



SKALA DANJON DAN MAGNITUDO VISUAL GERHANA BULAN TOTAL 26 MEI 2021

Judhistira Aria Utama^{1*}, Cahyo Puji Asmoro², Arief Rizkiyanto Achmad³

¹Program Studi Fisika, Departemen Pendidikan Fisika, FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia

²Departemen Pendidikan Fisika, FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia

³Departemen Inovasi Kawasan Cerdas, Kangwon National University

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

ABSTRAK

Terperangkapnya Bulan fase purnama di dalam umbra Bumi dalam peristiwa gerhana Bulan total (GBT) dapat dimanfaatkan sebagai indikator tingkat kekeruhan stratosfer Bumi. Peristiwa GBT yang melintas di langit Indonesia pada 26 Mei 2021 telah berhasil diamati untuk memperoleh estimasi nilai skala Danjon (L) dan magnitudo visual (m_{vis}) Bulan saat gerhana. Skala Danjon merupakan metode deskripsi subjektif yang bersandar pada warna teramati Bulan di sekitar momentum puncak gerhana. Hasil pengamatan skala Danjon pada puncak gerhana menghasilkan nilai rata-rata sebesar $1,87 \pm 0,68$ yang konsisten dengan nilai median dan modusnya (masing-masing senilai $2,00 \pm 0,68$). Menggunakan nilai median skala Danjon di atas, telah diperoleh magnitudo visual saat puncak gerhana sebesar $-0,81$. Nilai m_{vis} prediksi untuk kondisi stratosfer yang bebas aerosol dari aktivitas vulkanik, memberikan hasil perhitungan $-3,01$ untuk magnitudo umbra $U = 1,0095$. Perbedaan antara nilai median magnitudo visual Bulan saat puncak gerhana dengan nilai prediksinya ini ($\Delta m = 2,2$) menghasilkan estimasi rata-rata tebal optis aerosol (τ) saat puncak gerhana sebesar $0,06$. Nilai ini 6x lebih besar daripada nilai tebal optis aerosol saat gerhana Bulan pada 1 siklus Saros sebelumnya (16 Mei 2003, tidak dapat diamati dari Indonesia). Posisi Bulan yang masih dekat dengan cakrawala saat fase puncak gerhana, membuat penampakan Bulan lebih gelap pada peristiwa GBT 26 Mei 2021 dibandingkan GBT pada 16 Mei 2003, sebagai dampak dari ekstingsi atmosfer dan bukan karena kandungan aerosol akibat letusan gunung api yang terjadi sebelumnya. Selain itu, pengukuran kecerahan langit arah zenit selama fase-fase gerhana memberikan nilai ambang magnitudo mata telanjang sebesar $+3,86$ di sekitar saat puncak gerhana. Kecerahan langit arah zenit di kota Bandung tidak berubah secara signifikan pada waktu pengamatan GBT 26 Mei 2021. Berdasarkan skala Bortle, kota Bandung masuk dalam kelas 8-9 (kawasan pusat kota).

© 2021 Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI

Kata kunci: Gerhana Bulan Total, Magnitudo Umbra, Magnitudo Visual, Puncak Gerhana, Skala Danjon

PENDAHULUAN

Berdasarkan informasi yang tersedia di laman <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/>, pada sepanjang tahun 2021 telah teragendakan empat peristiwa gerhana yang terdiri atas dua gerhana Matahari (10 Juni dan 4 Desember) dan dua gerhana Bulan (26 Mei dan 19 November). Seluruh peristiwa gerhana Matahari (gerhana Matahari cincin/GMC dan gerhana Matahari total/GMT) tidak dapat diamati dari Indonesia, sementara untuk kedua fenomena gerhana Bulan (gerhana Bulan total/GBT dan gerhana Bulan sebagian/GBS) dapat dinikmati oleh para pengamat langit dari wilayah Indonesia.

Fenomena langit yang terjadi secara reguler dan dapat diamati dari lokasi pengamat berada, dapat dimanfaatkan

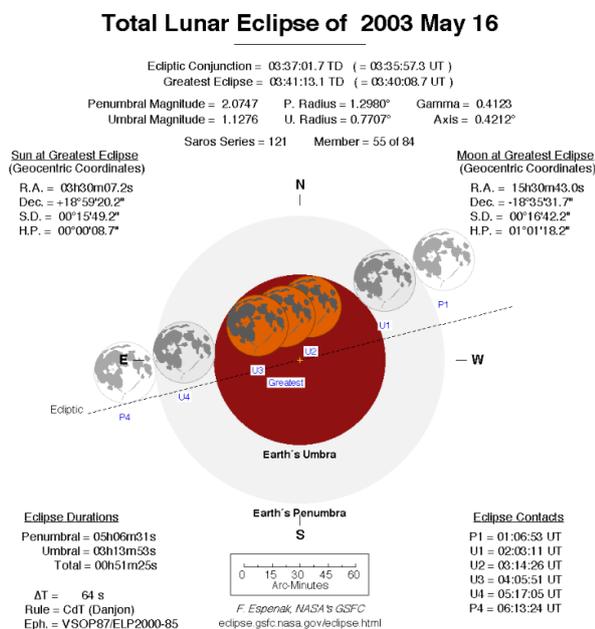
sebagai laboratorium alam dalam pembelajaran sains antariksa di berbagai jenjang pendidikan. Aristarchus (310–230 BC) dari Samos dicatat dalam sejarah sebagai orang pertama yang mendeskripsikan metode dalam menaksir jarak Bumi–Bulan yang dinyatakan dalam kelipatan radius Bumi. Gagasan yang digunakan Aristarchus dapat diterapkan atas dasar pengetahuan tentang ukuran diameter umbra Bumi pada saat terjadi gerhana Bulan (Momeni dkk., 2017; Spathopoulos, 2020). Memanfaatkan hasil pengamatan dua GBT pada tahun 2018, Utama dkk. (2018) menapak tilas jejak Aristarchus dalam menentukan jarak Bumi–Bulan.

André-Louis Danjon (1890–1967), astronom yang pernah menjadi direktur

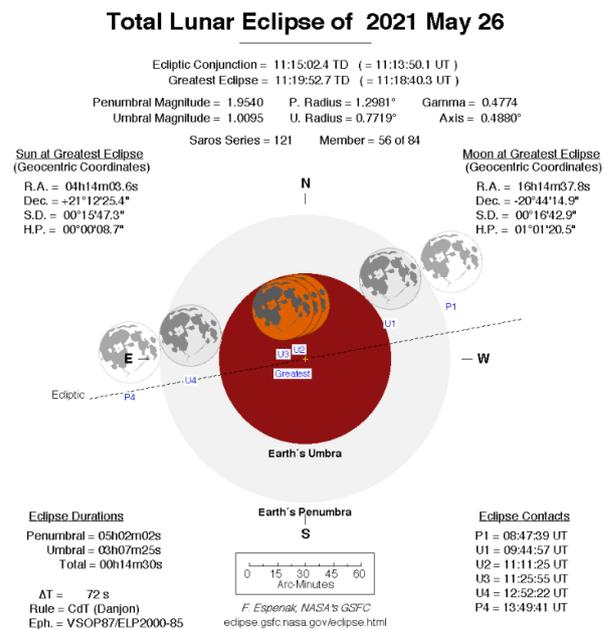
Observatorium Paris, menyediakan perangkat sederhana untuk mengkuantisasi perubahan warna piringan Bulan saat terjadi gerhana Bulan selama fase-fase gerhana. Perangkat tersebut berfokus pada rona dan intensitas warna rata-rata piringan Bulan yang dilaporkan oleh para pengamat. Skala Danjon standar memiliki lima indeks angka berupa bilangan bulat yang merentang dari 0 hingga 4, yaitu $L = 0$ (gerhana Bulan sangat gelap; Bulan hampir tidak terlihat), $L = 1$ (gerhana Bulan gelap, berwarna abu-abu atau kecoklatan), $L = 2$ (gerhana Bulan dengan warna merah gelap), $L = 3$ (gerhana Bulan dengan warna merah bata), dan $L = 4$ (gerhana Bulan dengan warna merah tembaga/jingga terang) (Stothers, 2004). Dalam menjustifikasi tingkat kegelapan piringan Bulan di sekitar puncak gerhana (pusat Bulan berada di jarak terdekatnya dengan sumbu kerucut umbra Bumi), pengamat diperkenankan pula untuk menggunakan bilangan desimal bila menurut pengamatan visualnya nilai skala Danjon berada di antara dua skala yang berdekatan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah melakukan pengukuran skala Danjon dari

pengamatan visual dan menghasilkan taksiran magnitudo tampak (*apparent magnitude*) terhadap fenomena GBT yang melintas di langit Indonesia pada 26 Mei 2021. Pada saat yang sama juga dilakukan pengukuran kecerahan langit arah zenit menggunakan instrumen *Sky Quality Meter* (SQM). Di balik kesederhanaannya, skala Danjon dapat pula menjadi indikator bagi tingkat transparansi atmosfer bumi. Bila gerhana Bulan terjadi di tahun-tahun dengan banyak letusan gunungapi, skala Danjon yang diperoleh dari pengamatan sangat mungkin menghasilkan nilai $L = 1$ bahkan $L = 0$ (Curticapean dkk., 2019). Peristiwa GBT yang diamati ini merupakan gerhana ke-56 dari total 84 gerhana Bulan dengan nomor Saros 121. Gerhana Bulan sebelumnya dengan nomor Saros yang sama, telah terjadi pada 16 Mei 2003. Hanya saja, gerhana Bulan yang juga berjenis total tersebut tidak dapat diamati dari wilayah Indonesia. Situasi dan waktu-waktu kontak antara tepi piringan Bulan dengan penumbra dan umbra Bumi untuk kedua gerhana diperlihatkan dalam Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Informasi GBT 16 Mei 2003



Gambar 2. Informasi GBT 26 Mei 2021

Gerhana Bulan Total (GBT) 26 Mei 2021 terjadi bertepatan dengan tibanya Bulan di jarak terdekat dengan Bumi (*perigee*). Kondisi ini membuat bentangan sudut Bulan purnama pada saat tersebut terlihat lebih besar daripada waktu-waktu lainnya. Sepanjang tahun 2021 terjadi dua kali fase Bulan purnama bertepatan dengan posisi Bulan di *perigee*, yaitu pada 27 April dan 26 Mei 2021. Bedanya adalah, pada fase purnama di bulan Mei 2021, Bulan juga berada di garis simpul (garis potong orbit Bumi/ekliptika dan orbit Bulan) selain berada di *perigee*. Hanya saat Bulan berada di atau dekat dengan garis simpul, peristiwa gerhana Bulan dapat terjadi.

METODE

Untuk memperoleh nilai skala Danjon dalam peristiwa GBT 26 Mei 2021 telah dilakukan observasi visual selama berlangsungnya gerhana di dek observasi Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan (FIP) universitas Pendidikan Indonesia, Bandung ($\phi = -6,91^0$ dan $\lambda = 107,63^0$). Para pengamat dibekali dengan formulir isian yang dilengkapi dengan deskripsi skala Danjon yang akan dicocokkan dengan penampakan Bulan yang teramati. Selain mengumpulkan data dari lokasi di atas, dilibatkan pula peran serta para *citizen scientist* dengan mengunggah formulir serupa dalam format digital menggunakan fasilitas *GoogleForm*. Dengan data sebanyak 259 respon yang diperoleh melalui *GoogleForm*, diharapkan mampu menghindari problem *small number statistics* di dalam pengolahan data hasil observasinya. Sebaran pengamat yang

berkontribusi dalam kegiatan ini mulai dari kota Bandung, Kab. Bandung, Kab. Bandung Barat, Kota Cimahi, Kota Bekasi, Kab. Bekasi, Kab. Tasikmalaya, Kab. Cirebon, Kab. Garut, Kab. Majalengka, Kota Serang, Kota Tangerang, Kab. Luwu, Kab. Soppeng, Kab. Jeneponto, dan kota Makassar.

Ada dua teknik yang bisa digunakan dalam pengukuran tingkat kegelapan piringan Bulan di sekitar fase puncak gerhana (Cooper, 2004). Teknik pertama menggunakan bantuan binokuler yang dibalik untuk mengamati Bulan. Metode *reversed binocular* ini dikenal pula sebagai metode Selivanov. Hasil yang diperoleh berupa magnitudo visual Bulan, m_{RB} (*reversed binocular magnitude*), yang ditaksir dari magnitudo bintang-bintang atau planet yang telah diketahui nilainya yang berada di sekitar Bulan saat gerhana. Magnitudo semu visual Bulan, m_{vis} , dapat diperoleh menggunakan persamaan (1) berikut (Cooper, 2004):

$$m_{vis} = m_{RB} - 0,2 - 5\log M \quad (1)$$

dengan M merupakan perbesaran sudut binokuler.

Metode lain yang dapat digunakan dalam mengukur tingkat kegelapan piringan Bulan adalah metode Danjon. Dalam pengamatan yang telah dilakukan, dipilih penggunaan metode ini karena tidak memerlukan alat bantu tambahan. Contoh formulir skala Danjon di sekitar waktu puncak gerhana yang diisi oleh para pengamat ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Contoh hasil pengesanan seorang pengamat terhadap tingkat kegelapan piringan Bulan menggunakan skala Danjon dalam pengamatan GBT 26 Mei 2021

Berdasarkan skala Danjon yang telah diperoleh masing-masing pengamat, dapat dihitung m_{vis} menggunakan persamaan (2) (Cooper, 2004):

$$m_{vis} = 3,99 - 3,13L - 0,364L^2 \quad (2)$$

dengan L adalah nilai skala Danjon. Untuk penggunaan nilai rata-rata atau median L , akan diperoleh pula nilai rata-rata atau median untuk m_{vis} .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah berhasil diperoleh 264 data hasil pengukuran nilai skala Danjon di sekitar fase puncak gerhana dari pengamatan visual menggunakan mata telanjang. Dari jumlah tersebut berhasil diseleksi data yang memberikan nilai skala Danjon yang lengkap untuk seluruh rentang waktu observasi (18:18 WIB – 18:22 WIB dengan jeda 1 menit), terutama saat puncak gerhana pada 18:20 WIB, yaitu sebanyak 204 data.

Untuk memperoleh nilai skala Danjon pada saat puncak gerhana (18:20 WIB), nilai dari para pengamat yang merentang dari $L = 0$ hingga $L = 4$ dirata-ratakan dan diperoleh $L_{rataan} = 1,75$ dengan standar deviasi sebesar 0,9. Mengingat lebarnya taksiran nilai L saat puncak gerhana dari para pengamat, perlu diperhatikan distribusi nilai L guna mengeliminasi pencilan. Mayoritas pengamat (94 responden atau meliputi 46% jumlah data) melaporkan $L = 2$, sementara 56 (27%) dan 32 (16%) responden berturut-turut melaporkan $L = 1$ dan $L = 3$. Pada akhirnya pengolahan data berfokus pada 182 data yang seluruhnya tersebar di wilayah Bandung Raya. Penggunaan nilai rata-rata dan median dari 182 data terseleksi memberikan nilai skala Danjon masing-masing sebesar $1,87 \pm 0,68$ dan $2,00 \pm 0,68$. Hasil ini mengindikasikan bahwa GBT 26 Mei 2021 memiliki tingkat kegelapan menengah (gerhana Bulan dengan warna merah gelap). Menggunakan Persamaan (2) dengan masukan L_{rataan} dan L_{median} diperoleh m_{vis} (rata-rata) dan m_{vis} (median) berturut-turut sebesar $-0,58$ dan $-0,81$ magnitudo. Penggunaan nilai median

menghasilkan nilai m_{vis} untuk GBT saat puncak gerhana 1,24x lebih terang dibandingkan penggunaan nilai m_{vis} rata-rata.

Sebagai benda langit yang terlihat bercahaya semata-mata karena memantulkan sinar Matahari, Bulan pada saat puncak gerhana akan terlihat lebih redup bila dibandingkan saat tidak tertutup oleh umbra Bumi. Nilai m_{vis} Bulan purnama saat tidak terjadi gerhana adalah $-12,6$. Artinya, rasio terang Bulan saat puncak gerhana pada peristiwa GBT 26 Mei 2021 terhadap terang Bulan saat purnama di luar umbra Bumi, masing-masing hanya sebesar $1,92 \times 10^{-5}$ (m_{vis} median) dan $1,56 \times 10^{-5}$ (untuk m_{vis} rata-rata). Dengan kata lain, Bulan pada saat tersebut terlihat sekitar 52.000 – 64.100 kali lebih redup daripada Bulan purnama saat tidak terjadi gerhana! Aerosol yang banyak mengendap di lapisan stratosfer (lapisan di ketinggian > 10 km hingga 50 km) yang dihasilkan dari peristiwa erupsi gunungapi yang kuat, berperan dalam proses hamburan pantulan cahaya Matahari dari Bulan dan mengganggu transmisi foton sebelum tiba di mata pengamat maupun detektor lainnya. Hal ini berarti bahwa kecerahan dan warna Bulan saat gerhana sangat peka terhadap kandungan aerosol di stratosfer, sekaligus hal tersebut dapat menjadi indikator bagi tingkat kebersihan stratosfer dari aerosol yang bersumber dari aktivitas vulkanik (Keen, 1983; Stothers, 2005; Stothers, 2007). Diskusi terkait pengaruh kandungan aerosol di stratosfer dari aktivitas vulkanik terhadap perubahan iklim global dapat dijumpai dalam Ridley (2014) dan Toohey (2017).

Tebal optik aerosol (τ) dapat dihitung pada waktu gerhana terjadi dari perbedaan antara magnitudo semu visual Bulan, m_{vis} , hasil pengamatan (diperoleh dari hasil konversi L) dan m_{vis} teoretik (Vital, tersedia di <http://www.rea-brasil.org/teste/reportes/pdf/reportes11-artigo03-ingles.pdf>). Nilai m_{vis} teoretik dapat dihitung dengan dua cara. Cara pertama, menggunakan data yang dibangkitkan dari model teoretik untuk kondisi atmosfer standar bebas aerosol dengan mengasumsikan distribusi ozon

dan debu. Cara ke dua adalah dengan menggunakan korelasi empirik antara magnitudo gerhana (U_{mag}) dan m_{vis} dari data gerhana-gerhana yang pernah terjadi yang tidak berada di bawah pengaruh signifikan kehadiran aerosol. Magnitudo gerhana (U_{mag}) didefinisikan sebagai fraksi diameter Bulan yang tertutup oleh umbra Bumi. Untuk peristiwa GBT, nilai $U_{mag} \geq 1$. Di dalam penelitian ini digunakan cara ke dua, memanfaatkan persamaan empirik yang diperoleh Helio de Carvalho Vital dari Jejaring Pengamatan Astronomi Brasil, dalam bentuk Persamaan (2) berikut:

$$m_{vis\ teoretik} = -7,34 + 4,29U_{mag} \quad (2)$$

Untuk GBT 26 Mei 2021, data gerhana memberikan nilai $U_{mag} = 1,0095$. Dengan Persamaan (2) dapat diperoleh $m_{vis\ teoretik}$ bernilai $-3,01$. Nilai mutlak selisih antara $m_{vis\ teoretik}$ dengan m_{vis} hasil pengamatan yang diturunkan dari nilai skala Danjon adalah sebesar Δm_{vis} rata-rata = $+2,43$ dan Δm_{vis} median = $+2,20$. Nilai tebal optis aerosol yang bersesuaian dengan kedua nilai Δm_{vis} di atas relatif sama, yaitu sebesar $\tau = 0,06$. Berdasarkan data dan diskusi yang dapat dijumpai di dalam Keen (1983), nilai τ rata-rata sebesar $0,06$ bersesuaian dengan nilai L di antara $L = 0$ dan $L = 1$.

Bila dibandingkan dengan GBT yang terjadi satu siklus Saros sebelumnya, yaitu GBT 16 Mei 2003, laporan pengamatan dari Helio de Carvalho Vital memperoleh nilai L rata-rata = $2,3 \pm 0,2$, $m_{vis} = -2,1 \pm 0,2$, dan $\tau = 0,01$. Terlihat jelas bahwa GBT 16 Mei 2003 tampak lebih terang daripada GBT 26 Mei 2021. Pertanyaan yang muncul adalah apakah GBT 26 Mei 2021 yang dikesani dengan tingkat kegelapan menengah dipengaruhi oleh kandungan aerosol yang lebih banyak di stratosfer?

Data yang tersedia di laman https://volcano.si.edu/database/search_erpotion_results.cfm menyediakan informasi bahwa dalam kurun waktu Maret 2020 – April 2021 telah terjadi sembilan kali peristiwa erupsi yang terkonfirmasi. Erupsi

paling kuat dihasilkan oleh gunungapi Sinabung pada 8 Agustus 2020 dengan indeks letusan vulkanik (*Volcanic Explosivity Index* – VEI) maksimum bernilai 3. Indeks letusan ini belum mampu menginjeksikan material vulkanik hingga lapisan stratosfer secara signifikan. Artinya, penampakan Bulan di dalam umbra Bumi yang terlihat merah gelap haruslah diakibatkan oleh faktor lain. Menurut data posisi Bulan dari waktu ke waktu selama fase gerhana untuk lokasi pengamatan di kota Bandung, gerhana Bulan fase penumbra dimulai sejak Bulan masih berada di bawah cakrawala (15:47 WIB). Bulan terbit pada pukul 17:35 WIB dalam keadaan sudah memasuki fase gerhana sebagian. Pada saat puncak gerhana yang bertepatan dengan pukul 18:18 WIB, ketinggian Bulan dari cakrawala saat itu $< 9^{\circ}$. Dengan posisi yang masih rendah tersebut, ekstingsi atmosfer yang biasa dinyatakan dalam magnitudo per massa udara dipastikan akan berpengaruh signifikan terhadap kenampakan warna Bulan. Semakin dekat dengan cakrawala objek yang diamati, semakin banyak udara yang harus dilalui oleh foton. Objek di ketinggian sekitar 10° dari cakrawala akan terlihat $0,9$ magnitudo lebih redup (setara 44% dari terang asalnya). Artinya, nilai m_{vis} (rata-rata) sebesar $-0,58$ dan m_{vis} (median) senilai $-0,81$ magnitudo yang diperoleh dari pengamatan, seharusnya masing-masing bernilai $-1,47$ dan $-1,70$ magnitudo, seandainya momentum puncak gerhana terjadi di dekat meridian. Dalam kasus GBT 16 Mei 2003, puncak gerhana bertepatan dengan posisi Bulan 70° di atas cakrawala di kota Rio de Janeiro, Brasil.

Dalam sesi pengamatan GBT 26 Mei 2021 juga dilakukan pengukuran kecerahan langit menggunakan fotometer saku SQM tipe LU yang diarahkan ke zenit dengan resolusi 1 menit. Pengukuran kecerahan langit berbantuan SQM dalam peristiwa gerhana Bulan juga dapat dijumpai dalam sejumlah literatur (lihat misalnya: Birriel dkk., 2019; Birriel dkk., 2020; Góez Therán dkk., 2021) Pengukuran dilakukan sejak

pukul 17:38 WIB hingga 20:59 WIB. Kejadian habisnya daya baterai laptop yang digunakan untuk merekam data, berdampak pada kekosongan data dalam rentang waktu 18:15 – 18:28 WIB. Data kecerahan langit di arah zenit pada pukul 18:14 WIB dan 18:29 WIB masing-masing menunjukkan nilai pengukuran sebesar 16,93 magnitudo per detik busur kuadrat ($\text{mag}/["]^2$) dan 18,80 $\text{mag}/["]^2$. Nilai tipikal kecerahan langit tergelap di arah zenit pada bulan-bulan musim kering di kota Bandung saat Bulan dalam fase sabit tua maupun sabit muda adalah sebesar 17,70 – 18,00 $\text{mag}/["]^2$. Dalam skala Bortle (Bortle, 2001), kota Bandung masuk dalam kelas 8-9, yang mendeskripsikan kondisi langit malam di kota besar. Menggunakan nilai rata-rata kecerahan langit sebesar 17,87 $\text{mag}/["]^2$ untuk mengisi kekosongan data selama jendela waktu di sekitar puncak gerhana, memberikan nilai batas ambang mata telanjang (*Naked Eye Limiting Magnitude – NELM*) sebesar +3,86. Nilai ini berarti hanya objek langit dengan magnitudo lebih terang atau magnitudo $< +3,86$ yang akan dapat diamati. Posisi Bulan yang semakin meninggi dan berangsur-angsur meninggalkan umbra Bumi, membuat kecerahan langit kembali meningkat. Pada akhir gerhana kecerahan langit mencapai nilai 17,16 $\text{mag}/["]^2$.

PENUTUP

Telah dilakukan pengamatan GBT 26 Mei 2021 dengan melibatkan *citizen scientist*. Hasil pengamatan visual memperoleh nilai skala Danjon L_{rataan} sebesar $1,87 \pm 0,68$ yang konsisten dengan nilai mediannya ($L_{median} 2,00 \pm 0,68$). Pada saat puncak gerhana, magnitudo Bulan m_{vis} ditaksir berkisar antara $-0,58$ dan $-0,81$ magnitudo. Perbedaan dengan hasil perhitungan $m_{vis\ teoretik}$ menghasilkan estimasi rata-rata tebal optis aerosol (τ) saat puncak gerhana sebesar 0,06. Nilai ini berasosiasi dengan nilai L antara $L = 0$ dan $L = 1$. Nilai median hasil pengamatan, memberikan $L = 2$.

Posisi Bulan yang masih dekat dengan cakrawala saat fase puncak gerhana pada

peristiwa GBT 26 Mei 2021, membuat Bulan terlihat lebih gelap dibandingkan pada saat GBT 16 Mei 2003. Fakta ini bukan diakibatkan stratosfer yang lebih kotor akibat letusan gunung api yang terjadi sebelumnya, melainkan karena ekstingsi atmosfer. Pengukuran kecerahan langit arah zenit selama fase-fase gerhana menunjukkan bahwa kecerahan langit di kota Bandung tidak berubah secara signifikan pada waktu pengamatan GBT 26 Mei 2021. Berdasarkan skala Bortle, kota Bandung masuk dalam kelas 8-9 (kawasan pusat kota).

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada para *citizen scientist* atas kontribusinya dalam penggalangan data observasi GBT 26 Mei 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Birriel, J. J., & Adkins, J. K. (2019). Sky brightness at zenith during the January 2019 total lunar eclipse. *JAAVSO*, 47, 1-4.
- Birriel, J. J., Adkins, J. K., Bertolo, A., Ehlert, R., McKeag, M., Ribas, S. J., & Tekatch, A. (2020). A Gallery of Sky Brightness Curves from the January 2019 Total Lunar Eclipse. *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 48(1), 76.
- Bortle, J. E. (2001). The Bortle Dark-Sky Scale. *Sky and Telescope*.
- Cooper, T. (2004). The two total lunar eclipses of 2003. *MNASSA: Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa*, 63(1), 8-11.
- Curticapean, D., Vauderwange, O., & Heitz, B. (2019, May). Astronomical events and their impact on knowledge transfer in optics and photonics. In *Education and Training in Optics and Photonics* (p. 11143_30). *Optical Society of America*.

- Góez Therán, C., & Vargas Domínguez, S. (2021). Comparative analysis of sky quality and meteorological variables during the total lunar eclipse on 14-15 April 2014 and their effect on qualitative measurements of the Bortle scale. *Revista mexicana de astronomía y astrofísica*, 57(1), 57-66.
- Keen, R. A. (1983). Volcanic aerosols and lunar eclipses. *Science*, 222(4627), 1011-1013.
- Momeni, F., Papei, H., Jamshidzadeh, R., Bereliani, S., Miri, A., Aghababaei, A., ... & Ghasabi Kondelaji, N. (2017). Determination of the Sun's and the Moon's sizes and distances: Revisiting Aristarchus' method. *American Journal of Physics*, 85(3), 207-215.
- Ridley, D. A., Solomon, S., Barnes, J. E., Burlakov, V. D., Deshler, T., Dolgii, S. I., ... & Vernier, J. P. (2014). Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change. *Geophysical Research Letters*, 41(22), 7763-7769.
- Spathopoulos, V. M. (2020). Using freeware planetarium software to simulate the astronomical measurements of ancient Greeks. *Physics Education*, 55(2), 025020.
- Stothers, R. B. (2004). Stratospheric transparency derived from total lunar eclipse colors, 1665–1800. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 116(823), 886.
- Stothers, R. B. (2005). Stratospheric transparency derived from total lunar eclipse colors, 1801–1881. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117(838), 1445.
- Stothers, R. B. (2007). Three centuries of observation of stratospheric transparency. *Climatic Change*, 83(4), 515-521.
- Toohey, M., & Sigl, M. (2017). Volcanic stratospheric sulfur injections and aerosol optical depth from 500 BCE to 1900 CE. *Earth System Science Data*, 9(2), 809-831.
- Utama, J.A., Nurfiani, D., Asmoro, C.P., Achmad, A.R., Nugraha, M.D., & Nugroho, A.S. (2018). Umbra Bumi dan Jarak Bumi-Bulan dalam Peristiwa Gerhana Bulan Total 31 Januari & 28 Juli 2018. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (SINAFI) 2018*, ISBN 978-602-74598-2-3, 239-244.