

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi komunikasi global telah sangat dipengaruhi oleh kemunculan konstelasi satelit besar, seperti proyek Starlink dari SpaceX. Starlink dirancang untuk menyediakan akses internet yang cepat dan andal bagi banyak orang di seluruh dunia yang tidak dilayani dengan baik oleh infrastruktur komunikasi tradisional. Megakonstelasi ini terdiri dari beberapa satelit kecil yang terletak di orbit Bumi (LEO – *Low-Earth Orbit*), yang beroperasi pada jarak sekitar 550–1200 km di atas permukaan Bumi. Kekuatan sistem ini terletak pada kemampuannya untuk mengurangi latensi dan secara signifikan meningkatkan kecepatan transmisi data dibandingkan dengan satelit geostasioner yang beroperasi pada ketinggian yang lebih tinggi (Ren dkk, 2021). Namun, keberhasilan teknologi ini tidak sepenuhnya dapat dikaitkan dengan faktor lingkungan yang mempengaruhinya. Salah satu masalah utama adalah peningkatan signifikan dalam jumlah sampah antariksa di LEO. Contoh sampah antariksa termasuk komponen roket, pecahan dari satelit tabrakan, dan satelit serpihan yang sudah tidak berfungsi lagi. Menurut penelitian, setiap peluncuran satelit baru meningkatkan risiko tabrakan orbital, yang pada akhirnya meningkatkan jumlah kasus antariksa dan menciptakan efek domino yang dikenal sebagai *Syndrom Kessler*, yang mana sebuah objek orbital dapat menyebabkan berbagai tabrakan beruntun yang memperburuk situasi (Zhang dkk., 2022)

Megakonstelasi satelit mengacu pada konfigurasi ribuan satelit berukuran kecil yang diluncurkan terkoordinasi dan ini telah mengakibatkan adanya peningkatan signifikan dalam ketinggian objek di LEO, yang pada gilirannya telah memperbaiki lingkungan untuk antariksa. Sebagai contoh, pembangunan Starlink telah meningkatkan jumlah pertumbuhan objek di ruang angkasa, dan meskipun setiap satelit dibangun setelah misinya selesai, dampaknya terhadap lingkungan sekitarnya tidak dapat ditentukan (Ren dkk., 2021). Kemudian megakonstelasi seperti Starlink memerlukan manuver yang sering untuk mengorientasikan satelit dengan objek lain di orbit rendah Bumi. Misalnya, antara

Desember 2022 dan Maret 2023, Starlink harus melakukan 25.299 manuver tabrakan, yang dua kali lipat lebih banyak dibandingkan dengan periode enam bulan sebelumnya yang menunjukkan tingkat kepadatan dan risiko tinggi di orbit (Runnels, 2023). Sejumlah studi menunjukkan bahwa megakonstelasi seperti starlink meningkatkan risiko tabrakan di orbit dan membutuhkan manuver penghindaran yang lebih sering (Zhang dkk., 2022). Peningkatan ini tidak hanya meningkatkan jumlah manuver yang harus dilakukan tetapi juga memperparah pertumbuhan sampah antariksa di orbit LEO.

Starlink sebagai megakonstelasi terbesar telah menambah tantangan ini secara signifikan. Dengan ribuan satelit yang diluncurkan dan direncanakan dalam waktu singkat, potensi tabrakan dan jumlah manuver penghindaran semakin meningkat. SpaceX melaporkan ribuan manuver penghindaran yang harus dilakukan untuk menghindari tabrakan dengan sampah antariksa atau satelit lainnya. Hal ini menunjukkan betapa sibuknya ruang orbit dan seberapa besar potensi risiko yang dihadapi (Runnels, 2023).

Sampah antariksa telah menjadi isu serius dalam keberlanjutan aktivitas luar angkasa. Menurut laporan *European Space Agency* (ESA), terdapat lebih dari 36.000 objek berukuran lebih dari 10 cm yang terdeteksi di orbit Bumi, dengan ribuan lainnya berukuran lebih kecil yang sulit dipantau namun berpotensi merusak satelit aktif (ESA, 2023). Sebagai respon terhadap tantangan ini, SpaceX telah menerapkan strategi deorbit khusus pada proyek megakonstelasi Starlink untuk memastikan setiap satelit dapat keluar dari orbit secara terkendali setelah akhir masa pakainya. Strategi ini mencakup desain satelit dengan masa operasional terbatas dan dilengkapi dengan sistem propulsi ion berbasis krypton yang memungkinkan manuver deorbit aktif (SpaceX, 2023). Namun, efektivitas strategi ini masih menjadi perdebatan, terutama terkait keberhasilan deorbit yang sesuai dengan regulasi mitigasi sampah antariksa yang ditetapkan oleh badan antariksa internasional seperti NASA dan ESA (NASA, 2019; ESA, 2023).

Sampah antariksa tidak hanya mengancam keberlanjutan operasional satelit di LEO, tetapi juga berdampak pada keamanan misi luar angkasa, eksplorasi ruang angkasa, dan bahkan pengamatan astronomi dari Bumi. Misalnya, peningkatan

jumlah satelit di LEO menyebabkan gangguan pada observasi astronomi, dan citra teleskopik sering terganggu oleh jejak cahaya satelit yang melintas (Mróz dkk., 2022). Peningkatan jumlah sampah antariksa juga menimbulkan kekhawatiran akan keberlanjutan jangka Panjang penggunaan LEO. Studi menunjukkan bahwa meskipun terdapat upaya mitigasi melalui prosedur pengendalian pasca misi atau *post-mission disposal* (PMD), dampaknya terhadap penurunan risiko tabrakan masih terbatas dan tidak sepenuhnya mengimbangi lanjut pertumbuhan objek di LEO. Fenomena peningkatan sampah antariksa di LEO bukanlah masalah baru, tetapi skala dan kecepatan pertumbuhan yang dipicu oleh megakonstelasi seperti Starlink menambah kompleksitas situasi. Sampah antariksa adalah objek buatan manusia di luar angkasa yang tidak lagi berfungsi, termasuk satelit yang tidak aktif, pecahan hasil tabrakan dan sisa-sisa peluncuran. Lingkungan orbit yang penuh dengan sampah ini menimbulkan risiko besar bagi satelit operasional, stasiun luar angkasa internasional (ISS), serta misi ruang angkasa masa depan (Boley & Byers, 2021).

Dalam implementasi proyek Starlink, SpaceX mengoperasikan ribuan satelit di orbit rendah Bumi yang memiliki kemampuan manuver otonom untuk menghindari potensi tabrakan dengan objek lain di orbit LEO. Selain itu, konsekuensi lingkungan dari megakonstelasi satelit mencakup lebih dari sekadar sampah antariksa. Proses peluncuran satelit, yang melibatkan pembakaran bahan bakar roket, melepaskan emisi gas rumah kaca dan polutan ke atmosfer. Hal ini berdampak negatif pada upaya global untuk mengurangi emisi karbon dan memerangi perubahan iklim. Sebuah studi menunjukkan bahwa peluncuran yang intensif dapat menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan per pengguna, yang bahkan bisa melebihi emisi yang dihasilkan oleh infrastruktur internet darat (Osoro dkk., 2023)

Upaya mitigasi yang sedang dikembangkan mencakup system manuver penghindaran otomatis dan prosedur pengendalian pasca-misi (*post-mission disposal*), namun efektivitasnya masih perlu dievaluasi lebih lanjut. Solusi lain, seperti pengembangan system *space traffic management* dan teknologi

pemantauan yang lebih canggih, dapat membantu mengurangi risiko tabrakan dan menjaga keberlanjutan penggunaan LEO (Zhang dkk., 2022)

Teknologi mitigasi yang sedang dikembangkan untuk mengurangi dampak sampah antariksa meliputi pendekatan – pendekatan baru seperti system manuver penghindaran otomatis dan penggunaan bahan yang mudah terbakar untuk satelit yang habis masa operasinya. Namun, langkah – langkah ini memerlukan koordinasi global yang lebih besar serta investasi dalam teknologi dan infrastruktur pendukung. Implementasi solusi teknologi seperti system penghindaran otomatis memerlukan pembaruan terus menerus dan kecepatan reaksi yang tinggi untuk mengurangi risiko tabrakan.

Berdasarkan hal diatas, penelitian ini diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai efektivitas strategi deorbit yang diterapkan oleh SpaceX dalam proyek megakosntelasi Starlink dalam mengurangi akumulasi sampah antariksa di orbit rendah Bumi. Evaluasi dilakukan melalui analisis data operasional satelit Starlink, termasuk waktu peluncuran, durasi operasional, status akhir satelit serta waktu deorbit berdasarkan informasi yang tersedia secara publik di *Space-Track*. Penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai efektivitas strategi deorbit dalam mendukung keberlanjutan operasional megakonstelasi satelit, khususnya dalam mempertahankan populasi satelit yang masih aktif tanpa meningkatkan risiko akumulasi sampah antariksa di orbit rendah Bumi dan keberlanjutan operasional megakonstelasi satelit. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi komunitas ilmiah, otoritas antariksa dan pemangku kebijakan lainnya dalam menyusun strategi yang lebih efektif sehingga dapat meminimalisir resiko peningkatan kepadatan orbit dan potensi tabrakan di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana implementasi strategi deorbit yang diterapkan oleh SpaceX pada megakonstelasi satelit starlink dalam mitigasi sampah antariksa?

2. Apakah strategi deorbit satelit starlink telah sesuai dengan desain teknis yang dirancang oleh SpaceX?
3. Apa saja faktor yang memengaruhi efektivitas strategi deorbit Satelit Starlink?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan di atas, tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi implementasi strategi deorbit megakonstelasi satelit starlink dalam mitigasi sampah antariksa.
2. Menganalisis kesesuaian implementasi strategi deorbit tersebut dengan desain teknis yang sudah dibuat oleh SpaceX.
3. Mengidentifikasi kendala atau faktor yang memengaruhi efektivitas strategi deorbit Starlink.

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan yang telah disampaikan di atas, batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya akan membahas strategi deorbit yang diterapkan oleh SpaceX dalam konteks mitigasi sampah antariksa dari megakonstelasi satelit Starlink melalui analisis literatur dan dokumentas teknis yang relevan dari SpaceX dan Lembaga Antariksa Internasional.
2. Evaluasi strategi deorbit yang dilakukan dalam studi ini hanya mencakup aspek desain dan implementasi operasional yang diterapkan oleh operator satelit, khususnya terkait metode penurunan orbit setelah akhir masa operasional.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan manfaat berupa:

1. Menambah wawasan dan literatur ilmiah mengenai efektivitas strategi deorbit dalam mitigasi sampah antariksa, khususnya dalam megakonstelasi satelit starlink.

2. Memberikan evaluasi berbasis data mengenai implementasi strategi deorbit SpaceX yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan bagi pelaku kebijakan dalam memperbaiki upaya mitigasi sampah antariksa.
3. Meningkatkan kesadaran mengenai dampak pertumbuhan konstelasi satelit starlink terhadap lingkungan antariksa dan pentingnya strategi mitigasi sampah antariksa untuk keberlanjutan eksplorasi ruang angkasa di masa depan.