

Umbra Bumi dan Jarak Bumi-Bulan dalam Peristiwa Gerhana Bulan Total 31 Januari & 28 Juli 2018

Judhistira Aria Utama^{1*}, Dini Nurfitriani², Cahyo Puji Asmoro¹, Amsor¹, Arief Rizqiyanto Achmad¹, Mohamad Dena Nugraha¹, Harbi Setyo Nugroho¹

¹*Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudhi 229 Bandung 40154, Indonesia*

²*Earth Observatory of Singapore, Nanyang Technological University, 50 Nanyang Ave, Block N2-01a-15 639798, Singapore*

** Corresponding author. E-mail: j.aria.utama@upi.edu, Telp: +62-22-2004548, Fax: +62-22-2004548*

ABSTRAK

Fenomena alam berupa gerhana Bulan total (GBT) yang terjadi pada 31 Januari 2018 dan 28 Juli 2018 telah dimanfaatkan dalam kegiatan menapak tilas eksperimen Aristarchus (310 – 230 SM) untuk penentuan jarak Bulan dari Bumi. Pengamatan astronomi di Laboratorium Bumi dan Antariksa Universitas Pendidikan Indonesia dan Earth Observatory of Singapore telah menghasilkan potret-potret Bulan sepanjang durasi momen gerhana Bulan. Citra digital Bulan dengan waktu ekspos terbaik telah dipilih untuk diolah lebih lanjut menggunakan geometri guna memperoleh radius Bulan dan umbra Bumi. Informasi yang didapat dari pengamatan dan perhitungan perangkat lunak astronomi dimanfaatkan untuk menghitung jarak Bumi – Bulan dengan galat kurang dari 10% bila dibandingkan dengan nilai jarak faktual Bumi – Bulan pada saat potret dihasilkan. Kegiatan yang telah dilakukan dapat dijadikan sebagai aktivitas laboratorium untuk mahasiswa dalam mata kuliah Ilmu Pengetahuan Bumi & Antariksa (IPBA).

Kata Kunci: Gerhana Bulan; Umbra; Jarak Benda Langit

ABSTRACT

The natural phenomenon of a total lunar eclipse (TLE) that occurred on January 31, 2018 and July 28, 2018 has been utilized to reproduce the Aristarchus (310 – 230 BC) experiment for determining the distance of the Moon from the Earth. Astronomical observations at the Earth and Space Laboratory of Indonesia University of Education and the Earth Observatory of Singapore have gathered many portraits of the Moon throughout the duration of the lunar eclipse moment. Digital images of the Moon with the best exposure time have been selected for further processing using geometry in order to obtain the Moon's and Earth's umbral angular radius. The informations obtained from observation and provided by astronomical software are used to calculate the Earth-Moon distance with error of less than 10% when compared with the Earth-Moon factual distance at the moment of portraits was produced. This activity can be carried out as an exercise for students of the subject of Earth & Space Science.

Keywords: Lunar Eclipse; Lunar Umbral; Distance of Celestial Bodies

1. Pendahuluan

Sebagai satu-satunya satelit alami planet Bumi, Bulan merupakan objek langit terdekat ke planet ini. Menurut catatan sejarah, upaya pertama manusia dalam menentukan jarak Bulan dari Bumi telah dilakukan oleh Aristarchus (310 – 230 BC) dari Samos [1]. Aristarchus telah mendeskripsikan metode yang akurat dalam menaksir jarak Bulan yang dinyatakan dalam kelipatan radius Bumi. Metode ini bekerja atas dasar pengetahuan ukuran diameter umbra Bumi di jarak Bulan pada saat terjadi gerhana Bulan [2].

Usaha penentuan jarak Bumi – Bulan kembali berlanjut di tangan generasi selanjutnya. Sama halnya dengan metode Aristarchus yang menggunakan konstruksi geometri dalam penentuan jarak ini, Hipparchus (190 – 120 SM) memperoleh nilai jarak Bumi – Bulan dalam rentang 59 – 67 kali radius Bumi [3], sementara Ptolomeus (100 – 170 M) mendapati nilai $64 \frac{1}{6}$ kali radius Bumi sebagai jarak terjauh Bulan dari Bumi [4].

Pada era penjelajahan antariksa yang sudah dimulai sejak paruh ke dua abad ke-20, penentuan jarak Bumi – Bulan dapat dilakukan dengan ketelitian tinggi. Dalam misi Apollo XI, telah ditinggalkan retroreflektor di permukaan Bulan, yang hingga saat ini masih digunakan secara berkala untuk memantulkan laser yang ditembakkan oleh Observatorium McDonald dalam pengukuran jarak Bumi – Bulan dengan akurasi terbaik yang dicapai hingga saat ini, yaitu mencapai orde milimeter. Diketahui bahwa orbit Bulan berbentuk elips, dengan jarak rata-rata pusat Bulan dari pusat Bumi adalah 385.000,6 km [5]. Nilai ini berbeda dengan setengah sumbu panjang orbit Bulan yang dituliskan dalam buku-buku teks sebesar 384.402 km [6].

Nilai jarak Bumi – Bulan lazim digunakan sebagai satuan jarak untuk peristiwa papasan dekat (close encounter) antara asteroid atau komet dengan planet Bumi. Tingkat presisi pengukurannya dapat menjadi laboratorium uji bagi Teori Relativitas Umum [7] maupun mem-perhalus nilai-nilai besaran astronomi, misalnya besaran massa dan radius Bumi [8,9].

Eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini dimaksudkan sebagai media pembelajaran bagi mahasiswa bahwa penentuan jarak tidak harus selalu menggunakan alat ukur. Dalam hal penentuan jarak antarbenda langit, besarnya nilai jarak

pisah praktis menjadi kendala. Meskipun demikian, melalui pengamatan astronomi dapat diekstrak informasi mendasar yang dapat dimanfaatkan untuk memperoleh besaran jarak yang dimaksud.

2. Bahan dan Metode

2.1. Gerhana bulan

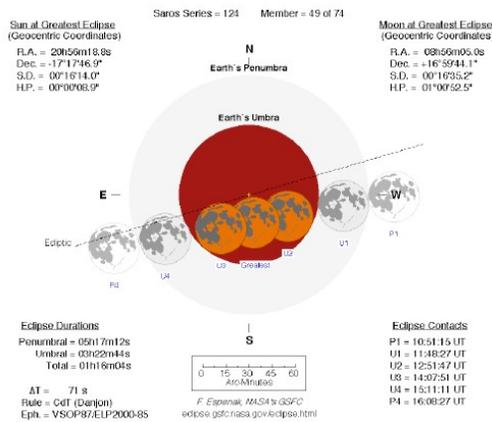
Peristiwa gerhana Bulan terjadi pada saat terdapat porsi bayang-bayang Bumi yang jatuh di permukaan Bulan yang hanya dimungkinkan terjadi ketika Bulan berada dalam fase purnama. Bergantung pada seberapa dalam Bulan terperangkap bayang-bayang Bumi, gerhana jenis ini dibedakan atas tiga macam, yaitu gerhana Bulan penumbra (GBP, sebagian atau seluruh permukaan Bulan berada di dalam bayang-bayang terang Bumi/penumbra), gerhana Bulan sebagian (GBS, sebagian permukaan Bulan berada di dalam bayang-bayang gelap Bumi/umbra), dan gerhana Bulan total (GBT, seluruh permukaan Bulan berada di dalam bayang-bayang gelap Bumi).

Bagi sebagian besar pengamat kasat mata, penutupan permukaan Bulan purnama oleh penumbra Bumi tidak berdampak signifikan terhadap kecerahan/terangnya Bulan. Tidak demikian halnya dengan penutupan sebagian atau seluruh permukaan Bulan oleh umbra Bumi. Selama berada di dalam umbra Bumi, kecerahan Bulan purnama dapat berkurang secara signifikan, terlebih bila seluruh permukaan Bulan terperangkap dan pada saat yang sama kondisi atmosfer lokal sedang dipenuhi aerosol.

Karena lebih nyata dalam memperlihatkan terjadinya perubahan kecerahan Bulan purnama, peristiwa GBS dan GBT dapat dimanfaatkan sebagai laboratorium alam dalam penentuan jarak Bumi – Bulan sebagaimana akan dipaparkan dalam artikel ini. Sepanjang tahun 2018, terdapat dua kali peristiwa GBT, masing-masing satu peristiwa di setiap musim gerhananya, yang keduanya dapat diamati dari Indonesia. Yang membedakan kedua GBT ini adalah posisi Bulan dalam orbitnya saat purnama yang bertepatan dengan dimulainya musim gerhana.

Musim gerhana pada tahun 2018 dimulai pada awal tahun. Pada 31 Januari 2018 yang bertepatan pula dengan fase Bulan purnama ke-2 kalinya di bulan Januari (fase purnama yang pertama berlangsung pada 2 Januari 2018), Matahari berada di arah garis simpul (garis potong orbit Bulan dengan ekliptika). Kondisi

ini memungkinkan untuk terjadinya gerhana Bulan dengan jenis gerhana Bulan yang terjadi merupakan gerhana Bulan total (GBT). Situasi dan waktu-waktu kontak antara tepi piringan Bulan dengan penumbra dan umbra Bumi diperlihatkan dalam Gambar 1. Gerhana Bulan Total (GBT) 31 Januari 2018 terjadi bertepatan dengan posisi Bulan di sekitar jarak terdekat dengan Bumi yang mungkin dicapainya. Kondisi ini membuat bentangan sudut Bulan purnama pada saat tersebut akan terlihat lebih besar daripada biasanya.

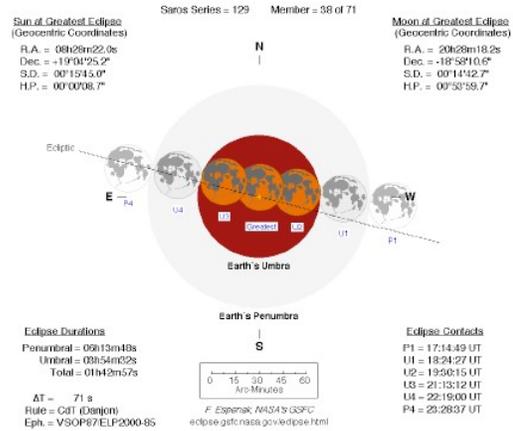


Gambar 1. Informasi GBT 31 Januari 2018.

Kondisi yang berlawanan terjadi pada GBT 28 Juli pada musim gerhana yang ke-2 di tahun 2018. Saat itu Bulan justru berada di sekitar jarak terjauhnya dari Bumi, sehingga ukuran sudut bundaran Bulan purnama lebih kecil daripada biasanya. Situasi dan waktu-waktu kontak antara tepi piringan Bulan dengan penumbra dan umbra Bumi diperlihatkan dalam Gambar 2.

2.2. Radius umbra bumi

Penentuan radius Bulan dan umbra Bumi di jarak Bulan diperoleh dari citra digital GBT 31 Januari 2018 dan 28 Juli 2018. Mengingat tidak seluruh citra digital yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik, maka tidak seluruh citra yang berhasil diperoleh dalam dua sesi pengamatan di dua kesempatan berbeda itu yang mengalami pemrosesan lebih lanjut. Hanya citra digital yang menghasilkan citra umbra dengan tepi yang tegas yang mengalami pengolahan selanjutnya.



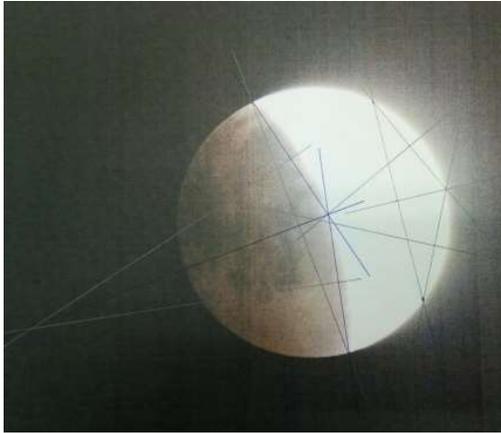
Gambar 2. Informasi GBT 28 Juli 2018.

Terdapat dua metode dalam proses pengolahan citra digital yang tersedia. Metode pertama, yang dikenal pula sebagai Metode Langsung, menggunakan citra Bulan yang terperangkap sebagian di dalam umbra Bumi, yang telah mengalami proses pencetakan. Potret GBT dalam fase sebagian tersebut selanjutnya diolah menggunakan geometri untuk memperoleh nilai radius citra Bulan dan umbra Bumi (ditunjukkan dalam Gambar 3).

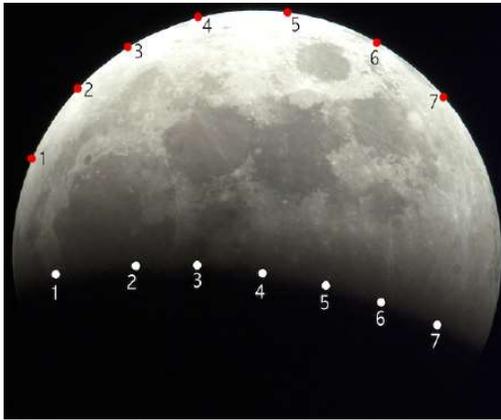
Memanfaatkan perangkat lunak MoonCalc 6.0¹ dapat diketahui radius sudut Bulan purnama pada saat potret dihasilkan. Menggunakan matematika kesebandingan, dapat dihitung nilai radius sudut umbra Bumi di jarak Bulan dari Bumi. Metode langsung inilah yang diterapkan dalam proses pengolahan citra GBT di dalam artikel ini, dengan pertimbangan proses yang dilakukan tidak memerlukan peranti elektronik dan tetap dapat menghasilkan ketelitian yang baik.

Metode lainnya merupakan metode tidak langsung, yaitu memproses citra digital Bulan dalam GBT fase sebagian menggunakan perangkat lunak pengolah citra. Dengan metode ini diperlukan sedikitnya tujuh koordinat titik di sekeliling tepi bundaran Bulan dan tepi bundaran umbra Bumi. Radius masing-masing objek dihitung dari keliling lingkaran Bulan dan umbra Bumi melalui pencocokan kuadrat terkecil (*least square fit*). Ilustrasi untuk metode ini ditunjukkan dalam Gambar 4.

¹ Merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh Dr. Monzur Ahmed dan tersedia di <http://mooncalc.moonsighting.org.uk/>



Gambar 3. Geometri yang digunakan dalam penentuan radius citra Bulan dan umbra Bumi.



Gambar 4. Pengolahan citra digital dengan bantuan perangkat lunak dalam penentuan radius citra Bulan dan umbra Bumi. (Sumber: Miguel Angel Pio Jiménez)

2.3. Jarak dalam astronomi

Dalam astronomi, jarak antarbenda langit menurut seorang pengamat di posisi tertentu, lebih sering dinyatakan dalam satuan sudut, alih-alih dalam satuan metrik yang digunakan secara luas. Jarak sudut ini disebut sebagai elongasi, yang menyatakan seberapa jauh bentangan sudut pisah antarbenda langit dari posisi pengamat berada. Sebagai ilustrasi ditunjukkan dalam Gambar 5, pada saat Matahari terbenam elongasi suatu bintang bernilai hampir 90° .

Informasi berupa waktu pemotretan yang tersimpan dalam citra digital terpilih, dimanfaatkan sebagai masukan (input) untuk memperoleh nilai radius sudut Bulan menggunakan perangkat lunak MoonCalc 6.0. Dengan data radius sudut Bulan ini dapat

diperoleh radius sudut umbra Bumi melalui prinsip kesebandingan. Selanjutnya, jarak Bulan dari Bumi dinyatakan sebagai kelipatan radius Bumi dapat dihitung dari hubungan [2]:

$$\frac{d_{\oplus}}{R_{\oplus}} = \frac{\left[2 - \frac{(2+\phi)}{(1+\frac{\phi}{\alpha})} \right]}{\phi} \quad (1)$$

Dalam persamaan (1), ϕ dan α masing-masing menyatakan diameter sudut Bulan dan umbra Bumi dalam satuan radian. Dengan mengetahui nilai radius rata-rata Bumi, dapat diperoleh jarak Bumi – Bulan pada saat potret Bulan dihasilkan.



Gambar 5. Jarak sudut atau elongasi antarbenda langit. (Sumber: Amanda Bauer)

2.4. Metode

Metode penelitian yang digunakan adalah observasi/pengamatan terhadap fenomena alam GBT yang terjadi di lokasi pengamat berada. Dalam peristiwa GBT 31 Januari 2018, pengamatan kolaboratif dilakukan di dua tempat berbeda, yaitu di Menara Timur gedung FPMIPA-A Universitas Pendidikan Indonesia ($6^\circ 52' \text{ LS} \ \& \ 107^\circ 35' \text{ BT}$ Indonesia) dan Earth Observatory of Singapore NTU ($1^\circ 21' \text{ LU} \ \& \ 103^\circ 41' \text{ BT}$ Singapura) guna mengantisipasi kendala cuaca yang bertepatan dengan tibanya musim penghujan di masing-masing lokasi. Pada akhirnya, di kesempatan pertama GBT ini, tim pengamat di Singapura lebih beruntung daripada di Indonesia karena cuaca yang lebih bersahabat, sehingga berkesempatan untuk mengabadikan momen-momen GBT. Langit malam di kampus Universitas Pendidikan Indonesia sejak awal hingga akhir gerhana tertutup oleh awan tebal. Dengan kondisi seperti di atas, data mentah GBT 31 Januari 2018 yang diolah seluruhnya berasal dari tim pengamat di Singapura. Seluruh citra digital Bulan diperoleh menggunakan kamera Nikon CoolPix P520.

Kesempatan momen GBT yang ke-2 (28 Juli 2018) bertepatan dengan tibanya musim kering di Indonesia, yang menghadirkan langit malam sangat cerah di kota Bandung. Seluruh fase gerhana dalam GBT kali ini dapat diabadikan dari Menara Timur gedung FPMIPA-A Universitas Pendidikan Indonesia menggunakan kamera Canon EOS 1000D, yang dipasangkan sebagai pengganti lensa okuler di teleskop refraktor dengan spesifikasi $f/D = 8,82$ dan $D = 102$ mm.

Tidak seluruh citra digital yang diperoleh dalam sesi pengamatan digunakan dalam pengolahan lebih lanjut. Hanya citra digital Bulan yang terperangkap sebagian di dalam umbra Bumi dengan ekspos terbaik (ditandai dengan citra lengkungan umbra Bumi yang relatif lebih tegas) yang diolah setelah dicetak.

Dari citra dengan ekspos terbaik yang tersedia, diambil tiga sampel citra, yaitu saat Bulan terperangkap sebagian di dalam umbra Bumi pada awal dan akhir gerhana serta ketika separuh bundaran Bulan tertutup umbra. Setelah berhasil diketahui pusat bundaran Bulan dan umbra Bumi, dilakukan pengukuran radius bundaran Bulan dan umbra Bumi menggunakan mistar baja. Dengan pertimbangan penggunaan nilai rata-rata radius Bulan dan umbra Bumi dari ketiga potret Bulan di atas untuk masing-masing GBT menghasilkan perhitungan jarak Bumi – Bulan dengan galat $>15\%$ dari nilai faktualnya, maka ditetapkan hanya digunakan satu citra terbaik (dari masing-masing GBT) dengan galat terkecil. Ketidakpastian hasil perhitungan jarak Bumi – Bulan ditentukan dari nilai rata-rata (radius Bulan terukur \pm NST alat ukur) dari masing-masing citra untuk masing-masing GBT.

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 1 di bawah ini menyajikan hasil pengukuran radius bundaran Bulan dan umbra Bumi dari masing-masing potret kedua momen GBT. Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa ukuran umbra Bumi 2,3 (Bulan di *perigee*) – 2,4 (Bulan di *apogee*) kali lebih besar daripada Bulan.

Tabel 1. Radius Bulan dan umbra Bumi

GBT	Radius Bulan (cm)	Radius Umbra Bumi (cm)
31/01/18	3,8	8,7
28/07/18	5,0	12,0

Dengan bantuan perangkat lunak MoonCalc 6.0 diketahui nilai radius sudut Bulan dalam momen GBT 31 Januari 2018 sebesar $0,279^\circ$. Dari prinsip kesebandingan diperoleh diameter sudut ($= 2 \times$ radius sudut) umbra Bumi bernilai $1,278^\circ$. Dengan menyulihkan nilai-nilai di atas ke dalam Persamaan (1) diperoleh jarak Bumi – Bulan pada saat potret GBT 31 Januari 2018 dihasilkan adalah $61,71x$ radius Bumi. Dengan menggunakan nilai radius Bumi 6371 km [10], didapatkan jarak Bulan dari Bumi sejauh $(393.146,08 \pm 3658,79)$ km. Dibandingkan dengan nilai faktual (MoonCalc 6.0 memberikan jarak Bumi – Bulan $360.188,83$ km) pada saat potret diperoleh, hasil di atas memiliki galat $9,15\%$.

Prosedur yang sama diulangi untuk citra dari momen GBT 28 Juli 2018. Dengan radius sudut Bulan yang lebih kecil, yaitu $0,249^\circ$, diperoleh diameter sudut umbra Bumi sebesar $1,195^\circ$. Jarak Bumi – Bulan pada saat potret dihasilkan adalah $66,94x$ radius Bumi atau setara dengan $(426.502,76 \pm 3055,61)$ km. Dibandingkan dengan jarak faktual sebesar $406.089,36$ km, galat yang dihasilkan adalah $5,03\%$.

Penentuan jarak Bumi – Bulan memanfaatkan momen GBT yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa pengolahan potret gerhana dengan pendekatan geometri (sejauh dilakukan dengan sangat teliti) dapat menghasilkan nilai jarak dengan galat $< 10\%$. Hasil yang diperoleh dari pengamatan GBT 28 Juli 2018 juga relatif lebih baik daripada pengamatan GBT 31 Januari 2018. Kesulitan terbesar yang dirasakan dalam mengolah potret Bulan tercetak saat berada di dalam umbra Bumi adalah mengenali batas persinggungan umbra dengan bundaran Bulan, karena dalam citra digital yang dihasilkan tidak selalu diperoleh batas umbra Bumi yang tegas. Penentuan persinggungan ini secara lebih akurat dapat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak pengolah citra yang memiliki fitur pengenalan gradasi warna. Dengan bantuan perangkat lunak dapat dikenali dengan mudah piksel-piksel yang memiliki intensitas warna lebih pekat untuk ditetapkan sebagai batas umbra Bumi.

Pengetahuan dasar geometri dan kegiatan praktikum observasi langit siang maupun malam diajarkan dan dapat diakomodasi di dalam perkuliahan Ilmu Pengetahuan Bumi dan Antariksa (IPBA). Kegiatan seperti yang

disajikan dalam artikel ini dapat dijadikan alternatif aktivitas laboratorium untuk mahasiswa peserta perkuliahan di atas.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dua peristiwa GBT yang telah dilakukan, diperoleh jarak Bumi – Bulan pada saat GBT 31 Januari 2018 adalah $61,71x$ radius Bumi atau sejarak $(393.146,08 \pm 3658,79)$ km. Sementara itu, pengamatan GBT 28 Juli 2018 memperoleh hasil $66,94x$ radius Bumi atau setara dengan $(426.502,76 \pm 3055,61)$ km. Kedua jarak Bumi – Bulan di atas memiliki galat masing-masing sebesar 9,15% dan 5,03% bila dibandingkan dengan nilai faktual pada saat potret dihasilkan.

5. Referensi

- [1] Gutzwiller, M.C. (1998). Moon – Earth – Sun: The oldest three-body problem. *Reviews of Modern Physics*, 70: 589.
- [2] Beech, M. (2008). In the Shadow of Aristarchus and the Lunar Eclipse of 2008 February 20. *Journal of Royal Astronomical Society of Canada*, 102: 98.
- [3] William, S. dan Westfall, J. (2004). *The Transit of Venus*. Amherst, N.Y.: Prometheus Books, hal. 27 – 28, ISBN: 1 – 59102 – 175 – 8.
- [4] van Helden, A. (1986). *Measuring the Universe: Cosmic Dimensions from Aristarchus to Halley*. Chicago: University of Chicago Press, hal. 16, ISBN: 0 – 226 – 84882 – 5.
- [5] Murphy, T.W. (2013). *Lunar Laser Ranging: The millimeter challenge*. *Reports on Progress in Physics*, 76: 1.
- [6] Yapple, B.S., Knowles, S.H., Shapiro, A. dan Craig, K.J. (1965). The Mean Distance to the Moon as Determined by RADAR. *IAU Symposium*, 21: 6.
- [7] Williams, J.G., Newhall, X.X., dan Dickey, J.O. (1996). Relativity Parameters Determined from Lunar Laser Ranging. *Physical Review D*, 53: 6730.
- [8] Shuch, H.P. (1991). Measuring the Mass of the Earth: The ultimate moonbounce experiment. *Proceedings 25th Conference of the Central States VHF Society, American Radio Relay League*, 25 – 30.
- [9] Fischer, I. (1962). Parallax of the Moon in Terms of a World Geodetic System. *The Astronomical Journal*, 67: 373.
- [10] <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>. Diakses pada 5 Desember 2018