



## Efektivitas Strategi Deorbit Mega Konstelasi Satelit Starlink Periode Tahun 2019 - 2025

Devi Siska Pitriya.S<sup>1</sup>, Judistira Aria Utama<sup>1</sup>, Abdul Rachman<sup>2</sup>

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi XI)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

16 Agustus 2025

### ABSTRACT

*The growth of the Starlink satellite megaconstellation has led to a significant increase in the number of objects in low Earth orbit (LEO), contributing to a higher risk of collisions and the accumulation of space debris. This research analyzes the active deorbit strategies implemented by SpaceX to manage the end of operational life of Starlink satellites. The analysis was conducted based on the orbital decay trends from various launch batches and compared against passive decay scenarios. The results show that the active deorbit strategy thru propulsion systems and controlled maneuvers has proven to be more effective in reducing orbital density, with an average deorbit of 137 satellites per year during the period 2019–2025. This is significantly higher than the theoretical passive estimate of 16 satellites per year. These findings indicate that the implementation of active deorbit strategies plays a crucial role in efforts to mitigate space debris and ensure the operational sustainability of satellites in LEO.*

**Keywords:** Starlink · Active deorbit · Orbital decay · Mitigation · Space debris

### PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi global mengalami percepatan signifikan dengan hadirnya megakonstelasi satelit, salah satunya proyek Starlink dari SpaceX. Dirancang untuk menyediakan akses internet berkecepatan tinggi dan latensi rendah, Starlink mengoperasikan ribuan satelit kecil di orbit rendah Bumi (LEO) pada ketinggian sekitar 550–1200 km. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuannya mengurangi latensi dibandingkan satelit geostasioner (Ren dkk., 2021). Namun, keberhasilan tersebut diiringi tantangan lingkungan, terutama peningkatan jumlah objek di LEO yang memicu risiko tumbuhnya sampah antariksa.

Sampah antariksa mencakup satelit tidak aktif, pecahan akibat tabrakan, dan sisa komponen roket. Peluncuran satelit baru berkontribusi pada meningkatnya kepadatan orbit, yang dapat memicu efek domino tabrakan beruntun atau Kessler Syndrome (Zhang dkk., 2022). Megakonstelasi seperti Starlink menambah tekanan pada orbit rendah Bumi, terlihat dari tingginya frekuensi manuver penghindaran. Antara Desember 2022 hingga Maret 2023, Starlink melakukan 25.299 manuver untuk menghindari potensi tabrakan—dua kali lipat dibanding periode enam bulan sebelumnya (Runnels, 2023).

Menurut European Space Agency (ESA, 2023), terdapat lebih dari 36.000 objek berukuran lebih dari 10 cm yang terdeteksi di orbit Bumi, sementara jumlah objek yang lebih kecil jauh

---

✉ Devi Siska Pitriya.S      Judistira Aria Utama  
devisiskafitriya03@upi.edu    j.aria.utama@upi.edu

Abdul Rachman  
abd.rachman@brin.go.id

<sup>1</sup> Physics Study Program, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia.

<sup>2</sup> Deputy for Research and Innovation Infrastructure, National Research and Innovation Agency

lebih besar dan sulit dilacak. Untuk mengatasi tantangan ini, SpaceX menerapkan strategi deorbit aktif dengan membatasi masa operasional satelit dan menggunakan sistem propulsi ion berbahan bakar krypton untuk mengarahkan satelit keluar dari orbit setelah akhir masa pakainya (SpaceX, 2023). Meski demikian, efektivitas strategi ini masih diperdebatkan, terutama terkait kesesuaiannya dengan regulasi mitigasi sampah antariksa internasional (NASA, 2019; ESA, 2023).

Selain risiko tabrakan, megakonstelasi juga berdampak pada bidang lain seperti astronomi, di mana jejak cahaya satelit mengganggu pengamatan teleskopik (Mróz dkk., 2022), serta lingkungan atmosfer melalui emisi CO<sub>2</sub> dari peluncuran roket (Osoro dkk., 2023). Berbagai upaya mitigasi telah diusulkan, termasuk post-mission disposal (PMD), sistem manuver otomatis, dan pengembangan space traffic management. Namun, efektivitasnya masih memerlukan evaluasi jangka panjang (Zhang dkk., 2022).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas strategi deorbit aktif pada megakonstelasi Starlink dalam mengurangi akumulasi sampah antariksa di LEO. Analisis dilakukan menggunakan data operasional Starlink dari Space-Track, meliputi waktu peluncuran, durasi operasional, status akhir, dan waktu deorbit satelit. Hasil penelitian diharapkan memberikan gambaran menyeluruh mengenai kontribusi strategi deorbit terhadap keberlanjutan operasional megakonstelasi satelit serta menjadi masukan bagi komunitas ilmiah dan pembuat kebijakan dalam merumuskan strategi mitigasi yang lebih efektif.

## METODE

Analisis difokuskan pada pengukuran efektivitas strategi deorbit aktif satelit Starlink melalui dua pendekatan utama: pemantauan jumlah satelit yang berhasil dideorbit setiap tahun dan perbandingan laju peluruhan orbit actual dengan model peluruhan pasif. Data yang digunakan berasal dari Space-Track org. mencakup informasi tanggal peluncuran, status operasional, ketinggian orbit dan waktu deorbit. Kajian ini dilakukan dari tahun 2019 hingga awal tahun 2025 dan kriteria deorbit termasuk satelit dengan status decayed dan ketinggian orbit di bawah 300 km.

Model teoritis dari Utama dkk (2020) digunakan sebagai acuan pembanding untuk menghitung perkiraan jumlah total satelit yang dikumpulkan dan jumlah total satelit yang dideorbit secara pasif setiap tahun. Model ini dinyatakan melalui persamaan:

$$F_{AS \rightarrow SD} = |B| \times N_S$$

$$N_{SD} = F_{AS \rightarrow SD} \times (L)$$

Dengan  $F_{AS \rightarrow SD}$  adalah jumlah akumulasi satelit yang mengalami deorbit,  $|B|$  adalah jumlah batch peluncuran,  $N_S$  adalah rata-rata satelit yang dideorbit per batch,  $L$  adalah jumlah deorbit per tahun,  $F_{AS \rightarrow SD}$  adalah fraksi peluruhan alami, dan  $L$  adalah jumlah peluncuran tahunan.

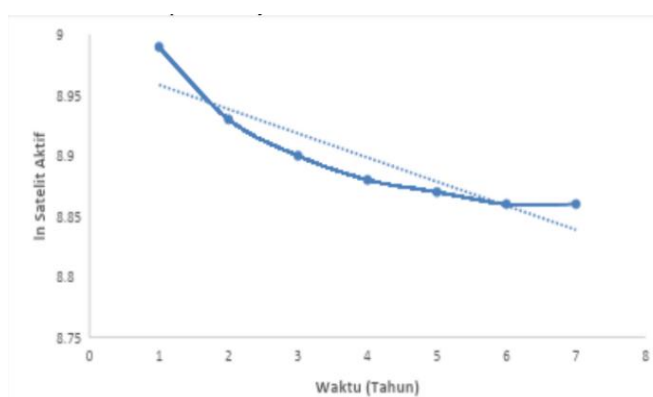
Metode ini digunakan untuk menentukan sejauh mana strategi deorbit aktif mempercepat peluruhan orbit dibandingkan scenario pasif dan untuk menilai kontribusinya dalam upaya

mengurangi akumulasi objek di LEO. Hasil analisis kemudian divisualisasikan untuk menunjukkan perbedaan antara pola peluruhan dan tren deorbit yang menjadi fokus utama penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Laju Peluruhan Satelit Starlink

Laju peluruhan satelit menggambarkan kecepatan turunnya ketinggian orbit hingga akhirnya memasuki fase deorbit. Pada Starlink, parameter ini dipengaruhi oleh desain satelit, ketinggian operasi, dan faktor lingkungan seperti hambatan atmosfer. Analisis laju peluruhan penting untuk menilai efektivitas strategi deorbit serta memprediksi durasi keberadaan satelit di LEO setelah akhir masa operasionalnya.



**Gambar 1.** Kurva Peluruhan Eksponensial Jumlah Satelit Aktif Starlink terhadap Waktu

Dalam grafik diatas, tren jumlah satelit Starlink yang masih aktif secara bertahap ditampilkan dalam logaritma natural (ln). untuk membuat pola peluruhan eksponensial terlebih lebih linear, transformasi logaritma ini diterapkan pada sumbu vertikal sebagaimana umum digunakan dalam analisis peluruhan populasi yang di kembangkan oleh Utama dkk (2020). Metode ini membantu menemukan tren jangka Panjang dan mengevaluasi laju penurunan jumlah satelit aktif dengan lebih akurat.

Grafik tersebut menunjukkan penurunan bertahap dalam jumlah satelit aktif setiap tahun. Penurunan ini adalah akibat dari peristiwa yang terjadi secara alami dan direncanakan seperti batas waktu operasional, manuver deorbit atau masalah teknis yang menyebabkan satelit tidak dapat beroperasi lagi. Oleh karena itu, grafik ini hanya menunjukkan populasi satelit yang masih aktif dan beroperasi pada tahun pengamatan tertentu bukan jumlah total satelit yang pernah diluncurkan.

Berdasarkan hasil regresi eksponensial diperoleh  $y = 8,9787e^{-0,002x}$  dengan nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0,8319$  yang menunjukkan bahwa model cukup baik dalam mempresentasikan data. Nilai laju peluruhan fraksional  $B = 0,002$  pertahun mengindikasikan bahwa penurunan jumlah satelit aktif berlangsung sangat lambat. Ini menunjukkan betapa efektifnya pendekatan desain dan pengoperasian satelit Starlink karena sebagian besar satelit tetap aktif cukup lama sebelum dinonaktifkan.

Dengan menggunakan nilai laju peluruhan yang dirumuskan oleh Utama dkk (2020) fluks transisi dari populasi satelit aktif (AS) ke populasi sampah antariksa (SD) dapat dihitung. Berdasarkan asumsi bahwa 8120 satelit aktif memiliki populasi tunak, diperoleh sekitar 16 satelit setiap tahun yang mengalami peralihan yang mengalami peralihan status dari aktif menjadi nonaktif dan berpotensi menjadi bagian dari SD. Selanjutnya, apabila diasumsikan bahwa satelit nonaktif memiliki waktu tinggal di orbit selama lima tahun (Pultarova dkk., 2022) sebelum deorbit maka populasi tunak mencapai 80 satelit. Estimasi ini memberikan gambaran kuantitatif tentang dampak peluruhan populasi AS terhadap akumulasi SD serta menyoroti pentingnya strategi mitigasi guna mengendalikan jumlah objek nonaktif yang berada di orbit.

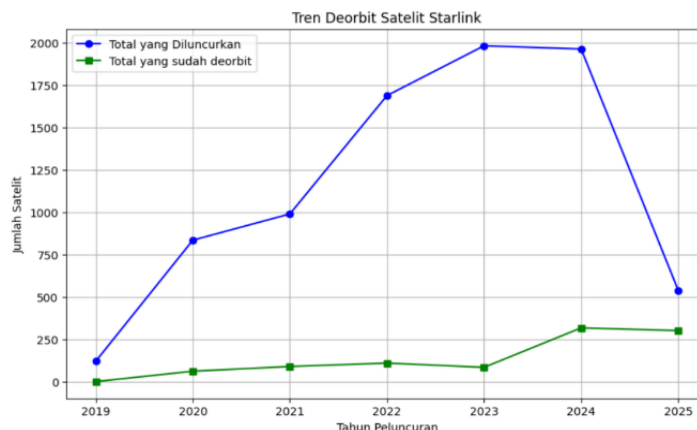
Untuk melengkapi kajian berbasis model tersebut, dilakukan pula analisis terhadap data aktual deorbit satelit Starlink pada periode tahun 2019 hingga awal tahun 2025. Berdasarkan data historis, tercatat sebanyak 961 satelit Starlink telah dideorbitkan dalam rentang waktu tersebut. Jumlah tersebut dirata-ratakan selama tujuh tahun maka diperoleh nilai rata-rata deorbit tahunan sebesar 137 satelit per tahun. Nilai ini menunjukkan deviasi yang signifikan terhadap perkiraan teoritis sebesar 16 satelit per tahun. Namun perbedaan ini tidak mencerminkan ketidaksesuaian, melainkan menunjukkan bahwa SpaceX menggunakan strategi mitigasi aktif secara teratur saat mengelola armada satelitnya.

Dalam konteks ini, pendekatan teoritis yang dilakukan oleh Utama dkk (2020) lebih merepresentasikan skenario pasif satelit Starlink menjadi sampah antariksa secara alami tanpa intervensi teknis. Sebaliknya, data empiris ini mendukung argument bahwa pendetakan deorbit aktif yang digunakan SpaceX secara signifikan terhadap pengurangan potensi akumulasi sampah antariksa, serta menunjukkan bahwa sebagian besar satelit nonaktif dideorbit secara aktif sebelum memasuki fase tidak terkontrol sebagai SD.

Dengan demikian, grafik ini memberikan representasi visual dan matematis mengenai efektivitas strategi operasional dan deorbit yang digunakan SpaceX. Penurunan bertahap jumlah satelit aktif menunjukkan bahwa sebagian telah dinonaktifkan dan kemungkinan besar akan dideorbitkan sesuai rencana, sementara sisanya masih berada dalam orbit. Ini menunjukkan bahwa SpaceX terus meluncurkan satelit baru dan secara aktif mengawasi siklus hidup kegiatan perusahaan.

### **Tren Jumlah Satelit Deorbit Pertahun**

Jumlah satelit yang dideorbit setiap tahun menjadi indikator penting keberhasilan strategi mitigasi sampah antariksa. Pada Starlink, tren ini menunjukkan konsistensi penerapan post-mission disposal serta respons terhadap peningkatan risiko tabrakan di LEO. Perbandingan antara satelit yang dideorbit dan yang diluncurkan memberikan gambaran efektivitas strategi deorbit dalam mengendalikan kepadatan orbit.



Gambar 2. Tren Deorbit Satelit Starlink

Grafik diatas menunjukkan tren tahunan jumlah satelit Starlink yang telah dideorbit sejak peluncurannya pada tahun 2019 hingga proyeksi awal tahun 2025. Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa tren deorbit mengalami peningkatan yang signifikan dari tahun ke tahun.

Jumlah peluncuran satelit pada tahun 2019 masih terbatas, dengan hanya angka dibawah 200 unit dan hampir tidak ada yang dideorbit. Ini wajar karena satelit tersebut baru mulai dioperasikan dan belum mencapai masa akhir pakai. Kemudian, peluncuran menjadi lebih dari 800 uni pada 2020 memicu deorbit pertama dari sekitar 60 satelit. Ini menunjukkan bahwa strategi pengelolaan konstelasi dan pemeliharaan orbit telah dimulai.

Pada tahun 2021 dan 2022 peluncuran satelit maupun deorbit satelit meningkat. Peluncuran lebih dari 1.600 satelit dan deorbit sekitar 110 unit, menunjukkan bahwa masa operasional awal batch satelit telah berakhir dan beberapa unit mungkin mengalami masalah teknis. Menariknya, jumlah deorbit pada tahun 2023 menurun dibandingkan tahun sebelumnya, meskipun peluncuran menjadi hampir 2000 satelit. Hal ini menunjukkan kemungkinan perbaikan desain dan peningkatan keandalan satelit generasi baru seperti Starlink v1.5 yang mulai menjadi fokus peluncuran.

Namun, meskipun peluncuran terus berlanjut jumlah deorbit meningkat secara signifikan pada tahun 2024 dan 2025 mencapai lebih dari 300 satelit. Beberapa faktor, termasuk deorbit massa, satelit generasi awal (2019 - 2020), kegagalan operasional dan komitmen SpaceX terhadap kebijakan pengurangan sampah antariksa, mungkin berperan dalam peningkatan tren deorbit ini.

Secara keseluruhan, tren ini menunjukkan bahwa deorbit tidak selalu proporsional terhadap jumlah peluncuran. Usia satelit, kebijakan operasional, dan upaya mengurangi risiko tabrakan di orbit rendah Bumi (LEO) lebih banyak mempengaruhi deorbit dari pada peluncuran secara keseluruhan.

## SIMPULAN

Analisis terhadap data peluruhan orbit satelit Starlink periode 2019–2025 menunjukkan bahwa strategi deorbit aktif yang diterapkan SpaceX secara signifikan mempercepat penurunan satelit non-operasional dibandingkan dengan skenario peluruhan pasif. Model teoritis Utama dkk.

(2020) memproyeksikan laju peluruhan alami rata-rata sekitar 16 satelit per tahun, sedangkan data aktual menunjukkan angka rata-rata 137 satelit per tahun, atau sekitar 8 kali lebih tinggi.

Tren jumlah deorbit tahunan yang meningkat seiring bertambahnya jumlah peluncuran menegaskan bahwa deorbit aktif tidak hanya menjadi bagian dari strategi mitigasi sampah antariksa, tetapi juga langkah operasional untuk memperbarui konstelasi dan mengurangi risiko tabrakan. Dengan waktu keberadaan satelit non-operasional yang jauh lebih singkat dari standar 25 tahun yang direkomendasikan, strategi ini terbukti efektif dalam membatasi akumulasi objek pasif di LEO. Temuan ini memperlihatkan bahwa penerapan deorbit aktif pada skala mega-konstelasi dapat menjadi contoh praktik terbaik (best practice) bagi operator satelit lainnya, sekaligus mendukung upaya internasional dalam menjaga keberlanjutan lingkungan orbit rendah Bumi.

## DAFTAR PUSTAKA

- European Space Agency (ESA). (2023). Space Debris by the Numbers. Retrieved from [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_Debris/](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/) [ 25 Oktober 2024]
- Mróz, P., Otarola, A., Prince, T. A., Dekany, R., Duev, D. A., Graham, M. J., Groom, S. L., Masci, F. J., & Medford, M. S. (2022). Impact of the SpaceX Starlink Satellites on the Zwicky Transient Facility Survey Observations. *The Astrophysical Journal Letters*, 924(2), L30. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac470a>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2019). What is Space Debris? NASA's Orbital Debris Program Office. Retrieved from <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov> [ 25 Oktober 2024]
- Osoro, O. B., Oughton, E. J., Wilson, A. R., & Rao, A. (2023). Sustainability assessment of Low Earth Orbit (LEO) satellite broadband megaconstellations. *Astrophysics: Earth and Planetary Astrophysics*, 1–28.
- Ren, S., Yang, X., Wang, R., Liu, S., & Sun, X. (2021). The interaction between the LEO satellite constellation and the space debris environment. *Applied Sciences(Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/app11209490>
- Runnels, M. B. (2023). On Who Should Pay When Orbital Debris “Trickles-Down” in a Tragedy of the Low Earth Orbit Commons. In *Journal of Air Law and Commerce* (Vol. 88, Issue 4). <https://doi.org/10.25172/jalc.88.4.3>
- SpaceX successfully launches first private ISS resupply mission. (2012). *Physics Today*, 2012(10). <https://doi.org/10.1063/pt.5.026420>
- Utama, J. A., Mukharradi, F., Riza, L.S., & Hidayat, T. (2020). Estimasi Kelimpahan Keadaan Tunak Populasi Asteroid Dekat-Matahari. *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol. 17 No (2597– 7873). <https://doi.org/10.30536/j.jsd.2020.v17.a3264>
- Zhang, Y., Li, B., Liu, H., & Sang, J. (2022). An analysis of close approaches and probability of collisions between LEO resident space objects and mega constellations. *Geo-Spatial Information Science*, 25(1), 104–120. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2031313>