

Bab V

Asteroid 99942 Apophis Berpotensi Menabrak Bumi?

Thasman Aditya Singh, Praza Gumilang Kembaren,
David Maulana Raihan, dan Christian Vieri

A. Asteroid Dekat Bumi

Objek-objek di tata surya kita selain planet terdapat juga asteroid dalam berbagai bentuk dan ukuran. Asteroid merupakan objek berbatu yang mengorbit matahari, lebih kecil dari planet terkecil, tetapi lebih besar dari meteoroid (bakal meteor). Asteroid pada umumnya memiliki bentuk yang tidak beraturan karena tidak memiliki gravitasi yang cukup untuk membentuknya menjadi bola. Selain itu, pada dasarnya asteroid memiliki orbit yang cenderung tetap, seperti halnya planet.

Asteroid dapat dianggap sebagai blok penyusun planet (kadang-kadang disebut planetoid atau planet minor). Masih belum jelas mengapa objek-objek di sabuk asteroid (atau sabuk Kuiper) tidak terbentuk menjadi planet, meskipun gravitasi Jupiter diperkirakan memainkan peran penting dalam mengubah orbitnya. Terlepas dari

T. A. Singh, P. G. Kembaren, D. M. Raihan & C. Vieri.

*Institut Teknologi Sumatera (ITERA), e-mail: singhthasman@gmail.com

© 2025 Editor & Penulis

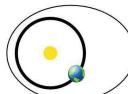
Singh, T. A., Kembaren, P. G., Raihan, D. M. & Vieri, C. Asteroid 99942 Apophis Berpotensi Menabrak Bumi?. Dalam T. Djamaruddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (147–179). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1488
E-ISBN: 978-602-6303-86-8

ukurannya, objek-objek ini cenderung tetap berada di orbitnya, jauh dari Bumi. Namun, terkadang, asteroid dan komet didorong oleh gravitasi planet-planet di dekatnya ke orbit yang lebih dekat dengan matahari, sehingga menjadi objek yang mengorbit dekat dengan Bumi. Asteroid yang ‘terdorong’ ini merupakan sebagian kecil dari semua asteroid di tata surya, tetapi jumlahnya cukup banyak. Beberapa asteroid tersebut kemudian dapat menjadi ancaman dan berpotensi menabrak Bumi kita.

Near Earth Asteroid (NEA) atau Asteroid Dekat Bumi merupakan istilah untuk asteroid dengan jarak perihelion $q < 1.3$ Astronomi. Satuan Astronomi adalah satuan jarak di tata surya, yaitu jarak rata-rata bumi-matahari, sekitar 150 juta km. Orbit NEA umumnya tidak stabil dikarenakan sering berpapasan dekat dengan planet di bagian dalam tata surya. Orbitnya tersebar hingga sabuk asteroid utama, di antara planet Mars dan Jupiter. NEA dibagi menjadi beberapa kelompok berdasarkan jarak perihelion (q), jarak aphelion (Q), dan sumbu semimayor (a) seperti terlihat dalam Gambar 5.1.

Amors

Earth-approaching NEAs with orbits exterior to Earth's but interior to Mars' (named after asteroid (1221) Amor)



$a > 1.0$ AU
 $1.017 \text{ AU} < q < 1.3 \text{ AU}$

Apollos

Earth-crossing NEAs with semi-major axes larger than Earth's (named after asteroid (1862) Apollo)



$a > 1.0$ AU
 $q < 1.017 \text{ AU}$

Atens

Earth-crossing NEAs with semi-major axes smaller than Earth's (named after asteroid (2062) Aten)



$a < 1.0$ AU
 $Q > 0.983 \text{ AU}$

Atiras

NEAs whose orbits are contained entirely within the orbit of the Earth (named after asteroid (163693) Atира)



$a < 1.0$ AU
 $Q < 0.983 \text{ AU}$

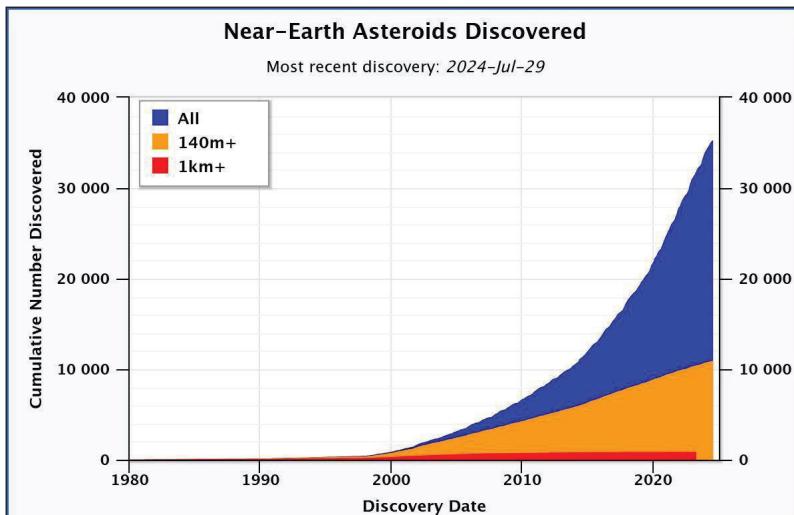
(q = perihelion distance, Q = aphelion distance, a = semi-major axis)

Sumber: NEO Basics (NASA JPL, 2024)

Gambar 5.1 Kelompok Asteroid Dekat Bumi

Grup Apollo, Asteroid Dekat Bumi dengan sumbu semimayor $a > 1.0$ sa dan jarak perihelion $q < 1.017$ sa. Grup Apollo merupakan asteroid tipe *Earth-crossing* dan dinamakan merujuk asteroid 1862 Apollo (asteroid pertama dengan orbit yang memotong orbit Bumi). Hingga Juli 2024, telah diidentifikasi sebanyak 19.975 asteroid dengan tipe Apollo. Beberapa anggota asteroid dari grup ini adalah: 101955 Bennu, 25143 Itokawa, dan 4179 Toutatis. Grup Amor merupakan Asteroid Dekat Bumi dengan sumbu semimayor $a > 1.0$ sa dan jarak perihelion 1.017 sa $< q < 1.3$ sa. Grup Amor merupakan asteroid tipe *Earth-approaching* dan dinamakan merujuk asteroid 1221 Amor. Hingga Juli 2024, sebanyak 12461 asteroid tipe Amor telah ditemukan. Beberapa asteroid dari grup ini adalah: 433 Eros, 719 Albert, dan 887 Alinda. Grup Aten adalah asteroid dengan sumbu semimayor $a > 1.0$ SA dan jarak aphelion $Q > 0.983$ sa. Grup Aten bertipe *Earth-crossing*, dinamakan merujuk asteroid 2062 Aten. Sebanyak 2800 asteroid telah diklasifikasikan sebagai grup Aten. Beberapa asteroid dari grup ini adalah: 3753 Cruithne, 524522 Zoozve, dan 99942 Apophis. Grup Atira (dinamakan merujuk asteroid 163693 Atira), asteroid dengan dengan sumbu semimayor $a < 1.0$ sa dan jarak aphelion $Q < 0.983$ sa. Orbit dari grup ini seluruhnya berada di dalam orbit Bumi. Hingga Juli 2024, sebanyak 32 asteroid telah diklasifikasikan sebagai tipe Atira. Beberapa asteroid dari grup ini adalah: 594913 'Aylo'chaxnim, 1998 DK36, dan 2023 WK3. Dalam Gambar 5.2 terlihat adanya peningkatan jumlah kumulatif penemuan Asteroid Dekat Bumi selama 25 tahun terakhir.

Potentially Hazardous Asteroids atau Asteroid Berpotensi Berbahaya (ABB) merupakan asteroid yang berpotensi mengancam Bumi saat berpapasan dekat. ABB didefinisikan sebagai asteroid dengan Jarak Minimum Perpotongan Orbit (MOID) ≤ 0.05 sa ($\leq 7.480.000$ km) dan memiliki magnitudo mutlak (H) ≤ 22 atau asteroid dengan diameter ≥ 140 m (NASA JPL, 2024b). Hingga 14 Juli 2024, sebanyak 35.268 NEA telah ditemukan dengan rincian 12461 tipe Amor, 19975 tipe Apollo, 2800 tipe Aten, dan 32 tipe Atira. Selain itu sebanyak 2422 PHA telah teridentifikasi (NASA JPL, 2024).



Keterangan: Warna merah menunjukkan asteroid berukuran 1 km atau lebih. Warna biru menunjukkan asteroid berukuran 140 meter atau lebih.

Sumber: NASA JPL (2024)

Gambar 5.2 Jumlah kumulatif penemuan Asteroid Dekat Bumi.

NEA penting untuk dipelajari karena sampel NEA memberikan informasi dan petunjuk tentang era pembentukan tata surya. Selain itu, NEA diyakini sebagai bagian dari populasi planetesimal yang masih bertahan sejak tahap awal pembentukan tata surya. Pertama, NEA diyakini sebagai bagian dari populasi planetesimal yang masih bertahan sejak tahap awal pembentukan tata surya. Kedua, NEA penting untuk dipelajari karena berpotensi memberikan dampak signifikan terhadap kehidupan di Bumi, contohnya dalam kasus tabrakan dengan Bumi yang dapat menyebabkan kepunahan besar. Oleh karena itu, informasi tentang NEA ini penting untuk menjadi bahan mitigasi di masa yang akan datang. Ketiga, hasil pembelajaran tentang NEA bisa memberi peluang bagi manusia untuk eksplorasi dan eksploitasi material NEA (*astromining*). Terakhir, NEA penting untuk dipelajari karena merupakan objek yang paling mudah untuk diakses di tata surya (Nolan et al., 2021).

Jatuhnya asteroid ke Bumi dapat menimbulkan kerusakan yang masif berskala global, contohnya peristiwa Chicxulub yang diperkirakan terjadi sekitar 66 juta tahun lalu. Peristiwa tersebut diyakini menjadi penyebab kepunahan dinosaurus dan perubahan iklim global (Rachman, 2015). Di Indonesia sendiri, pada tanggal 8 Oktober 2009, sebuah asteroid kecil yang diperkirakan berdiameter dari 5 hingga 10 meter memasuki lapisan atmosfer bumi dan meledak di atas perairan Teluk Bone, Sulawesi Selatan. Peristiwa ini dikenal sebagai “Ledakan Asteroid Bone” (Rachman, 2010). Peristiwa jatuhnya meteorit terbaru terjadi pada tanggal 28 Januari 2021. Sebuah meteorit jatuh di Punggur, Lampung Tengah. Peristiwa ini menghebohkan warga sekitar karena menimbulkan suara dentuman keras dan kerusakan pada beberapa rumah (Harbowo et al., 2021).

B. Asteroid 99942 Apophis

Asteroid 99942 Apophis merupakan sebuah asteroid pelintas bumi dari kelompok Aten atau Apollo. Asteroid ini telah menarik perhatian astronom dan masyarakat umum sejak penemuannya pada tanggal 19 Juni 2004 oleh para astronom di Kitt Peak National Observatory. Asteroid ini memiliki diameter sekitar 370 meter (Gambar 5.3) dan telah diidentifikasi sebagai salah satu asteroid yang berpotensi untuk menimbulkan ancaman (Valvano et al., 2021) karena berisiko mengalami tabrakan dengan Bumi (Bancelin et al., 2012; Pérez-Hernández & Benet, 2022). Dengan ukurannya yang cukup besar, tabrakan Apophis dengan Bumi memiliki potensi dampak besar dan menjadi ancaman terhadap kehidupan manusia dan ekosistem Bumi. Pada tahun 2004, asteroid ini sempat menimbulkan kekhawatiran besar karena memiliki kemungkinan 2,7% untuk menghantam Bumi pada tahun 2029 (Müller et al., 2014). Meskipun kemungkinan tabrakan pada tahun 2029 telah dieliminasi, asteroid ini masih memiliki kemungkinan tabrakan pada tahun-tahun mendatang, seperti pada tahun 2036 dan 2068 (Pérez-Hernández & Benet, 2022). Untuk prediksi yang lebih akurat, dibutuhkan pemahaman yang lebih baik mengenai perilaku dari orbit pergerakan Apophis untuk dapat mengembangkan strategi mitigasi dan perlindungan terhadap Bumi.



Sumber: ESA (2024)

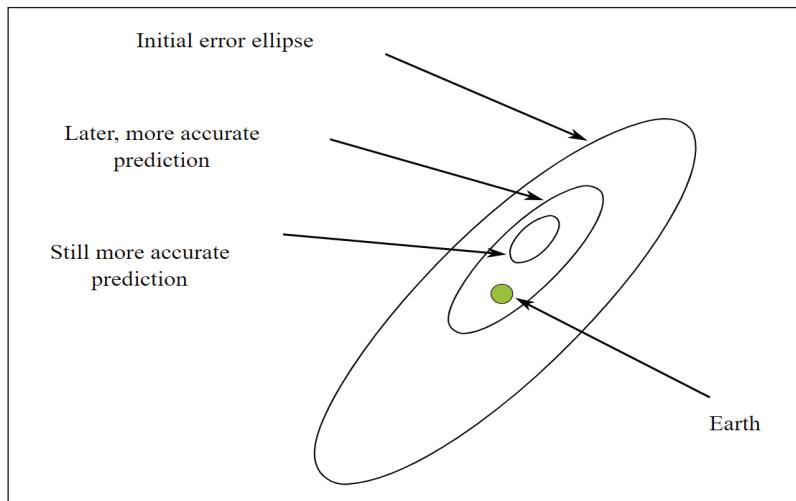
Gambar 5.3 Ilustrasi asteroid 99942 Apophis.

Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan astronom untuk memahami dan memprediksi potensi ancaman yang ditimbulkan oleh Apophis, di antaranya simulasi N-Benda. Simulasi tersebut sangat berguna untuk mendapatkan model lintasan dari asteroid di masa depan. Dengan melibatkan faktor seperti gaya gravitasi dan massa, simulasi ini dapat memprediksi kemungkinan tabrakan asteroid dengan Bumi. Informasi tersebut sangat penting untuk mengembangkan strategi mitigasi yang efektif, seperti misi defleksi asteroid atau sistem peringatan dini.

Pada bab ini penulis menjelaskan model simulasi N-benda lintasan asteroid 99942 Apophis selama rentang waktu integrasi, yakni sekitar 100 tahun ke depan, dan memprediksi lintasan orbit yang akan berpapasan dengan Bumi. Simulasi ini dilakukan untuk memahami dinamika orbit asteroid dan memperkirakan jarak papasan dengan Bumi (Dotson et al., 2022). Dalam proses pemodelannya, dilakukan simulasi dengan menghitung elemen-elemen orbit dan jarak terhadap Bumi. Luaran yang dihasilkan berupa visualisasi data elemen orbit,

data papasan dekat, dan plot evolusi orbit. Dengan demikian, hasil dari simulasi ini diharapkan dapat memberikan manfaat terkait pemahaman yang lebih baik tentang ancaman yang mungkin ditimbulkan oleh Apophis dan menyumbangkan wawasan yang berguna bagi upaya mitigasi risiko yang terkait dengan asteroid yang berpotensi berbahaya bagi Bumi.

Simulasi model lintasan asteroid digambarkan sebagai diagram orbit dan elips eror yang memberikan gambaran visual tentang lintasan asteroid telah berubah dari waktu ke waktu. Salah satu elips yang digambarkan mewakili lintasan asteroid di masa lalu dan elips lainnya menggambarkan variasi potensial jalur orbit yang diprediksi. Variasi ini diperlukan untuk menggambarkan ruang lingkup kemungkinan asteroid berada pada titik waktu tertentu dengan mempertimbangkan nilai eror atau ketidakpastian di dalamnya. Ketidakpastian tersebut muncul karena adanya keterbatasan data pengamatan. Gambar 5.4 menunjukkan bentuk lintasan orbit asteroid 99942 Apophis beserta tiga elips eror yang menggambarkan prediksi orbitnya di masa lalu.



Sumber: Academic Dictionaries and Encyclopedias (2024)

Gambar 5.4 Koreksi eror bentuk orbit

Seiring dengan bertambahnya jumlah pengamatan dan peningkatan teknologi, ketidakpastian dalam prediksi lintasan Apophis telah berkurang secara signifikan. Saat ini, lintasan Apophis diperkirakan akan sangat berdekatan dengan Bumi pada tanggal 13 April 2029, tetapi tidak ada risiko tabrakan pada tanggal tersebut. Namun, papasan dekat ini tetap menjadi subjek studi intensif karena gaya gravitasi Bumi dapat mengubah orbit Apophis di masa depan, sehingga dilakukan pengamatan secara kontinu untuk dapat meningkatkan akurasi prediksi astronomi.

Ketika Apophis pertama kali diamati, elips erornya sangat besar, menunjukkan ketidakpastian yang tinggi. Dalam prediksi orbit awalnya diperkirakan memiliki peluang besar untuk berdampak pada Bumi pada tahun 2029, dengan probabilitas sekitar 2,7%. Prediksi ini menempatkan Apophis pada level 4 pada Skala Bahaya Dampak Torino, peringkat tertinggi yang pernah diberikan pada saat itu (NASA, 2024).

Prediksi selanjutnya yang dilakukan tahun 2005–2006 dengan pengamatan tambahan, para ilmuwan mampu menyempurnakan orbit Apophis. Pada prediksi tersebut, kemungkinan dampak pada tahun 2029 telah dikesampingkan. Namun, masih ada kekhawatiran mengenai kemungkinan dampak pada tahun 2036 jika Apophis melewati “lintasan orbit bergravitasi” tertentu selama pendekatan jarak dekat pada tahun 2029 (ESA, 2021). Pada tahun 2006 para astronom berpendapat ada kemungkinan melewati orbit papasan dengan Bumi pada tahun 2029 dengan erornya berkurang menjadi angka yang sangat kecil dan peringkat Skala Torino Apophis diturunkan menjadi nol. Pada tahun 2008, studi terperinci telah mempersempit lintasan orbit menjadi kurang dari 1 km lebarnya. Tahun 2013–2015 dilakukan pengamatan lanjutan selama beberapa tahun berikutnya dan menghasilkan data yang lebih akurat, sehingga elips eror menjadi lebih kecil. Prediksi kemungkinan tabrakan pada saat tahun 2029 diturunkan menjadi 1 dalam 250.000. Dengan bantuan pengamatan radar, terjadi penyempurnaan lintasan Apophis, sehingga secara efektif mengesampingkan segala kemungkinan dampak pada Bumi pada tahun 2036 (Morelli et al., 2024).

Pengamatan kembali dilakukan pada tahun 2020 dengan menggunakan Teleskop Subaru dan mampu mengkonfirmasi efek Yarkovsky pada Apophis, yang sedikit mengubah orbitnya karena gaya termal. Kemudian pada bulan Maret 2021, pengamatan radar maupun optik menggunakan antena Goldstone Deep Space Communications Complex dan Teleskop Subaru di Hawaii memberikan data yang sangat akurat mengenai jarak dan orbit Apophis, sehingga para astronom berpendapat tidak ada risiko tabrakan setidaknya selama 100 tahun ke depan terhadap Bumi karena semakin mempersempit elips eror dan meningkatkan presisi prediksi orbit Apophis (NASA, 2021).

Prediksi terbaru, yang didasarkan pada data pengamatan hingga tahun 2023, menunjukkan kemungkinan tabrakan yang sangat kecil pada tahun 2068, yaitu 1 dalam 100.000. Elips eror pada prediksi ini pun jauh lebih kecil dibandingkan dengan prediksi awal tahun 2004. Pada 13 April 2029, Apophis akan melintas sangat berdekatan dengan Bumi, pada jarak yang diperkirakan sekitar 31.000 km. Pengamatan dari jarak dekat ini akan memberikan data tambahan yang sangat berguna untuk lebih menyempurnakan pemahaman kita tentang orbit Apophis. Hal ini menghasilkan kesimpulan bahwa tidak ada risiko dampak pada tahun 2029, 2036, atau 2068 (NASA, 2021).

C. Analisis Perubahan Orbit Apophis

Prediksi lintasan Apophis masih terus dilakukan para astronom mengingat adanya beberapa faktor yang dapat mengubah lintasan asteroid di tata surya. Untuk pemuktahiran prediksi lintasan Apophis, penulis pun melakukan perhitungan tersendiri berdasarkan data *Jet Propulsion Laboratory Small Bodies Database Lookup* (JPL-SBDL) dan *NASA Horizons System* untuk memprediksi kemungkinan papasan asteroid Apophis dengan Bumi di masa depan dengan menggunakan simulasi N-Benda. Dalam proses simulasi, gaya-gaya non-gravitasional seperti efek Yarkovsky dan gaya tekanan radiasi tidak turut diperhitungkan, sehingga hasil yang didapatkan merupakan dinamika elemen orbit tanpa efek tersebut.

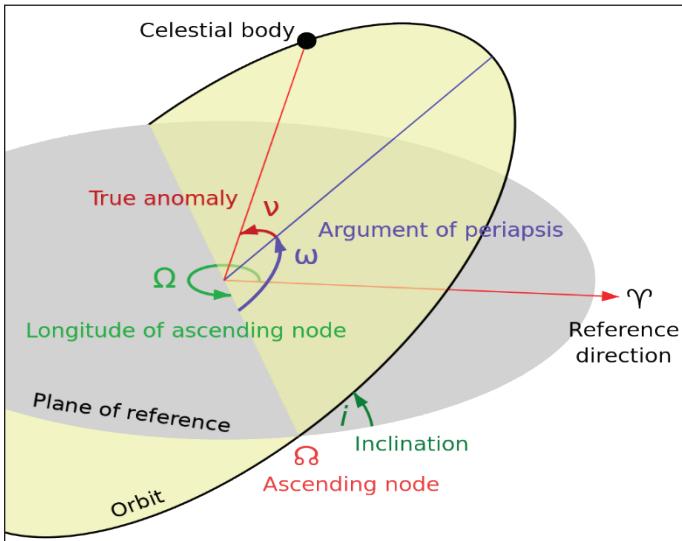
Dalam penggunaan data dari JPL-SBDL, elemen orbit seperti eksentrisitas, sumbu semi mayor, inklinasi, sudut nodal naik, argumen periapsis, dan anomali rata-rata digunakan untuk menggambarkan orbit objek tersebut. Sementara itu, data tambahan dari *NASA Horizons System* memperluas *dataset* dengan menambahkan objek-objek baru yang dapat dijadikan objek simulasi dalam riset. Proses pengumpulan data ini menjadi langkah awal yang penting dalam mengembangkan model simulasi dan menghasilkan model yang akurat untuk memprediksi kemungkinan papasan asteroid di masa depan. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang potensi ancaman asteroid terhadap Bumi, upaya mitigasi dapat diambil untuk mengurangi risiko dampaknya.

Perhitungan orbit dilakukan dengan menggunakan persamaan dasar sebagai berikut.

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = - \sum_{i,j=1; j \neq i}^n \frac{Gm_j(x_i - x_j)}{|x_i - x_j|^3}$$

Perhitungan pada dinamika orbit mengambil bentuk masalah dari N-benda ($i, j = 1, \dots, N$) yang masing-masingnya mempunyai $\frac{d^2x_i}{dt^2}$: Ini adalah akselerasi benda ke- i . Akselerasi adalah laju waktu perubahan kecepatan. G merupakan konstanta gravitasi universal, yang nilainya sekitar $6.67430 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$; m_j adalah massa sistem ke- j ; serta x_i dan x_j adalah vektor posisi ke i dan j . Vektor ini memiliki tiga komponen, yaitu x_i , y_i , dan z_i (Dermawan et al., 2010).

Untuk dapat menjalankan persamaan tersebut, diperhitungkan elemen orbital seperti anomali sejati, argumen perihelion, bujur node, inklinasi, eksentrisitas, dan beberapa elemen lainnya. Gambar 5.5 menggambarkan diagram orbit suatu benda langit, dalam hal ini planet atau asteroid yang mengorbit matahari. Orbitnya diwakili oleh elips, dengan matahari terletak di salah satu fokus elips. Diagram ini juga mencakup berbagai elemen orbital yang menentukan bentuk dan orientasi orbit (Dermawan et al., 2010). Anomali Sejati (θ) merupakan sudut antara perihelion (titik terdekat dengan matahari) dan posisi



Sumber: University of Pisa (2022)

Gambar 5.5 Elemen orbit

benda langit saat ini. Hal tersebut mewakili pergerakan benda langit sepanjang orbitnya. Argumen Perihelion (ω) adalah sudut antara titik menaik (titik perpotongan benda langit dengan bidang referensi yang bergerak ke utara) dan perihelion. Hal ini menunjukkan orientasi sumbu utama elips relatif terhadap bidang referensi. Bujur Node Menaik (Ω) adalah sudut antara meridian referensi (titik referensi tetap dalam ruang) dan node menaik. Ini menentukan posisi titik menaik di bola langit. Inklinasi (i) adalah sudut antara bidang orbit dan bidang ekliptika (bidang orbit bumi sebagai acuan). Ini mewakili kemiringan orbit relatif terhadap bidang ekliptika. Eksentrisitas (e) adalah ukuran bentuk suatu elips, menunjukkan seberapa jauh elips tersebut dari bentuk lingkaran sempurna. Sumbu Semimayor (a) adalah jarak terpanjang dari pusat elips ke titik terluar pada elips tersebut. Sudut nodal naik yaitu titik saat benda langit melintasi bidang ekliptika bergerak ke arah utara. Ini menandai transisi dari gerakan dari selatan ke utara. Orbit itu sendiri merupakan jalur yang diikuti benda langit saat berputar mengelilingi matahari, bentuknya

elips, dengan matahari di salah satu fokusnya. Bidang referensi, dalam hal ini digunakan bidang ekliptika, adalah bidang tetap yang digunakan untuk menggambarkan orientasi orbit. Biasanya bidang ekuator bintang atau bidang sistem benda langit (Andersson, 2018).

Elemen orbital memberikan informasi penting tentang pergerakan benda langit di sekitar benda utamanya. Mereka digunakan untuk menghitung posisi dan kecepatan benda langit pada waktu tertentu, memprediksi pergerakan masa depan, dan memahami dinamika orbitnya. Anomali sebenarnya dan argumen perihelion sangat penting untuk menentukan posisi benda langit sepanjang orbitnya dan orientasinya relatif terhadap bidang referensi. Bujur titik menaik dan kemiringannya penting untuk memahami orientasi orbit di ruang angkasa dan hubungannya dengan bidang referensi (Sánchez-Lozano & Fernández-Martínez, 2016).

Bentuk orbit elips merupakan konsekuensi interaksi gravitasi antara benda langit dan bintang. Tarikan gravitasi bintang bervariasi menurut jarak, menyebabkan benda langit bergerak lebih cepat saat mendekati bintang dan lebih lambat saat menjauh. Eksentrisitas elips, ukuran perpanjangannya, menunjukkan seberapa besar penyimpangan orbitnya dari lingkaran sempurna. Orbit yang sangat eksentrik memiliki perbedaan yang signifikan antara periapsis dan apoapsis, sedangkan orbit dekat lingkaran memiliki perbedaan yang minimal (Valvano et al., 2021). Tabel 5.1 menunjukkan nilai-nilai elemen orbit dan ketidakpastiannya untuk sebuah objek tertentu. Elemen orbit adalah parameter yang digunakan untuk menggambarkan bentuk, orientasi, dan posisi orbit suatu objek di ruang angkasa. Informasi dalam Tabel 5.1 dapat digunakan untuk mempelajari gerakan objek dan untuk memprediksi posisinya elemen orbit pada saat masa depan.

Tabel 5.1 Elemen Orbit

Elemen Orbit	Nilai Optimal	Ketidakpastian
e	0.1912907261004625	2.0934 x 10-9
a (sa)	0.922552140675628	2.7703 x 10-9
i (°)	3.339736.385186.360	1.1053 x 10-9
Ω (°)	2.039153721810.900	3.7774 x 10-6
ω (°)	1.266832.317899.630	4.101 x 10-6
M (°)	5.223188.448841.550	6.8308 x 10-7

Sumber: NASA (2024)

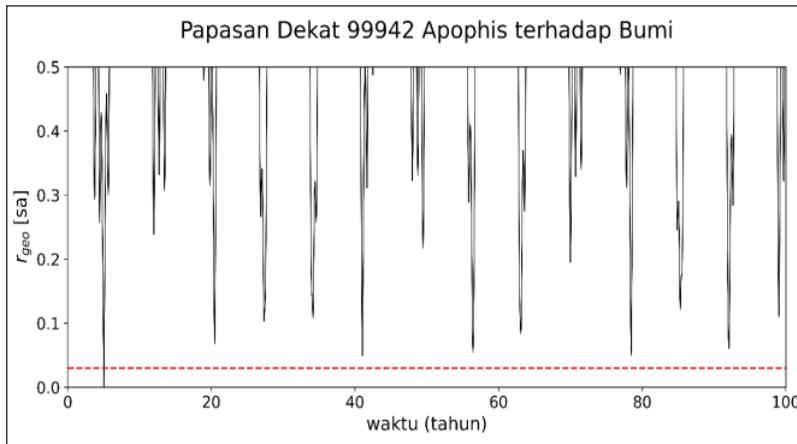
Dalam simulasi N-benda, penulis memakai komputer atau laptop yang memiliki spesifikasi menengah dengan minimal RAM 8 gigabita dan minimal prosesor yang diproduksi tahun 2021 serta dengan waktu simulasi yang dilakukan kurun waktu 10 menit. Simulasi ini efektif untuk memprediksi kemungkinan papasan 99942 Apophis dengan Bumi di masa mendatang. Langkah awal adalah memakai bahasa program python dengan website pendukung seperti *google collab* lalu memakai *library* REBOUND untuk mensimulasikan orbit asteroid tersebut dan mengumpulkan data orbital Apophis dari (JPL NASA SBDL) *Jet Propulsion Laboratory NASA Small Bodies Database Lookup* (Valvano et al., 2024). Selanjutnya, merancang model simulasi dengan memperhitungkan gaya gravitasi dan parameter yang terlibat simulasi. Beberapa parameter yang digunakan dalam simulasi ini antara lain waktu awal integrasi, integrator, *bodies*, dan interval waktu. Waktu awal integrasi (*ti*) adalah *epoch* dari elemen orbit yang tertera pada laman web JPL NASA SBDL. Integrator yang digunakan adalah IAS15. Integrator ini dipilih dikarenakan IAS15 merupakan integrator yang adaptif, artinya tidak ada langkah waktu (*time step*) yang konstan dan mampu menyesuaikan dengan peristiwa papasan dekat. *Bodies* (benda) yang dilibatkan adalah Matahari sebagai pusat sistem, delapan planet, Bulan, dan Apophis. Interval waktu integrasi adalah +100 tahun sejak waktu awal integrasi (Valvano et al., 2024). Langkah

dalam melakukan simulasi ini bertujuan untuk memprediksi lintasan asteroid di masa depan dan berpotensi risiko tabrakan dengan Bumi.

Beberapa langkah penting dalam menjalankan simulasi adalah sebagai berikut.

1. Kompilasi data elemen-elemen orbit yang meliputi Semimajor axis (a): Jarak rata-rata asteroid dari Matahari. Data tersebut diperoleh dari sumber basis data astronomi di situs website NASA.
2. Optimalisasi nilai elemen orbit asteroid. Hal ini dilakukan dengan menggunakan algoritma tertentu untuk meminimalkan perbedaan antara data observasi dan hasil simulasi. Optimasi elemen orbit ini diperlukan untuk meningkatkan akurasi simulasi.
3. Menjalankan Simulasi N-benda. Simulasi ini memperhitungkan pengaruh gravitasi dari benda-benda lain di tata surya, seperti Matahari, planet, dan asteroid lainnya. Hal ini penting untuk mendapatkan hasil simulasi yang realistik, karena orbit asteroid 99942 Apophis dapat dipengaruhi oleh gaya gravitasi dari benda-benda lain.
4. Visualisasi hasil simulasi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan grafik atau animasi untuk menunjukkan lintasan asteroid 99942 Apophis di masa depan. Visualisasi hasil simulasi ini dapat membantu para ahli untuk memahami potensi risiko tabrakan dengan Bumi.
5. Analisis.. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi potensi risiko tabrakan dengan Bumi. Analisis ini dapat mempertimbangkan berbagai faktor, seperti jarak minimum antara asteroid dan Bumi, kecepatan relatif, dan kemungkinan tabrakan.

Gambar 5.6 menunjukkan plot papasan dekat asteroid 99942 Apophis terhadap Bumi dalam kurun waktu 31 Maret 2024 hingga 31 Maret 2124. Plot tersebut merupakan jarak geosentrik Apophis terhadap waktu dalam tahun integrasi yang dibatasi pada jarak < 0.03 satuan astronomi (sa). Selama rentang waktu integrasi, ditemukan bahwa terdapat sebelas kali peristiwa papasan dekat Apophis dengan



Gambar 5.6 Plot jarak geosentrik 99942 Apophis terhadap Bumi

Bumi. Peristiwa papasan dekat yang akan terjadi selanjutnya adalah pada tanggal 13 April 2029, pada peristiwa papasan dekat ini, jarak geosentrik Apophis hanya berkisar 0.00025 sa (< 0.01 *lunar distance* atau sekitar 31,388 km dari permukaan Bumi) dan 30 Maret 2036, dengan jarak geosentrik Apophis hanya berkisar 0.2386353 sa dari permukaan Bumi. Kedua peristiwa tersebut berpontensi berpapasan dengan Bumi yang diprediksi akan terjadi.

Tabel 5.2 Data waktu dan jarak geosentrik saat peristiwa asteroid 99942 Apophis papasan dekat Bumi 100 tahun ke depan.

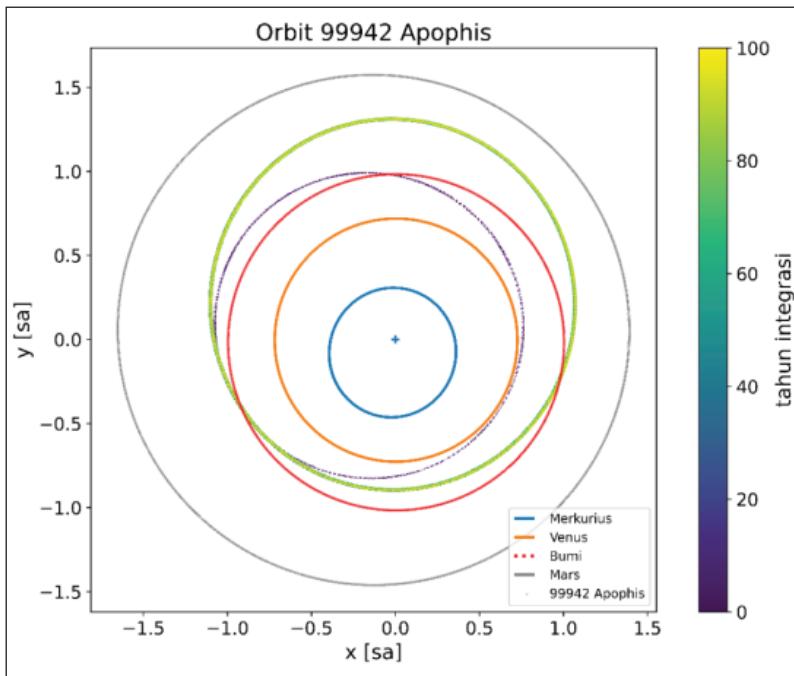
Tanggal	Jam (UTC)	Jarak (SA)
29 Desember 2027	01:29	0.2936311
12 September 2028	11:15	0.2565818
13 April 2029	20:52	0.000254
25 November 2029	11:18	0.3003569
30 Maret 2036	00:00	0.2386353
23 Desember 2036	12:26	0.3317136
26 September 2037	23:47	0.3068927
19 Maret 2043	23:23	0.4792903
20 Januari 2044	00:38	0.3152374

Tanggal	Jam (UTC)	Jarak (SA)
15 September 2044	14:21	0.0678787
13 Februari 2051	00:14	0.266497
5 Agustus 2051	19:38	0.103201
26 Mei 2058	15:04	0.10773
7 November 2058	03:25	0.257269
10 April 2065	06:49	0.04886516
2 Desember 2065	19:22	0.3108171
6 Oktober 2066	15:32	0.487051
27 Maret 2072	02:16	0.3224165
2 Januari 2073	03:53	0.3306448
23 September 2073	15:42	0.2173882
2 Februari 2080	19:17	0.2889097
4 September 2080	11:27	0.05480528
6 Mei 2087	23:28	0.08236081
14 November 2087	04:07	0.27423
1 April 2094	21:12	0.1945168
19 Desember 2094	00:53	0.3286354
29 September 2095	15:15	0.3398957
20 Maret 2101	09:04	0.4883296
21 Januari 2102	12:59	0.3111664
15 September 2102	20:37	0.04952086
21 Februari 2109	02:52	0.2457812
17 Juli 2109	13:05	0.128016
26 April 2116	01:09	0.05996463
16 November 2116	16:00	0.2836401
7 April 2123	09:39	0.110746
10 Desember 2123	03:07	0.3215404

Tabel 5.2 merupakan tabel waktu dan jarak geosentrik saat peristiwa papasan dekat Apophis selama rentang waktu integrasi selama 100 tahun ke depan. Tabel data waktu dan jarak geosentrik saat peristiwa asteroid 99942 Apophis papasan dekat dengan Bumi memberikan

informasi penting tentang orbit asteroid dan potensi bahaya yang ditimbulkannya bagi Bumi. Perlu dicatat bahwa meskipun jarak ini tergolong dekat, asteroid 99942 Apophis tidak diperkirakan akan menabrak Bumi pada tabel peristiwa-peristiwa papasan dekat di atas (khususnya pada peristiwa papasan dekat 13 April 2029 dan 30 Maret 2036). Data tersebut membantu para astronom untuk memahami dan memprediksi pergerakan asteroid Apophis di masa depan, sehingga dapat dilakukan tindakan pencegahan jika diperlukan.

Gambar 5.6 menunjukkan grafik perkiraan jarak papasan dekat asteroid 99942 Apophis terhadap Bumi dalam rentang waktu hingga 100 tahun ke depan. Grafik ini dibuat berdasarkan data pengamatan dan simulasi orbit asteroid yang dilakukan oleh para astronom. Sumbu horizontal (x) menunjukkan waktu dalam satuan tahun, sedangkan sumbu vertikal (y) menunjukkan jarak papasan dekat asteroid Apophis terhadap Bumi dalam satuan astronomi. Jarak papasan dekat didefinisikan sebagai jarak terdekat antara asteroid dan Bumi pada saat mereka berdua berada di titik terdekat dalam orbitnya masing-masing. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa asteroid Apophis akan mengalami beberapa papasan dekat dengan Bumi dalam rentang waktu jarak sekitar 36.700 kilometer. Jarak papasan dekat ini terbilang cukup dekat dalam rentang waktu 100 tahun ke depan. Papasan terdekat pertama akan terjadi pada tahun 2029, dengan jarak sekitar 31.860 kilometer. Papasan terdekat kedua akan terjadi pada tahun 2036, dengan pola orbit Apollo, para astronom meyakini bahwa kemungkinan asteroid Apophis menabrak Bumi pada saat-saat tersebut sangatlah kecil. Hal ini dikarenakan adanya efek gravitasi yang akan sedikit mengubah lintasan asteroid saat ia berada dekat dengan Bumi. Namun, para astronom tetap memantau asteroid Apophis dengan cermat untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya tabrakan di masa depan. Hal ini dilakukan dengan melakukan pengamatan terus menerus terhadap asteroid Apophis dan dengan meningkatkan akurasi model-model simulasi orbitnya.

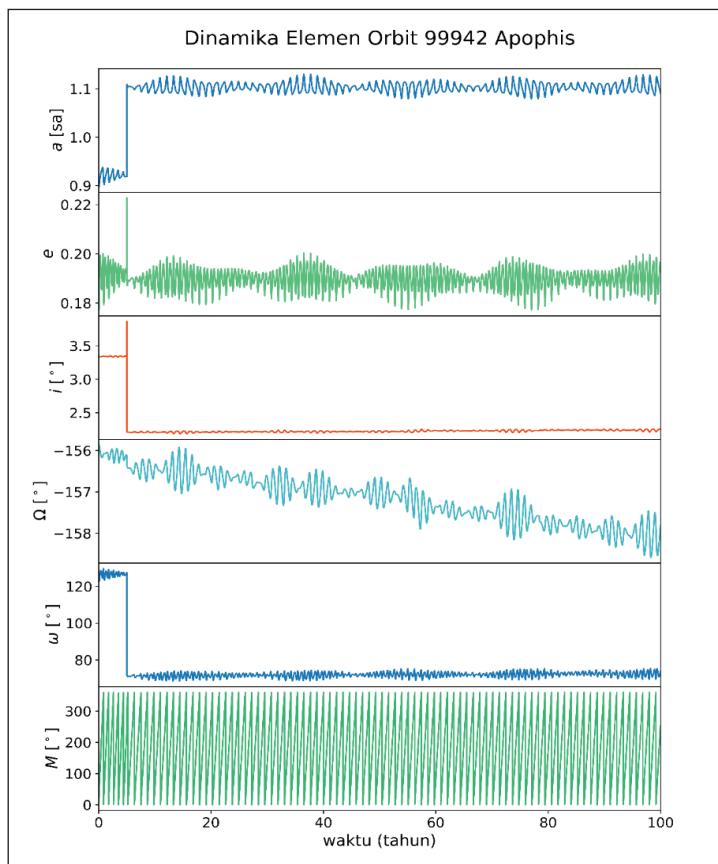


Gambar 5.7 Plot Lintasan Orbit 99942 Apophis Selama 100 Tahun.

Gambar 5.7 merupakan plot lintasan orbit Apophis (dengan gradasi warna biru hingga kuning), disertakan juga Matahari (beranda “+”), plot orbit planet Merkurius (biru), Venus (oranye), Bumi (Merah), dan Mars (abu-abu). Plot lintasan orbit asteroid 99942 Apophis ini dibuat untuk rentang waktu selama 100 tahun. Orbit asteroid ini digambarkan dalam sistem koordinat heliocentric, dengan sumbu x dan y mewakili jarak asteroid dari Matahari dalam satuan satuan astronomi (SA). Sumbu z mewakili waktu dalam satuan tahun. Pada sekitar awal waktu integrasi (sebelum peristiwa papasan dekat pada 13 April 2029), orbit Apophis *crossing* dengan planet Venus dengan tipe Aten. Setelah peristiwa papasan dekat pada 13 April 2029 dan 30 Maret 2036, orbit Apophis mengalami perubahan menjadi tipe Apollo. Gradasi warna menunjukkan waktu integrasi, serta juga menunjukkan bahwa orbit 99942 Apophis miring terhadap bidang

ekliptika sebesar 3.3 derajat. Bidang ekliptika adalah bidang yang dibentuk oleh orbit Bumi mengelilingi Matahari. Kemiringan orbit ini menunjukkan bahwa 99942 Apophis tidak bergerak di bidang yang sama dengan Bumi.

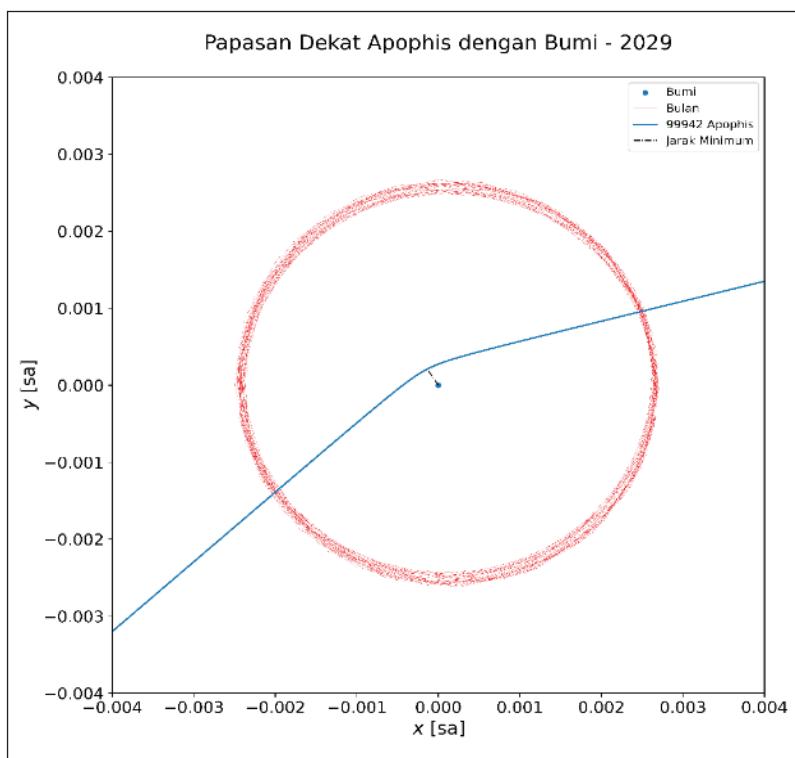
Gambar 5.8 menunjukkan eksentrisitas orbit 99942 Apophis berkisar antara 0.18 dan 0.22, yang menunjukkan bahwa orbitnya tidak terlalu eksentrik. Sumbu semimayor orbit berkisar antara 1.05



Gambar 5.8 Dinamika Elemen Orbit Asteroid 99942 Apophis Selama 100 Tahun ke Depan.

dan 1.10 sa (sebelum peristiwa papasan dekat tahun 2029 berkisar 0.92 sa), yang menunjukkan bahwa orbitnya masih berada di sekitar Bumi. Sebelum peristiwa papasan dekat 2029, inklinasi orbit 99942 Apophis berkisar antara 3.0 dan 3.5 derajat, sedangkan setelah peri-
stiwa papasan dekat, inklinasi berada pada nilai < 2.5 derajat yang menunjukkan bahwa orbitnya tidak terlalu miring terhadap bidang ekliptika. Bujur node naik Ω berkisar antara -167.5 hingga -157.5 derajat dan juga pada argumen perihelion ω berkisar antara 120 dan 300 derajat.

Gambar 5.9 menunjukkan area yang diperbesar pada orbit Apophis dan Bumi di sekitar titik terdekat mereka pada tahun 2029.



Gambar 5.9 Papasan Dekat Apophis dengan Bumi Tahun 2029.



Sumber: Ershkov & Russian (2021)

Gambar 5.10 Hasil Prediksi Proyeksi pada Permukaan Bumi Lintasan Orbit Asteroid 99942 Apophis pada Tanggal 13 April 2029.

Jarak minimum antara Apophis dan Bumi pada tahun 2029 adalah 31,000 kilometer. Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa Apophis akan melewati Bumi pada 13 April 2029. Gambar 5.10 menunjukkan proyeksi lintasan asteroid Apophis berupa titik-titik merah pada saat asteroid melintas dekat bumi pada 13 April 2029.

Dalam skenario yang paling optimis (tidak terdapat dampak langsung Apophis ke permukaan Bumi), Apophis akan melewati permukaan Bumi dengan jarak relatif dekat, sekitar 500 kilometeran. Jika kita juga memperhitungkan lintasan awal, Apophis akan melintasi Ural Selatan yang terletak di wilayah Federasi Rusia (Gambar 5.11). Hal ini berarti kemungkinan interaksi Apophis dengan atmosfer bagian atas dengan kepadatan yang cukup akan menyebabkan ledakan seperti peristiwa Tunguska pada tahun 1908. Skenario terakhir harus dievaluasi sebagai bencana bagi wilayah Ural dan Kazakstan, meskipun kita tidak dapat mengesampingkan skenario sederhana untuk menghasilkan gelombang kejut oleh ledakan (tanpa dampak panas ekstra ke wilayah lokal di dalamnya wilayah yang disebutkan pada Gambar 5.11 sebagai akibat dari ledakan asteroid) (Ershkov & Russian, 2021).



Sumber: Guo et al. (2018)

Gambar 5.11 Lintasan orbit asteroid 99942 apophis 13 Maret 2036.

Dapat di lihat pada Gambar 5.11, adanya jalur yang berisiko akibat dampak yang ditimbulkan oleh Apophis di Belahan Bumi Utara. Titik awal di bagian barat (area A_9) terletak di dekat Omsk, Tomsk, dan Novosibirsk. Kemudian secara berurutan melewati wilayah Krasnoyarsk, Yakutia, Timur Jauh, dan Kamchatka di Rusia, dekat Kepulauan Aleutia, melintasi Pasifik Utara, Amerika Tengah (Nikaragua, Kosta Rika), Amerika Selatan (Kolombia, Venezuela), dan berakhir di Atlantik, sebelum mencapai pantai barat Afrika (dekat Dakar, area B_{10}) (Guo et al., 2018).

Analisis numerik mengindikasikan bahwa jalur yang berisiko akibat dari Apophis berada di atas sebuah bidang, dan hampir sejajar dengan bidang ekliptika pada saat tabrakan. Kami memperkirakan panjang dan lebar PoR di permukaan Bumi. Dalam hal ini, kami mengasumsikan bahwa perpotongan antara bidang PoR dan Bumi berbentuk lingkaran dengan jari-jari $RP \approx 5370$ km. Sudut pusat PoR mengelilingi Bumi $\phi \approx 4.534$ rad = 259.8 derajat, maka panjangnya $LP \approx \phi RP = 24.347$ km. Lebar PoR dihitung secara numerik sesuai dengan koordinat titik tumbukan pada arah normal ke sumbu longitudinal PoR. Lebar area A_0 diperkirakan sekitar 27 km. Untuk A_i dan B_i

($i \geq 1$), lebarnya sekitar 10–22 km. Secara rata-rata, lebar PoR adalah sekitar 20 km. Perhatikan bahwa dalam, diperkirakan sebesar 30–50 km (Guo et al., 2018).

D. Penilaian Risiko Tabrakan

Selama bertahun-tahun, beberapa model risiko dan probabilitas dampak bahaya telah dikembangkan untuk mengukur kemungkinan, tingkat keparahan, dan dampak. Hal itu didasarkan pada berbagai variabel seperti kecepatan, massa, medan magnet, dan lain-lain. Sebagai alternatif, skala penilaian risiko dan dampak bahaya digunakan untuk menilai tingkat keparahan tumbukan berdasarkan parameter probabilistik dan kinetika yang dihitung, menggabungkan potensi kerusakan menjadi satu nilai pada skala integer. Skala penilaian risiko yang sering digunakan di antaranya Skala Torino dan Skala Teknis Palermo (*Palermo Technical Impact Hazard Scale*).

Skala Torino memberikan klasifikasi risiko dampak yang terkait dengan objek luar angkasa NEO (Near Earth Objects), termasuk asteroid dan komet. Tujuannya adalah untuk menunjukkan kepada publik keseriusan dalam memprediksi tabrakan benda-benda kecil di tata surya. Skala ini menggabungkan faktor probabilitas dan potensi kerusakan dari sebuah tabrakan, yang diekspresikan dalam bentuk nilai numerik.

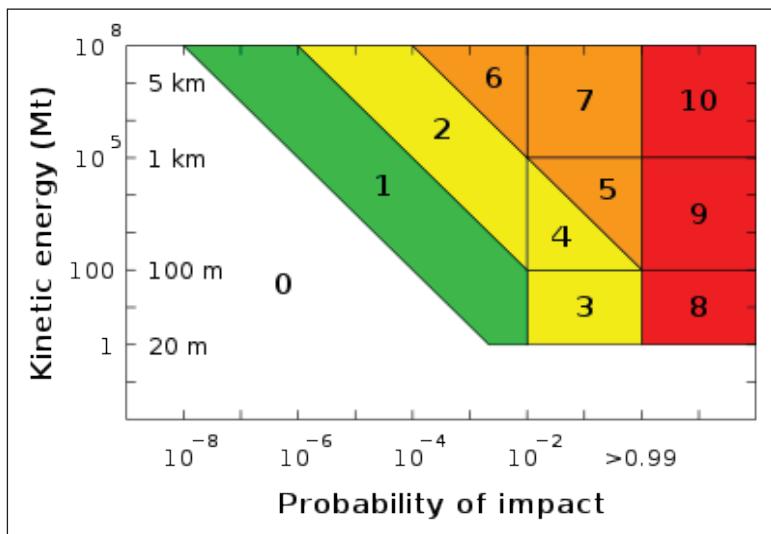
Tabel 5.3 Skala Torino

Kategori	Skala	Deskripsi
Tidak Berbahaya (Zona Putih)	0	Peluang tabrakan yang mendekati nol. Benda-benda kecil seperti meteor akan terbakar saat memasuki atmosfer Bumi. Kejadian hujan meteor yang tidak menimbulkan bencana termasuk dalam kategori ini.
Normal (Zona Hijau)	1	Peristiwa rutin saat objek melintasi orbit bumi dan diperkirakan tidak menimbulkan bahaya termasuk dalam kategori ini. Berdasarkan perhitungan sementara, probabilitas tumbukan sangat kecil sehingga tidak perlu dipublikasikan. Kategori ini bisa diturunkan ke level nol jika ada observasi terbaru yang mengonfirmasi.

Kategori	Skala	Deskripsi
Perlu perhatian astronom (Zona Kuning)	2	Penemuan objek yang berpotensi menjadi rutin dengan memperluas pencarian. Meskipun begitu, kemungkinan tabrakan tetap sangat kecil. Observasi terbaru mungkin dapat menurunkan tingkat bahaya ke level nol.
	3	Perhitungan sementara menunjukkan bahwa kemungkinan tabrakan adalah 1% atau lebih, yang dapat menyebabkan kerusakan di wilayah tertentu di Bumi. Observasi terbaru mungkin dapat menurunkan tingkat bahaya ke level nol. Publik perlu diberitahu jika tabrakan diperkirakan akan terjadi dalam waktu kurang dari satu dekade.
	4	Perhitungan sementara menunjukkan bahwa kemungkinan tabrakan adalah 1% atau lebih, yang dapat menyebabkan kerusakan di beberapa wilayah di Bumi. Observasi terbaru mungkin dapat menurunkan tingkat bahaya ke level nol. Publik perlu diberitahu jika tabrakan diperkirakan akan terjadi dalam waktu kurang dari satu dekade.
Membahayakan (Zona Oranye)	5	Meskipun menimbulkan ancaman serius, belum pasti akan menyebabkan kerusakan di bagian bumi tertentu. Perhatian astronom diperlukan untuk menentukan apakah akan terjadi tabrakan atau tidak. Jika tabrakan diperkirakan terjadi dalam waktu kurang dari satu dekade, rencana darurat harus segera disiapkan.
	6	Penemuan objek besar yang menimbulkan ancaman serius, meskipun belum tentu menyebabkan kehancuran global. Rencana darurat perlu disiapkan jika tabrakan diperkirakan akan terjadi dalam waktu kurang dari tiga decade.
	7	Objek besar akan mendekati orbit bumi dengan jarak yang sangat dekat. Rencana darurat internasional harus disiapkan untuk ancaman dalam 100 tahun mendatang.

Kategori	Skala	Deskripsi
Tabrakan (Zona Merah)	8	Tabrakan dipastikan akan terjadi, yang dapat menyebabkan kehancuran di beberapa kawasan. Peristiwa ini diperkirakan terjadi rata-rata sekali dalam 50 tahun atau sekali dalam 1000 tahun.
	9	Tabrakan dipastikan akan terjadi, yang akan mengakibatkan kehancuran regional dan tsunami besar. Peristiwa ini diperkirakan terjadi rata-rata sekali setiap 10.000 tahun atau sekali setiap 100.000 tahun
	10	Tabrakan dipastikan akan terjadi, yang akan menyebabkan kehancuran global. Peristiwa ini diperkirakan terjadi rata-rata sekali setiap 100.000 tahun.

Sumber: Siregar (2017)



Sumber: Johnson et al. (2023)

Gambar 5.12 Skala Torino

Skala Torino saat ini diakui sebagai standar emas dalam penilaian risiko bahaya karena kesederhanaan dan aksesibilitasnya bagi anggota masyarakat umum. Dengan sistem kode warna yang mudah diguna-

kan, tingkat kerusakan dan seriusnya dampak dapat dengan jelas dikomunikasikan untuk membantu dalam respons ilmiah, evakuasi, dan tanggapan masyarakat yang lebih luas. Probabilitas tumbukan dan perkiraan energi kinetik keduanya merupakan variabel penting dalam Skala Torino, sehingga parameter lain tidak diterapkan. Ini berarti prediksi dampak bersifat satu dimensi dan tidak mempertimbangkan faktor-faktor lain seperti parameter orbital dan properti lain dari objek dekat Bumi (NEO) (Satpathy et al., 2022).

Skala Teknis Palermo (*Palermo Technical Impact Hazard Scale*) serupa dengan skala Torino, tetapi melibatkan perhitungan yang lebih rumit. Skala Palermo adalah sebuah skala logaritmik yang digunakan untuk menilai tingkat risiko dari kemungkinan dampak asteroid atau komet yang dapat bertabrakan dengan Bumi. Skala ini mempertimbangkan baik probabilitas dari tabrakan maupun energi kinetik yang akan dilepaskan jika tabrakan terjadi (Siregar, 2017). Skala Palermo dinyatakan dalam angka yang bisa positif maupun negatif. Nilai negatif merupakan indikasi bahwa risiko tabrakan sangat kecil dibandingkan dengan ancaman alami dari benda-benda langit lainnya yang setara dalam jangka waktu tertentu. Nilai nol merupakan indikasi bahwa risiko tabrakan sebanding dengan tingkat ancaman dasar dari objek-objek serupa yang ada di alam. Sementara itu, nilai positif merupakan indikasi bahwa risiko tabrakan lebih besar daripada ancaman dasar alami dan membutuhkan perhatian lebih lanjut.

Secara matematis, Skala Palermo dihitung menggunakan rumus yang melibatkan probabilitas tabrakan dan energi kinetik objek (Johnson et al., 2023).

$$P = \log\left(\frac{P_i E^{0.8}}{0.03T}\right)$$

P = skala Palermo;

Pi = probabilitas tumbukan;

E = energi tumbukan (dalam megaton TNT); dan

T = waktu sampai tumbukan terjadi (dalam tahun).

E. Strategi Mitigasi Bencana Asteroid

Dampak dan mitigasi bencana asteroid sangat penting dalam astronomi dan ilmu kebumian, mengingat potensi bencana global yang bisa disebabkan oleh tumbukan asteroid. Dampak fisik bencana asteroid menyebabkan ledakan besar, menciptakan kawah besar, melepaskan energi yang setara dengan banyak bom nuklir, dan gelombang kejut ataupun tsunami. Sementara itu, dampak ekologis bisa menyebabkan gangguan pada ekosistem habitat. Oleh sebab itu, dibutuhkan upaya mitigasi. Salah satu upaya mitigasi adalah program survei NEA yang merupakan program atau upaya yang dilakukan untuk mendeteksi, melacak, dan melakukan karakterisasi objek-objek dekat Bumi, termasuk asteroid dan komet yang memiliki orbit yang dapat mendekati atau melintasi orbit Bumi (Grav et al., 2023). Meski Apophis diperkirakan tidak akan menabrak Bumi dalam 100 tahun ke depan, altenatif mitigasi tetap diperlukan mengingat adanya faktor yang mungkin memberikan pengaruh pada lintasannya dan Apophis mengalami perubahan orbit.

Pada umumnya, survei NEA dilakukan untuk:

- 1) Mendeteksi secara dini potensi bahaya.
- 2) Mengumpulkan data mengenai ukuran, komposisi, bentuk, dan sifat fisik lainnya dari NEO untuk memahami potensi dampak dan menentukan metode mitigasi yang paling efektif.
- 3) Memantau dan menghitung orbit NEA dengan presisi tinggi untuk memprediksi lintasan mereka di masa depan dan menilai risiko tabrakan dengan Bumi (Grav et al., 2023).

Ada pun beberapa teknologi dan metode yang digunakan untuk survei NEA antara lain sebagai berikut.

1. Teleskop optik digunakan untuk survei luas langit, mendeteksi pergerakan NEA terhadap latar belakang bintang tetap.
2. Teleskop inframerah digunakan untuk mendeteksi NEA yang mungkin tidak terlihat dalam panjang gelombang optik, terutama yang berukuran kecil atau memiliki albedo rendah.

3. Radar Planetary memungkinkan pengukuran jarak yang sangat akurat serta pencitraan detail dari NEA, membantu dalam karakterisasi bentuk dan rotasi.
4. Simulasi komputer digunakan untuk memodelkan orbit dan interaksi gravitasi untuk memprediksi lintasan masa depan NEA (Grav et al., 2023).

Mitigasi NEA melibatkan beberapa langkah strategis untuk mengurangi risiko yang ditimbulkan oleh asteroid yang berpotensi mendekati atau menabrak Bumi. Langkah-langkah tersebut antara lain:

1. Deteksi dan pelacakan dengan menggunakan teleskop darat dan luar angkasa untuk mendeteksi dan melacak asteroid yang mendekati Bumi atau dengan menyusun katalog asteroid untuk memantau dan memprediksi orbit mereka.
2. Melakukan penilaian risiko dengan cara menganalisis data untuk menilai kemungkinan dan dampak potensial dari tabrakan dan menggunakan model komputer untuk menyimulasikan berbagai skenario dan menentukan tingkat ancaman.
3. Menggunakan teknologi secara langsung untuk menghindari tabrakan asteroid, salah satunya dengan menabrak asteroid dengan pesawat ruang angkasa untuk mengubah lintasannya, menggunakan gravitasi pesawat ruang angkasa untuk menarik asteroid ke jalur yang berbeda untuk menghindari tabrakan atau biasa disebut dengan defleksi. Selain itu, ada juga dengan cara fragmentasi yaitu menghancurkan asteroid menjadi potongan-potongan kecil, meskipun ini lebih berisiko karena pecahannya bisa tetap menimbulkan ancaman (NASA JPL, 2024).

Upaya mitigasi ini bertujuan untuk meminimalkan risiko dan dampak dari potensi tabrakan NEA dengan Bumi. Hal tersebut membutuhkan kolaborasi internasional badan antariksa dan ilmuwan di seluruh dunia untuk berbagi data dan sumber daya. Beberapa misi internasional telah diluncurkan untuk mempelajari dan mengurangi

risiko yang ditimbulkan oleh Near-Earth Asteroids (NEA). NASA's Near-Earth Object (NEO) Program didirikan untuk mendeteksi, melacak, dan mempelajari objek dekat Bumi (NEOs), termasuk asteroid dan komet. OSIRIS-REx adalah misi NASA yang diluncurkan pada tahun 2016 untuk mengunjungi asteroid Bennu, mengumpulkan sampel, dan membawanya kembali ke Bumi untuk dipelajari. Misi ini bertujuan untuk lebih memahami komposisi dan sejarah asteroid, serta untuk meningkatkan kemampuan kita dalam menanggapi potensi ancaman dari NEA (NASA, 2024). Hayabusa2 diluncurkan oleh badan antariksa Jepang (JAXA) pada tahun 2014 untuk mempelajari asteroid Ryugu dan mengembalikan sampel ke Bumi. Hayabusa2 berhasil membawa sampel pada tahun 2020, memberikan wawasan berharga tentang komposisi dan karakteristik asteroid (JAXA, 2013). Double Asteroid Redirection Test (DART) merupakan misi NASA yang diluncurkan pada tahun 2021 dengan tujuan untuk menguji kemampuan mengubah jalur asteroid. DART menabrakkan pesawat ruang angkasa ke satelit asteroid Didymos untuk melihat dapat tabrakan tersebut dalam mengubah orbit Didymos tersebut. Ini adalah demonstrasi penting dari teknologi defleksi asteroid (NASA, 2024c). HERA adalah misi yang direncanakan oleh European Space Agency (ESA) untuk mengikuti misi DART. HERA akan mengunjungi sistem asteroid Didymos untuk melakukan observasi pasca-tabrakan, membantu mengukur efektivitas strategi defleksi (ESA, 2024). NEOWISE adalah misi yang diadaptasi dari Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) NASA untuk mendeteksi dan mengkarakterisasi NEOs menggunakan teleskop inframerah (IPAC, 2013).

F. Rekomendasi Kajian Lanjutan

Berdasarkan hasil simulasi dengan waktu integrasi 100 tahun ke depan ditemukan bahwa terdapat puluhan kali peristiwa papasan dekat Apophis dengan Bumi. Peristiwa papasan dekat yang akan terjadi selanjutnya dalam waktu dekat pada tanggal 13 April 2029. Pada peristiwa papasan dekat ini, jarak geosentrik Apophis hanya berkisar 0.00025 SA (< 0.01 kali jarak bumi-bulan atau sekitar 31.388

km dari permukaan Bumi) dan 30 Maret 2036, dengan jarak geosentrisk Apophis hanya berkisar 0.2386353 SA dari permukaan Bumi. Perubahan orbit Apophis terlihat dari perubahan orbit Apophis dari tipe Aten sebelumnya menjadi tipe Apollo setelah peristiwa papasan dekat pada 13 April 2029. Hal ini menunjukkan bahwa peristiwa papasan dekat dapat memengaruhi orbit asteroid secara signifikan. Kemudian terlihat bahwa orbit Apophis tidak terlalu eksentrik, masih berada dalam sekitar Bumi, dan tidak terlalu miring terhadap bidang ekliptika. Meskipun pendekatan ini tergolong sangat dekat dalam standar astronomi, tidak ada indikasi bahwa Apophis akan menabrak Bumi pada peristiwa-peristiwa tersebut. Namun demikian, data ini penting untuk memahami dan memprediksi pergerakan asteroid di masa depan, serta untuk merencanakan tindakan pencegahan jika diperlukan.

Ada beberapa rekomendasi untuk kajian selanjutnya. Pertama, memperdalam pemahaman tentang dinamika orbit benda kecil tata surya, terutama asteroid. Kedua, dalam simulasi perlu melibatkan efek perturbasi dari objek lain di tata surya, seperti asteroid-asteroid besar (Ceres dan Pallas). Ketiga, perlu melibatkan efek gaya non-gravitasional, seperti tekanan radiasi matahari dan efek Yarkovsky, sehingga hasil simulasi akan memberikan gambaran yang lebih akurat tentang jalur orbit Apophis. Keempat, studi tentang kemungkinan dampak tabrakan dengan Bumi menggunakan skala Torino dan Palermo, termasuk skenario mitigasi dan langkah yang harus di ambil jika benda tersebut berpotensi menabrak Bumi. Terakhir, kolaborasi internasional dengan observatorium dan badan antariksa lain akan sangat membantu dalam berbagi data sehingga galat pada orbit lintasan asteroid akan terus berkurang.

Daftar Pustaka

- Academic Dictionaries and Encyclopedias. (2024, Mei 13). 99942 Apophis. <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/656695#>
- Andersson, J. (2018). Determination of the Orbit and Dynamic Origin of Meteoroids. Dalam J. Andersson (Ed.), Determination of the Orbit and Dynamic Origin of Meteoroids (1 ed., Vol. 1, hlm. 6–7). Uppsala Universitet.

- Bancelin, D., Colas, F., Thuillot, W., Hestroffer, D., & Assafin, M. (2012). Asteroid (99942) Apophis: New predictions of Earth encounters for this potentially hazardous asteroid. *Astronomy and Astrophysics*, 544(52), 1–4. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117981>
- Dermawan, B., Hidayat, T., Putra, M., Fermita, A., Wahyuningtyas, D. T., Mandey, D., Hudaya, Z., Utomo, dan D., Keilmuan Astronomi, K., & -Institut Teknologi Bandung, F. (2010). Dinamika Orbit Asteroid Yang Analog Dengan Orbit Bumi. *Jurnal Sains Dirgantara*, 7(2), 164–177. http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi
- Dotson, J. L., Brozovic, M., Chesley, S., Jarmak, S., Moskovitz, N., Rivkin, A., Sánchez, P., Souami, D., & Titus, T. (2022). Apophis Specific Action Team Report. Dalam The Lunar and Planetary Institute's (LPI's) (Vol. 1, Nomor 2).
- Ershkov, S., & Russian, P. (2021). Revisiting Apophis 2029 approach to Earth (staying on shoulders of NASA's experts) or Can we be sure in almost ricocheting fly-by of Apophis on 13 of April 2029 near the Earth? *Astronomical*, 1(1), 2–3.
- ESA. (2021, Maret 26). Apophis impact ruled out for the first time. https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Apophis_impact_ruled_out_for_the_first_time
- ESA. (2024, Juli 26). Apophis. ESA. https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Apophis
- ESA. (2024b, Agustus 4). hera. ESA. https://www.esa.int/Space_Safety/Hera
- Grav, T., Mainzer, A. K., Masiero, J. R., Dahlen, D. W., Spahr, T., Bottke, W. F., & Masci, F. J. (2023). The NEO Surveyor Near-Earth Asteroid Known Object Model. *Planetary Science Journal*, 4(12), 1–4. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad072e>
- Guo, P., Ivashkin, V. V., Stikhno, C. A., & Shkapov, P. M. (2018). Determination and investigation of asteroid Apophis' trajectories set potentially colliding with the Earth in 2036. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 468(1), 5–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/468/1/012023>
- Harbowo, D. G., Muztaba, R., Malasan, H. L., Sumardi, S., Agustina, L. K., Julian, T., Sitorus, J. H., Denhi, A. D. A., Sihombing, D. J. P., Mahayu, M. P., & Setyawan, D. (2021). Meteorite from Astomulyo Village, Central Lampung, Indonesia: Investigation of its chemical properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 882(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/882/1/012011>

- IPAC. (2013, Desember 11). THE NEOWISE PROJECT. IPAC. <https://neowise.ipac.caltech.edu/>
- JAXA. (2013, April 6). Hayabusa2. JAXA. <https://www.hayabusa2.jaxa.jp/en/>
- Johnson, P. A., Johnson, J. C., Omran, N. Al, & Mardon, A. A. (2023). Near-Earth Objects Impact Hazard Assessment Scales.
- Morelli, A. C., Mannocchi, A., Giordano, C., Ferrari, F., & Topputo, F. (2024). Initial Trajectory Assessment of a low-thrust option for the RAMSES Mission to (99942) Apophis. *Advances in Space Research*, 73(8), 2. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.02.005>
- Müller, T. G., Kiss, C., Scheirich, P., Pravec, P., O'Rourke, L., Vilenius, E., & Altieri, B. (2014). Thermal infrared observations of asteroid (99942) Apophis with Herschel. *Astronomy and Astrophysics*, 566(22), 1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423841>
- NASA. (2021, Maret 24). NASA Analysis: Earth Is Safe From Asteroid Apophis for 100-Plus Years. <https://www.nasa.gov/solar-system/nasa-analysis-earth-is-safe-from-asteroid-apophis-for-100-plus-years/>
- NASA. (2024). Small-Body Database Lookup. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=99942%20apophis&view=OPC
- NASA. (2024, Mei 13). Asteroid 99942. <https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/apophis/>
- NASA. (2024, Juli 31). NASA's Double Asteroid Redirection Test (DART). NASA. <https://science.nasa.gov/planetary-defense-dart/>
- NASA. (2024, Juli 31). OSIRIS-REx. NASA. <https://science.nasa.gov/mission/osiris-rex>
- NASA JPL. (2024a, Agustus 2). Discovery Statistics NEA. NASA JPL. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>
- NASA JPL. (2024, Agustus 2). NEO Basics. NASA JPL. https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html
- NASA JPL. (2024, Agustus 4). CNEOS is NASA's center for computing asteroid and comet orbits and their odds of Earth impact. NASA JPL. <https://cneos.jpl.nasa.gov/>
- Nolan, M., Abell, P., Asphaug, E., Drouet D'aubigny, C., Becker, T., Brozovic, M., Busch, M., Binzel, R., Chesley, S., & Daly, R. T. (2021). Near-Earth Objects. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2021(4), 1–9. <https://doi.org/10.3847/25c2cfababe6f0d>

- Pérez-Hernández, J. A., & Benet, L. (2022). Non-zero Yarkovsky acceleration for near-Earth asteroid (99942) Apophis. *Communications Earth and Environment*, 3(1), 1–4. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00337-x>
- Rachman, A. (2010). Identifikasi Benda Jatuh Antariksa di Teluk Bone. Dalam A. Rachman (Ed.), *Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa LAPAN (Lingkungan Antariksa*, Vol. 1, hlm. 1–5). LAPAN.
- Rachman, A. (2015). Metode Sederhana Untuk Memperoleh Karakteristik Asteroid Kecil Yang Jatuh di Chelyabinsk Rusia Pada 15 Februari 2013. *Pusat Sains Antariksa LAPAN*, 10(1), 1–2. www.perthnow.com.au
- Sánchez-Lozano, J. M., & Fernández-Martínez, M. (2016). Near-Earth object hazardous impact: A Multi-Criteria Decision Making approach. *Scientific Reports*, 6(2), 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep37055>
- Satpathy, A., Mainzer, A., Masiero, J. R., Linder, T., Cutri, R. M., Wright, E. L., Pittichova, J., Grav, T., & Kramer, E. (2022). NEOWISE Observations Of The Potentially Hazardous Asteroid (99942) Apophis. *AAS*, 1(1), 13–16. <http://arxiv.org/abs/2204.05412>
- Siregar, S. (2017). *Fisika Tata Surya* (S. Siregar, Ed.; *Fisika Tata Surya*, Vol. 1). Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB. <http://personal.fimipa.itb.ac.id/suryadi>.
- University of Pisa. (2022). Orbital Elements.
- Valvano, G., Sfair, R., Winter, O. C., Machado-Oliveira, R., & Borderes-Motta, G. (2024). Apophis: May a meteor activity happen on Earth after the 2029 closest approach? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 531(1), 1. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae1181>
- Valvano, G., Winter, O. C., Sfair, R., 2, G. B.-M., Machado, R., & Moura, T. (2021). APOPHIS Effects of the 2029 Earth's Encounter on the Surface and Nearby Dynamics. *MINRAS*, 1(1), 2–11. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3299>