 3 Januari 2008 hal 1.

- Sampel Tidak Mengandung Bahan Peledak.** Harian Kompas edisi Selasa 29 Januari 2008 hal 23.
- Shoemaker & Wynn. 1998. **The Day The Sands Caught Fire.** Scientific American, Nov. 1998, p. 64–71.
- Spurny, et.al. 2002. **The Atmospheric Trajectory and Heliocentric Orbit of The Neuschwantein Meteorite Fall on April 6, 2002.** Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2002, Berlin, 29 July–2 August 2002.
- Withers. 2001. **Meteor Storm Evidence Against The Recent Formation of Lunar Crater Giordano Bruno.** Lunar and Planetary Science vol. 32 (2001).