

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk mengevaluasi implementasi strategi deorbit SpaceX dalam mitigasi sampah antariksa dari megakonstelasi satelit Starlink. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengolah data numerik terkait jumlah satelit Starlink yang masih aktif, yang telah dideorbit, serta usia satelit sebelum dideorbit. Pendekatan ini bersifat deskriptif karena penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola, tren, dan efektivitas strategi deorbit berdasarkan data yang telah dikumpulkan. Dengan demikian penelitian ini tidak hanya menggambarkan kondisi aktual dari implementasi strategi deorbit SpaceX, tetapi juga memberikan wawasan mengenai sejauh mana strategi tersebut berhasil dalam mengurangi sampah antariksa di orbit rendah bumi (LEO).

Penelitian ini juga memanfaatkan pendekatan komparatif yaitu dengan membandingkan strategi deorbit SpaceX dengan standar mitigasi sampah antariksa yang diterapkan oleh NASA ODMSP (*Orbital Debris Mitigation Standard Practices*) dan ESA (*European Space Agency*) DRAMA Tool.

3.2 Pengambilan data

Penelitian ini mengandalkan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber terpercaya untuk menganalisis evaluasi implementasi strategi deorbit SpaceX dalam mitigasi sampah antariksa dari megakonstelasi Satelit Starlink. Untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi proses, pengolahan awal data dilakukan secara semi otomatis menggunakan skrip Python melalui Google Colab. Sumber data utama meliputi:

1. Database Space-Track.org

Digunakan untuk memperoleh data katalog satelit Starlink yang masih aktif dan telah dideorbit, termasuk elemen orbit (TLE – *Two-Line Element*), dan tanggal masuk kembali ke atmosfer (DECAY_DATE). Data ini digunakan untuk mengevaluasi jumlah satelit di orbit, pola deorbitasi, serta efektivitas strategi mitigasi sampah antariksa.

2. Database CelesTrak

Digunakan untuk validasi data dari Space-Track.org, terutama terkait daftar terbaru satelit Starlink dan posisi orbitnya. Informasi ini juga memungkinkan analisis kepadatan satelit serta pergerakan objek di orbit rendah Bumi (LEO).

3. Laporan Peluncuran SpaceX

Data ini digunakan untuk mengkonfirmasi jumlah dan jadwal peluncuran satelit Starlink serta membandingkan klaim SpaceX mengenai strategi deorbit dengan data aktual yang diperoleh dari sumber lain.

4. Studi dan Jurnal Ilmiah

Data dari penelitian terdahulu yang menganalisis efektivitas strategi mitigasi sampah antariksa digunakan sebagai perbandingan. Selain itu, standar mitigasi sampah antariksa dari NASA ODMSP dan ESA DRAMA Tool juga digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian strategi deorbit SpaceX dengan praktik terbaik industri.

3.3 Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data dari *Space-Track* dengan penekanan khusus pada katalog objek antariksa yang dikelola oleh *North American Aerospace Defense Command* (NORAD). Data yang dikumpulkan mencakup berbagai parameter orbit seperti *perigee*, *apogee*, inklinasi dan periode orbit serta status operasional satelit, baik yang masih aktif maupun yang sudah tidak berfungsi. Informasi ini digunakan untuk menganalisis dinamika pergerakan konstelasi satelit Starlink dan menilai kontribusinya terhadap jumlah objek sampah antariksa yang meningkat di orbit rendah Bumi (LEO).

Data yang digunakan dalam penelitian ini dimulai dari Mei 2019 hingga Maret 2025. Interval waktu yang dipilih dimaksudkan untuk mencakup seluruh tahap penting dalam siklus hidup satelit Starlink, mulai dari fase peluncuran awal, masa operasional aktif, hingga penerapan kebijakan untuk mengurangi risiko sampah antariksa melalui prosedur deorbit. Diharapkan juga bahwa interval waktu ini akan memberikan gambaran mendalam tentang kecenderungan perubahan

dinamika orbit, kepadatan objek di LEO, dan seberapa efektif metode mitigasi yang digunakan SpaceX.

Dalam penelitian ini, metodologi pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis, seperti:

1. Seleksi satelit Starlink

Tujuan awal dari proses ini adalah untuk membedakan satelit Starlink dari objek antariksa lainnya, sehingga analisis difokuskan secara khusus pada konstelasi ini. Ini dilakukan dengan menyaring data dari katalog NORAD dan *Space-Track* berdasarkan identifikasi operator SpaceX dan nama satelit dengan label Starlink.

2. Penetapan Waktu Observasi

Waktu pengamatan ditentukan dari Mei 2019 hingga Maret 2025. Data dikumpulkan secara berkala untuk melacak perubahan status dan posisi satelit sepanjang waktu. Ini memungkinkan untuk menganalisis tren dan dinamika yang akurat selama periode waktu tersebut.

3. Identifikasi Deorbit

Kriteria deorbitasi satelit ditentukan berdasarkan dua indikator utama, yaitu:

- Penurunan Ketinggian Orbit: penurunan signifikan pada parameter *perigee* dan *apogee* menunjukkan deorbitasi. Ini menunjukkan penurunan konstan ketinggian orbit yang disebabkan oleh proses alami atau prosedur yang direncanakan.
- Status dalam Katalog: satelit yang memiliki status *decayed* atau *reentered* dalam basis data *Space-Track* dianggap sebagai objek yang telah mengalami deorbitasi yang merupakan konfirmasi tambahan.

Seluruh tahapan dalam metodologi ini dirancang untuk mendukung tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi dampak konstelasi Starlink terhadap peningkatan jumlah sampah antariksa di LEO dan mengkaji seberapa efektif metode mitigasi yang digunakan untuk mendukung keberlanjutan operasional di ruang angkasa.

3.4 Pengolahan Data

Data yang dikumpulkan akan diolah untuk mengevaluasi implementasi strategi deorbit SpaceX dalam mitigasi sampah antariksa dari megakonstelasi satelit Starlink di orbit rendah Bumi (LEO). Proses pengolahan data meliputi pembersihan dan validasi, analisis usia satelit sebelum deorbit, perbandingan jumlah peluncuran dan deorbit, serta studi kasus kegagalan deorbit.

Untuk mendukung proses ini, digunakan skrip *Python* yang dijalankan melalui platform *Google Collaboratory* untuk membantu dalam pembersihan data, perhitungan usia operasional satelit, pengolahan statistic, dan visualisasi tren peluncuran dan deorbit. *Python* dipilih karena kemampuan untuk menangani data numerik dengan baik dan dukungannya terhadap pustaka analisis seperti *pandas* dan *matplotlib*.

1. Pembersihan dan Validasi Data

Langkah awal dalam pengolahan data adalah pembersihan dan validasi untuk memastikan keakuratan informasi yang diperoleh dari Space-Track.org dan Celestrak dengan data yang mencakup daftar satelit Starlink yang masih aktif termasuk NORAD ID, tanggal peluncuran, dan status operasional serta daftar satelit yang telah dideorbit berdasarkan tanggal peluncuran dan termasuk kembali ke atmosfer (DECAY_DATE). Proses validasi dilakukan dengan membandingkan informasi dari berbagai sumber guna menghindari ketidaksesuaian atau duplikasi data. Proses ini dilakukan secara terstruktur menggunakan skrip Python di Google Collab untuk mempermudah identifikasi duplikasi data dan menggabungkan informasi dari berbagai sumber.

2. Analisis Usia Satelit Sebelum Deorbit

Analisis usia satelit dilakukan untuk mengevaluasi kepatuhan SpaceX terhadap kebijakan deorbit dengan batas usia operasional 5 tahun. Usia satelit dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Usia Satelit} = \text{Decay_date} - \text{Launch_date},$$

Dengan hasil analisis mencakup rata-rata usia satelit sebelum deorbit untuk menilai kesesuaiannya dengan batas yang ditetapkan serta

distribusi usia satelit untuk mengidentifikasi kemungkinan adanya satelit yang dideorbit lebih lama dari yang direncanakan.

3. Perbandingan Jumlah Peluncuran dan Deorbit

Analisis ini bertujuan menilai keseimbangan antara jumlah peluncuran dan deorbit dengan membandingkan jumlah satelit yang diluncurkan, yang berhasil dideorbit, serta yang masih aktif dan belum dideorbit setiap tahun. Sementara visualisasi data dalam bentuk grafik digunakan untuk mengidentifikasi adanya *backlog* satelit yang belum dideorbit sesuai dengan jadwal atau tidak.

4. Identifikasi *Backlog* Satelit yang Belum Dideorbit

Evaluasi dilakukan untuk menentukan ada atau tidaknya satelit yang telah beroperasi lebih dari 5 tahun tetapi belum dideorbit. Jika ditemukan keterlambatan deorbitasi hal ini dapat mengindikasikan hambatan dalam strategi mitigasi SpaceX dan potensi peningkatan risiko sampah antariksa.

5. Studi Kasus Kegagalan Deorbit

Selain analisis static penelitian ini juga akan mengidentifikasi kasus-kasus kegagalan deorbit yang pernah terjadi pada satelit Starlink seperti insiden Falcon 9 G9-3 pada Juli 2024 yang mengalami deorbit tidak terkontrol akibat kegagalan system propulsi, serta temuan serpihan satelit Starlink di Kanada pada Agustus 2024 yang tidak terbakar sepenuhnya saat masuk kembali ke atmosfer yang bertentangan dengan klaim SpaceX tentang *demisability*.

6. Visualisasi Data

Hasil pengolahan data akan divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah analisis dan interpretasi. Visualisasi dilakukan menggunakan pustaka *matplotlib* dan *seaborn* pada Python yang dijalankan di Google Colab, untuk menghasilkan grafik tren peluncuran, deorbit dan usia satelit.

a. Analisis Data

Analisis data akan dilakukan menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan sebagai berikut: Analisis Statistik

Deskriptif: Menghitung jumlah satelit yang telah dideorbit dan yang masih aktif, serta mengevaluasi usia satelit sebelum deorbit untuk menentukan strategi SpaceX telah dijalankan sesuai dengan batas 5 tahun yang ditetapkan atau tidak. Selain itu, analisis ini juga mencakup identifikasi satelit yang belum dideorbit guna menilai potensi peningkatan sampah antariksa di orbit rendah Bumi (LEO).

- b. Analisis Tren dan Perbandingan: Membandingkan jumlah peluncuran dan jumlah deorbit setiap tahun untuk melihat keseimbangan antara ekspansi konstelasi dan mitigasi sampah antariksa serta membandingkan strategi deorbit SpaceX dengan standar mitigasi sampah antariksa yang ditetapkan oleh NASA ODMSP dan ESA DRAMA.
- c. Visualisasi Data: Dilakukan untuk mempermudah analisis tren dan pola deorbit satelit Starlink.
- d. Studi Kasus Kegagalan Deorbit: Menganalisis insiden satelit Starlink mengalami kegagalan deorbit baik karena malfungsi system atau anomaly teknis serta mengevaluasi dampak kegagalan ini terhadap lingkungan orbit LEO dan risiko tabrakan dengan objek lain.

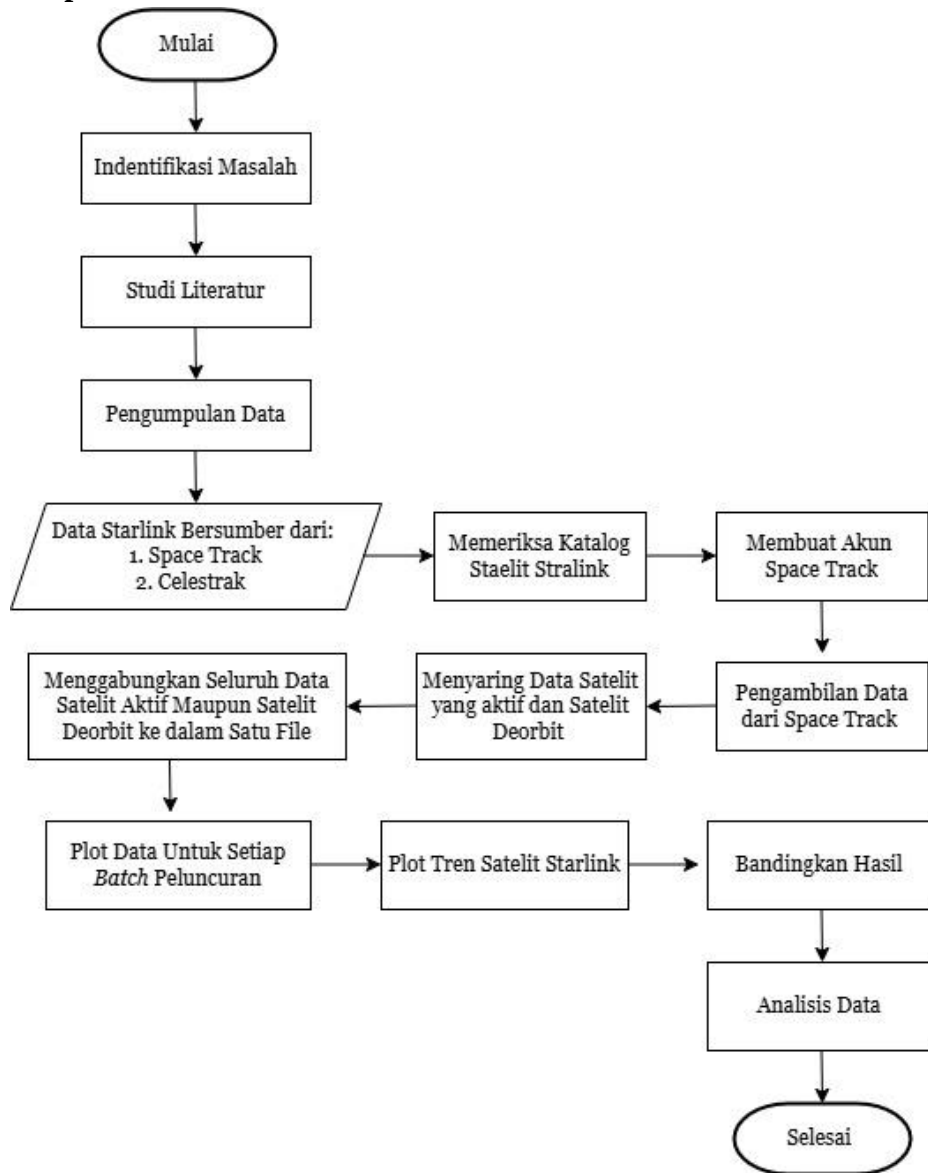
7. Analisis Perubahan Orbit

Proses analisis dilakukan sebagai berikut:

- a. Mengidentifikasi tanggal peluncuran masing-masing satelit dengan menggunakan katalog resmi
- b. Mengumpulkan nilai data *perigee* dan *apogee* satelit secara berkala sejak satelit mulai beroperasi hingga deorbit tercatat.
- c. Membuat grafik yang menggambarkan tren perubahan ketinggian orbit selama masa hidup satelit
- d. Menganalisis pola perubahan orbit untuk mengidentifikasi penurunan orbit yang konsisten, percepatan penurunan di fase akhir, atau anomaly lain yang terkait dengan proses deorbit

Tujuan dari metode ini adalah untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang evolusi orbit satelit Starlink selama masa operasionalnya. Penelitian ini dapat menemukan ciri-ciri pola penurunan orbit, baik yang terjadi secara terkontrol melalui strategi deorbit aktif maupun yang terjadi secara alami karena hambatan atmosfer (deorbit pasif). Ini dilakukan dengan memantau perubahan ketinggian orbit secara berkala sejak peluncuran hingga deorbit. Oleh karena itu, metode ini tidak hanya memberikan pemahaman kuantitatif tentang dinamika orbit, tetapi juga membantu menilai seberapa efektif penggunaan pengurangan risiko sampah antariksa dalam operasional megakonstelasi.

3.5 Tahapan Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

Tahapan penelitian ini dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Studi Literatur: Mengumpulkan referensi terkait strategi mitigasi sampah antariksa dengan meninjau jurnal ilmiah, laporan organisasi antariksa dan publikasi lainnya untuk membangun landasan teoritis yang kuat.
2. Pengumpulan Data: Mengumpulkan data Starlink dari Space-Track dan Celestrak, termasuk elemen orbit (TLE) serta katalog satelit yang masih aktif dan yang telah dideorbit.

3. Pembersihan dan Pengolahan data: Menyaring data untuk mengidentifikasi satelit yang masih aktif dan yang sudah dideorbit untuk memastikan akurasi analisis.
4. Analisis Data Kuantitatif: Menghitung usia satelit sebelum deorbit, tren deorbit, dan backlog satelit yang belum dideorbit menggunakan metode statistik deskriptif.
5. Analisis Perbandingan: Membandingkan hasil analisis standar mitigasi sampah antariksa dari NASA dan ESA untuk menilai efektivitas strategi deorbit SpaceX.
4. Pembuatan Grafik: Membuat visualisasi tren deorbit, backlog satelit serta distribusi usia satelit sebelum deorbit menggunakan perangkat lunak Phyton.
5. Interpretasi Hasil: Menyusun interpretasi data untuk memahami sejauh mana implementasi strategi deorbit SpaceX dalam megakonstelasi Starlink berpengaruh terhadap mitigasi atau peningkatan sampah antariksa di orbit rendah Bumi (LEO).