

Bab IV

Sampah Antariksa dan Peran Indonesia dalam Mitigasinya

Abdul Rachman, Judhistira Aria Utama, dan Aditya Abdilah Yusuf

A. Implikasi Negatif Teknologi Keantariksaan

Satelit-satelit buatan yang mengitari Bumi sejak lebih dari setengah abad yang lalu telah memberikan banyak dan beragam manfaat bagi manusia. Negara-negara di dunia telah memanfaatkannya untuk telekomunikasi, navigasi, militer, penelitian ilmiah, mitigasi bencana, pendidikan, kesehatan, dan lain-lain. Indonesia sejak lama telah memanfaatkan teknologi satelit, bahkan Indonesia adalah negara berkembang pertama yang memanfaatkannya. Namun, ada sisi lain yang perlu diwaspadai karena hadirnya teknologi ini ternyata telah menyebabkan sampah, tidak hanya terbatas di permukaan bumi saja tetapi juga sampai ke antariksa. Persoalan sampah antariksa ini bisa menimbulkan bencana antariksa yang mungkin menyebabkan musnahnya satelit itu sendiri.

A. Rachman, J. A. Utama & A. A. Yusuf.

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: abd001@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

Rachman, A., Utama, J. A. & Yusuf, A. A. Sampah Antariksa dan Peran Indonesia dalam Mitigasinya.

Dalam T. Djamaruddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan*

Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi (105–145). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1487

E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Puluhan ribu sampah sekarang bertebaran di luar angkasa, bahkan jika kita memperhitungkan sampah-sampah berupa serpihan-serpihan kecil berukuran kurang dari 1 cm maka jumlahnya sudah mencapai jutaan. Sampah-sampah yang berukuran besar bisa berupa satelit-satelit buatan yang tidak beroperasi lagi karena sudah habis masa kerjanya dan roket-roket yang sudah menjalankan tugasnya mengorbitkan satelit-satelit buatan tadi. Sementara itu, sampah yang kecil kebanyakan adalah serpihan-serpihan yang berasal dari satelit dan roket yang pecah.

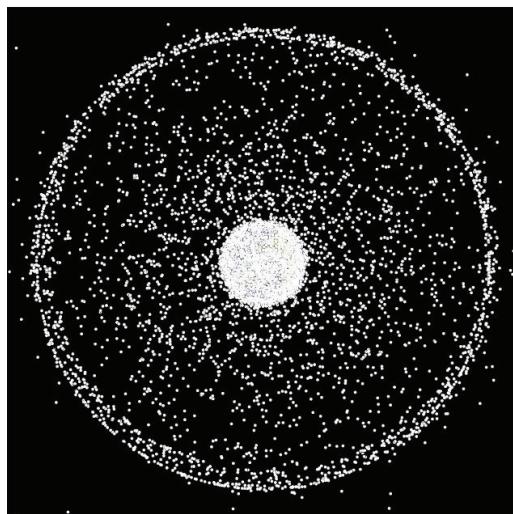
Sampah di antariksa juga bisa berupa benda apa saja yang terlepas di antariksa, baik yang tidak disengaja maupun disengaja. Sampah yang tidak disengaja terlepas (disebut *anomalous debris*) misalnya sarung tangan astronot, serpihan cat (*paint flakes*), dan pelindung permukaan (*surface coating*), dan lain-lain. Sementara itu, yang disengaja adalah sampah yang sengaja dilepaskan saat satelit dibawa oleh roket ke orbit atau sewaktu-waktu dalam masa beroperasinya satelit (disebut *mission-related debris*) seperti tutup lensa atau teleskop, baut, tanki bahan bakar yang sudah kosong, dan lain-lain. Selain benda-benda buatan yang masih mengorbit di antariksa, sampah tersebut juga mencakup benda-benda buatan yang sedang jatuh ke Bumi, dengan kata lain mengalami *reentry* di atmosfer.

Semua sampah di antariksa seperti dinyatakan di atas dinamakan sampah antariksa¹ yang definisinya adalah semua benda buatan yang mengorbit Bumi maupun yang sedang dalam proses jatuh ke Bumi namun tidak memiliki fungsi (UNOOSA, 2010). Jika kita asumsikan bahwa jumlah satelit yang saat ini beroperasi adalah 8000 buah (proyeksi berdasarkan data yang diperoleh dari www.ucsusa.org yang memakai data per Mei 2023 sebanyak 7560 buah), dengan menggunakan data katalog benda-benda antariksa buatan yang tersedia di Space-Track² bisa kita peroleh bahwa jumlah sampah berukuran di atas 10 cm adalah sekitar 20300 buah. Ini mencapai 70,4% dari seluruh benda antariksa buatan yang mengitari Bumi sekarang.

¹ Disebut dengan *space debris* atau *orbital debris* atau *space junk* dalam bahasa Inggris.

² Layanan ini beralamat di www.space-track.org yang dikelola oleh Departemen Pertahanan Amerika Serikat.

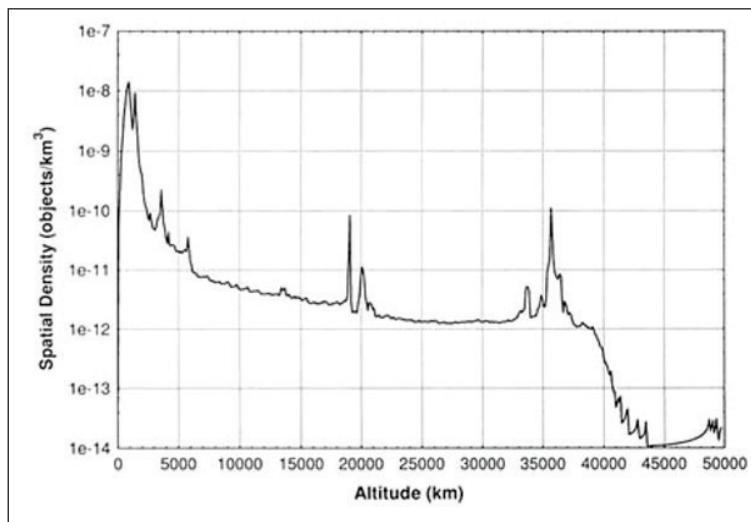
Sampah antariksa dapat dikelompokkan berdasarkan tiga parameter yakni ukuran, kecepatan, dan daerah orbitnya. Dari segi ukuran, sampah antariksa mulai dari beberapa meter (contohnya satelit yang sudah habis masa usianya dan roket tingkat atas yang sudah menyelesaikan misinya) hingga beberapa milimeter yang berasal dari pecahan satelit dan roket. Bahkan bisa lebih kecil lagi jika berupa serpihan cat dan bahan pelindung permukaan (*surface coating*) atau berupa *slag* atau debu yang berasal dari hasil pembakaran motor roket. Semakin kecil ukurannya, semakin banyak jumlah sampah tersebut. Dari sisi kecepatan, objek sampah antariksa dapat bergerak sekitar 7,6 km/detik (sekitar 27.000 km/jam) pada orbit rendah di bawah 500 km, dan menurun hingga sekitar 3,0 km/detik (sekitar 10.000 km/jam) pada orbit geostasioner di ketinggian sekitar 36.000 km dari permukaan Bumi. Jika dibandingkan dengan laju peluru yakni sekitar 0,8 km/dtk, laju sampah antariksa minimal 3,75 kali lebih cepat.



Sumber: NASA (t.t.)

Gambar 4.1 Pemandangan benda-benda buatan yang dilihat dari atas kutub utara bumi menggunakan data dari US Space Command Satellite Catalog pada tanggal 1 Januari 2019. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.

Adapun dari segi daerah orbit, sampah antariksa bisa berada di orbit rendah (di bawah 2000 km), di orbit menengah (dengan puncaknya di sekitar 20.000 km), dan di sekitar orbit geostasioner (di ketinggian sekitar 36.000 km). Kebanyakan sampah antariksa berada di orbit rendah yang disebut juga orbit LEO (*Low Earth Orbit*) dan di orbit geostasioner (disingkat orbit GEO) seperti terlihat pada Gambar 4.1. Pada gambar tersebut, daerah orbit LEO tampak sebagai daerah yang menutupi permukaan bumi (yang berada di tengah gambar) sedangkan daerah orbit GEO tampak seperti cincin dengan Bumi di pusatnya. Namun banyak juga sampah yang berada di orbit menengah yang disebut juga orbit MEO (*Medium Earth Orbit*) yang pada gambar terlihat di antara LEO dan GEO. Satelit-satelit aktif di MEO terkonsentrasi pada ketinggian sekitar 20200 km yang dinamakan orbit semi-sinkronos. Jadi, sampah antariksa biasanya ditemukan di tiga daerah itu seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2

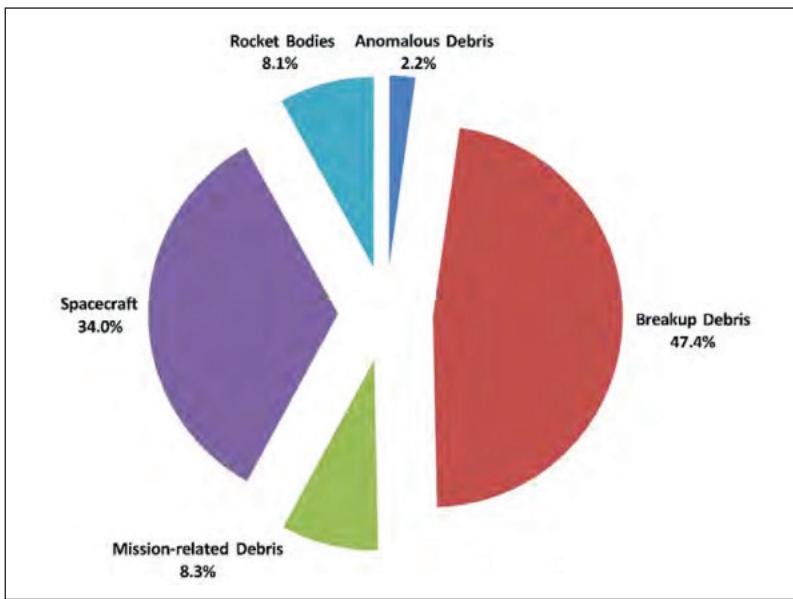


Sumber: National Research Council (1995)

Gambar 4.2 Kerapatan spasial benda-benda buatan berdasarkan US Space Command Satellite Catalog tahun 1994. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.

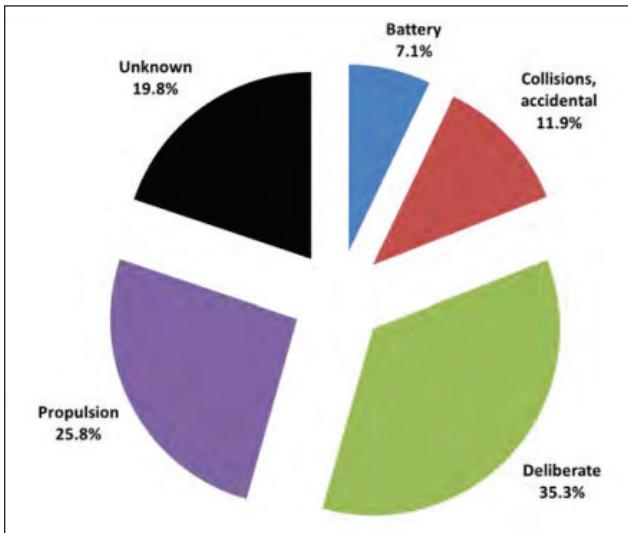
yang memperlihatkan tingginya kerapatan spasial benda-benda langit di ketiga ketinggian tersebut.

Hampir separuh dari populasi benda buatan di orbit adalah benda-benda kecil yang berasal dari satelit atau roket yang pecah (mengalami fragmentasi atau *breakup*). Penyebabnya bisa karena terjadi ledakan (*explosion*) pada benda bersangkutan atau karena tabrakan dengan benda antariksa lain (*collision*). Benda-benda kecil yang dihasilkan tersebut dinamakan *breakup debris* (atau *fragmentation debris*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3. Selanjutnya, satelit aktif dan satelit bekas (keduanya disebut sebagai *spacecraft* pada Gambar 4.3) menempati peringkat kedua dalam populasi diikuti oleh *mission-related debris* di peringkat ketiga. Roket bekas (*rocket bodies*) menempati peringkat keempat, sedang *anomalous debris* menempati posisi terakhir dalam hal persentase populasi benda buatan yang berada di orbit.



Sumber: NASA ODPO (2022)

Gambar 4.3 Komposisi dalam populasi benda buatan terkatalog yang berada di orbit. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.



Sumber: NASA ODPO (2022)

Gambar 4.4 Proporsi sampah antariksa yang berupa serpihan (breakup debris) terkatalog yang berada di orbit. Ini adalah seluruh sampah berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa tabrakan yang disengaja (*deliberate collision*) dan ledakan yang terkait dengan bahan bakar (*propulsion-related events*) adalah penyebab utama terbentuknya sampah antariksa yang berupa serpihan (*breakup debris*). Ledakan yang terkait bahan bakar terjadi pada satelit bekas atau roket bekas yang masih menyisakan bahan bakar di tangki atau saluran bahan bakarnya. Ini terjadi jika ada kebocoran atau percampuran komponen-komponen bahan bakar akibat pengaruh lingkungan antariksa terhadap satelit atau roket bersangkutan yang selanjutnya memicu *self-ignition*. Adapun tabrakan selain disengaja (*deliberate*) bisa juga terjadi tanpa sengaja (*accidental collision*). Tabrakan yang disengaja biasanya dilakukan dalam rangka pengujian senjata antariksa (disebut juga *anti-satellite test*), sedangkan tabrakan yang tidak disengaja terjadi jika benda bersangkutan ditabrak oleh benda

antariksa lainnya secara alami. Gambar 4.4 juga menunjukkan bahwa fragmentasi bisa terjadi karena baterai (*battery*) yang meledak dan bahwa cukup banyak (hampir 20% dari populasi) serpihan yang belum diketahui (*unknown*) dengan pasti apa penyebabnya.

Apa kontributor terbesar dalam populasi serpihan antariksa? Sebelum tahun 2007, kontributor terbesar sampah antariksa adalah serpihan karena ledakan. Akan tetapi semenjak itu serpihan akibat tabrakan antara dua benda antariksa mengambil alih status tersebut. Ini terjadi ketika China menembak satelit bekas mereka bernama FENGYUN-1C yang mengorbit di ketinggian sekitar 850 km untuk menguji sistem anti satelit mereka pada 11 Januari 2007 (NASA ODPO, 2007). Satelit berbobot 960 kg ini pecah berantakan menghasilkan lebih dari 3000 sampah baru yang tersebar di ketinggian 200 hingga di atas 4000 km. Karena ketinggiannya, hingga kini masih banyak sampah tersebut yang berada di orbit (belum jatuh ke Bumi dan habis terbakar). Adapun ledakan terbesar yang tercatat adalah yang dialami oleh roket bekas bernama STEP-2 pada tahun 1996 (NASA ODPO, 1996a). Roket tersebut meledak di ketinggian 625 km menghasilkan 754 serpihan yang tercatat dalam katalog.

Jika membandingkannya dengan sampah yang ada di bumi (sampah terestrial) maka sampah antariksa dan sampah terestrial bisa saja serupa dari segi material. Akan tetapi, bedanya adalah sampah antariksa selalu bergerak sangat cepat dan lokasinya sulit dicapai. Dari segi manajemen pun, pengelolaan sampah antariksa selalu melibatkan negara lain karena sifat ruang antariksa yang digunakan bersama-sama oleh seluruh dunia. Di samping itu, sampah antariksa bisa berusia sangat lama karena berada dalam ruang antariksa yang hampir vakum. Ini berimplikasi pada dampak dan upaya pembersihan sampah antariksa tersebut.

B. Dampak Sampah Antariksa

Keberadaan sampah antariksa ini menimbulkan berbagai dampak. Berikut ini akan dijelaskan dampak utama dan dampak lain dari keberadaan sampah antariksa tersebut.

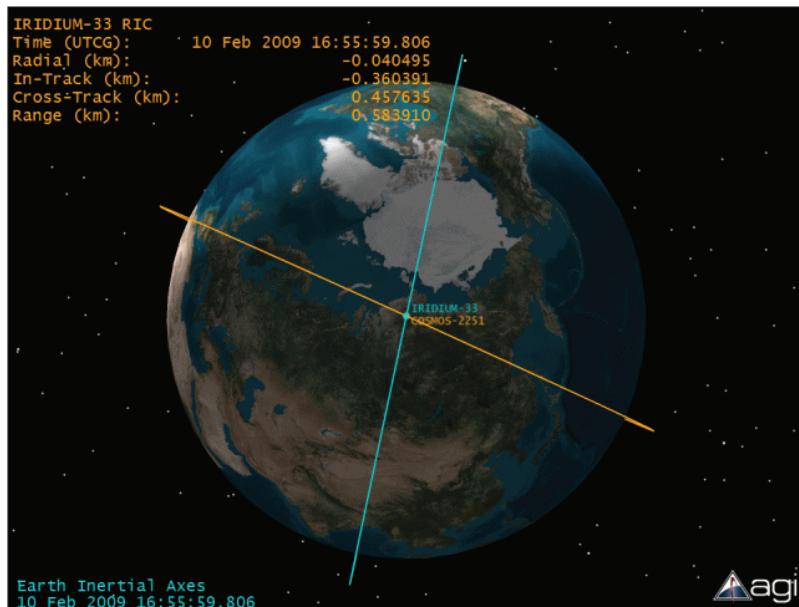
1. Dampak Utama

Pada dasarnya semua sampah antariksa berasal dari satelit atau roket yang beroperasi di orbit, maka, sebagai akibatnya, mereka berbagi daerah yang sama dengan satelit dan roket yang masih beroperasi mulai dari ketinggian 300 km hingga 40.000 km dari permukaan Bumi. Ini berarti sampah-sampah tersebut selain mengotori antariksa juga bisa mengganggu operasional satelit atau roket yang masih aktif. Dengan kelajuannya yang luar biasa, sampah yang berukuran sangat kecil pun memiliki energi yang cukup besar untuk menimbulkan kerusakan. Sebagai contoh, sampah dengan berat 5 kg di orbit LEO memiliki energi yang sebanding dengan sebuah mobil yang bergerak dengan kecepatan 100 km/jam. Dalam sebuah tabrakan antara dua benda antariksa buatan, rata-rata laju relatif antara kedua benda adalah sekitar 11 km/dtk (mendekati 40.000 km/jam). Oleh karena itu, tabrakan dengan sampah yang berukuran cukup besar mampu menghancurleburkan sebuah satelit dan menghasilkan ribuan sampah baru berupa serpihan. Kerusakan yang ditimbulkan oleh sampah yang menabrak sebuah satelit selain ditentukan oleh besar energi yang dilepaskan saat terjadi tabrakan juga bergantung pada desain benda antariksa tersebut, komponen yang ditabrak, dan geometri tabrakan.

Tabrakan antara dua benda antariksa buatan tanpa ada unsur kesengajaan (dengan kata lain secara insidental) yang pertama kali diketahui terjadi pada 24 Juli 1996. Pada hari itu, satelit CERISE milik Perancis ditabrak oleh sebuah serpihan antariksa di ketinggian sekitar 670 km. Serpihan ini sendiri berasal dari roket bekas milik *European Space Agency* (ESA) yang meledak pada Nov 1986. Serpihan tersebut menabrak *gravity-gradient boom* sehingga patah dan menghasilkan sebuah sampah baru (NASA ODPO, 1996b). Namun, hasil analisis data historis pada 2005 menunjukkan bahwa ada kasus tabrakan yang terjadi sebelumnya yakni pada Desember 1991 antara satelit bekas bernama COSMOS 1934 milik Rusia bertabrakan dengan sebuah serpihan dari satelit milik Rusia lainnya yang bernama COSMOS 926. Kejadian ini menghasilkan dua sampah baru. Tabrakan tanpa sengaja berikutnya adalah yang diyakini terjadi pada 10 Februari 2009 saat

satelit bekas milik Rusia bernama COSMOS 2251 menabrak satelit IRIDIUM 33 milik Amerika Serikat yang masih beroperasi menghasilkan lebih dari 2200 sampah baru. Ini adalah pertama kali dua benda antariksa yang masih utuh bertabrakan (Gambar 4.5). Selain tiga kasus tadi, ada dua kasus lagi yang teridentifikasi hingga Maret 2021. Ini semua membuktikan bahwa tabrakan antar benda buatan adalah hal yang nyata terjadi. Jika itu melibatkan satelit yang masih aktif, banyak kerugian yang dapat ditimbulkan. Ini dikarenakan beroperasinya sebuah satelit memerlukan biaya yang sangat mahal dan umumnya memiliki fungsi yang penting bahkan vital bagi sebuah negara. Lebih dari itu, sebuah satelit bisa bernilai vital secara internasional jika ia digunakan untuk kepentingan global.

Tabrakan dengan sampah yang berukuran kecil pun perlu diwaspadai. Kerusakan bisa terjadi dalam berbagai bentuk yang mampu

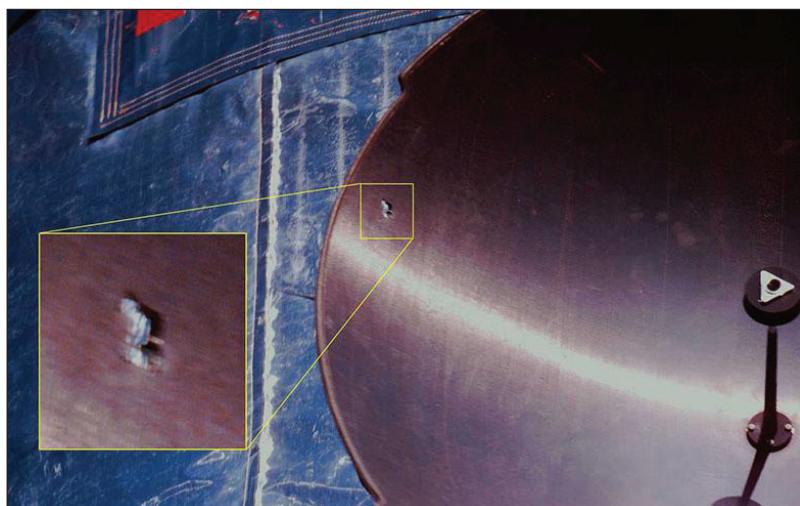


Sumber: Kelso (2024)

Gambar 4.5 Ilustrasi tabrakan antara IRIDIUM 33 dan COSMOS 2251 di atas Rusia bagian utara pada 10 Feb 2009

menurunkan kinerja atau kegagalan fungsi tertentu pada satelit yang tertabrak tersebut. Di LEO, bahkan sampah yang berukuran 1 mm tetap berpotensi merusak jika menabrak komponen satelit yang sensitif seperti lensa atau panel surya. Sebagai contoh adalah kerusakan pada piringan antena teleskop ruang angkasa Hubble yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Sampah berukuran kurang dari 1 mm bisa secara perlahan merusak *thermal surfaces* dan lensa. Oleh karena itu, satelit yang didesain dengan mempertimbangkan lingkungan sampah antariksa akan mampu bertahan lebih baik dibandingkan dengan satelit yang tidak didesain demikian. Namun, tidak semua komponen sensitif pada satelit mampu diproteksi dengan mudah seperti *photovoltaic arrays*, antena, dan sensor (National Research Council, 1995).

Probabilitas sampah antariksa menabrak sebuah satelit bergantung pada ukuran satelit dan fluks (jumlah per satuan luas per satuan waktu) sampah antariksa di daerah orbit satelit. Nilai probabilitas tersebut sebanding dengan luas penampang lintang satelit relatif terhadap



Sumber: NASA (2012)

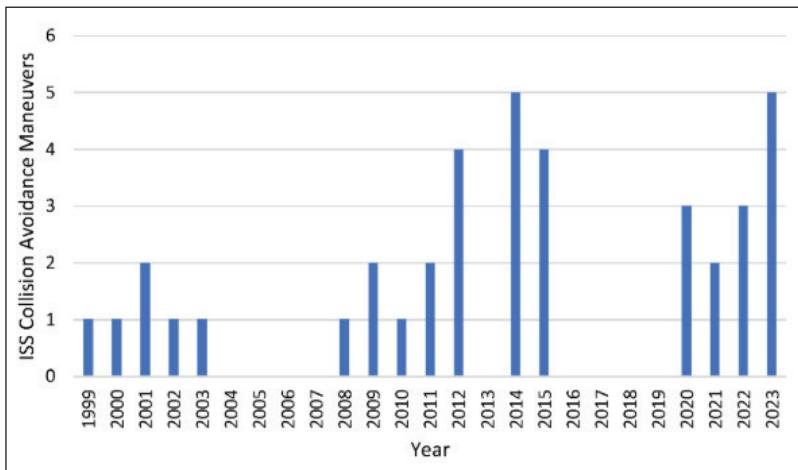
Gambar 4.6 Piringan antena Hubble Space Telescope yang ditembusi sampah antariksa berukuran kecil.

fluks sampah antariksa dan durasi satelit terpapar dalam lingkungan orbitnya. Nilai fluks itu sendiri sangat dipengaruhi oleh ketinggiannya dari permukaan bumi dan juga oleh aktivitas matahari. Studi yang menghitung fluks sampah antariksa pada tiga satelit Indonesia yang berada di LEO selama siklus matahari ke-25, yang saat ini berlangsung, telah dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa ekspektasi rata-rata jumlah tabrakan yang dialami oleh LAPAN-TUBSAT, LAPAN-A2, dan LAPAN-A3 adalah berturut-turut 1 tiap 5 th, 1 tiap 6,8 th, dan 1 tiap 8,6 th (Rachman, 2021).

Selain bisa berdampak pada satelit dan roket, sampah antariksa tentu saja bisa berdampak pada astronot. Astronot yang sedang menjalani misi di luar wahana (*extravehicular activities*, EVA³) sangat rentan terhadap tumbukan sampah berukuran kecil. Jika dirata-ratakan, sampah berukuran 1 mm mampu melubangi baju ruang angkasa yang dipakai oleh astronot Amerika Serikat (National Research Council, 1995). Bagi astronot yang berada di dalam wahana, lubang yang terjadi akibat tabrakan dengan sampah antariksa bisa mengakibatkan berkurangnya tekanan dalam kabin di samping efek negatif lainnya yang membahayakan jiwa. Untuk menghindari terjadinya musibah, *International Space Station* (ISS) melakukan manuver untuk menghindar yang disebut dengan *Predetermined Debris Avoidance Maneuver* (PDAM) setiap kali ada sampah yang diduga akan berada cukup dekat dengan stasiun tersebut. Manuver ini telah dilakukan sebanyak 38 kali hingga akhir 2023 (Gambar 4.7). Jika PDAM tidak sempat dilakukan, para astronot akan terpaksa berlindung di dalam wahana yang siap membawa mereka menjauh dari ISS. EVA akan ditunda jika diduga akan ada risiko dari sampah antariksa.

Terkait dengan upaya mitigasinya, sampah berukuran berukuran di antara 1 mm hingga 10 cm adalah yang paling sulit diantisipasi. Di satu sisi, sampah pada rentang ukuran ini dapat menghancurkan komponen satelit (yang diproteksi dengan baik sekali pun), tetapi di sisi lain keterbatasan teknologi saat ini tidak memungkinkan untuk membuat katalog sampah seukuran ini. Hal itu berbeda dengan

³ Dikenal juga dengan istilah *spacewalks*.



Sumber: NASA ODPO (2024)

Gambar 4.7 Histori manuver yang dilakukan ISS agar terhindar dari tabrakan dengan sampah antariksa hingga Nov 2013

sampah berukuran di atas 10 cm yang telah dapat dibuat katalognya sehingga posisinya dapat diprediksi. Keberadaan katalog itu memungkinkan satelit melakukan manuver untuk menghindari tabrakan. Ini dengan catatan bahwa satelit tersebut dilengkapi dengan motor (*thruster*) untuk bisa melakukan manuver.

2. Dampak Lain

Risiko lain dari sampah antariksa timbul jika ia jatuh ke Bumi. Hal ini hanya berlaku untuk sampah yang berada di orbit LEO yang selalu mengalami perlambatan gerak akibat gesekannya dengan atmosfer (efek penggeraman). Sampah yang berada di atas ketinggian 700 km bisa membutuhkan waktu hingga 100 tahun baru jatuh ke Bumi jika kerapatan massanya tinggi. Jika ketinggiannya 500 km, sampah itu bisa bertahan beberapa tahun di orbit sebelum jatuh. Namun, jika ketinggiannya di bawah 300 km, hanya butuh beberapa bulan agar sampah itu jatuh ke Bumi (Space Mission Analysis and Design [SMAD], 2005). Karena per definisi tiap sampah antariksa tidak

bisa dikendalikan, maka sampah tersebut bisa jatuh di mana saja di permukaan bumi.

Sampah yang jatuh akan terbakar akibat gesekan dan tekanan yang kuat di atmosfer. Saat tekanan sudah demikian tinggi, maka benda akan pecah dan selanjutnya masing-masing pecahan akan terus menurun ketinggiannya dan mengalami *aeroheating* hingga pecahan itu habis terbakar atau menyisakan komponen yang sampai ke permukaan bumi. Komponen yang terbuat dari bahan yang memiliki titik leleh (*heat of ablation*) tinggi seperti titanium atau stainless steel akan memiliki peluang yang lebih besar untuk sampai ke permukaan bumi dibandingkan komponen yang berbahan aluminium. Namun, meskipun ada komponen yang selamat sampai ke permukaan bumi, dengan luasnya lautan dan daerah yang umumnya tidak berpenghuni (seperti hutan dan gurun), maka risiko komponen itu menimpa manusia adalah sangat rendah. Meski demikian, sampah antariksa berukuran besar terlebih jika mengandung zat berbahaya seperti bahan radioaktif atau bahan beracun lainnya harus selalu diwaspadai. Satelit bernama COSMOS 954 milik Uni Soviet (sekarang Rusia) yang mengandung nuklir pernah jatuh di perairan utara Kanada pada tahun 1978 sehingga menimbulkan banyak pencemaran yang menghabiskan biaya besar untuk pembersihannya (Cohen, 1984).

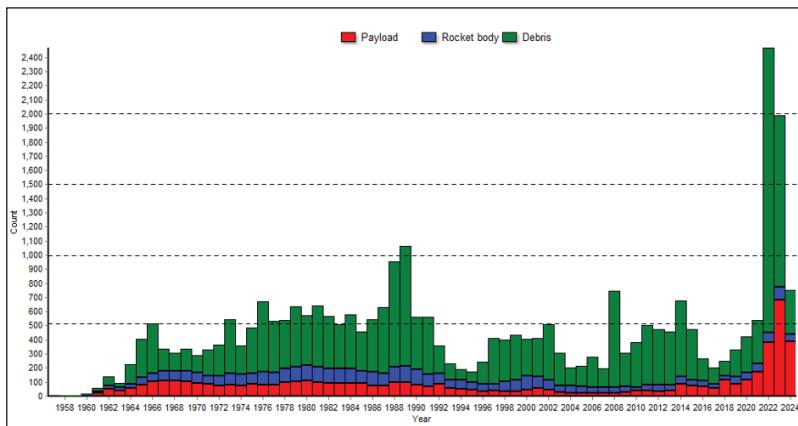
Hingga kini lebih dari 30 ribu sampah antariksa telah jatuh ke Bumi. Lebih dari 9000 di antaranya adalah satelit dan roket bekas yang berarti ukurannya cukup besar dan memiliki kemungkinan ada bagian yang sampai ke permukaan bumi. Sebagai akibat melonjaknya jumlah benda baru⁴ di orbit rendah dalam 5 tahun terakhir, terlihat jelas pula lonjakan drastis pada jumlah satelit bekas dan serpihan yang jatuh dalam periode itu seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8 (Huwaiddaa dan Rachman, 2023). Tujuh buah sampah yang berukuran cukup besar telah ditemukan jatuh di wilayah Indonesia terakhir kali pada tahun 2022. Untuk meminimalkan potensi kerusakan yang ditimbulkan oleh benda-benda berbobot sangat besar, tentu saja

⁴ Lonjakan ini terjadi karena adanya proyek mega-konstelasi satelit internet di orbit LEO yang dimulai dengan peluncuran konstelasi satelit Starlink pada tahun 2019 dan fragmentasi pada satelit COSMOS 1408 bulan November 2021.

opsi yang terbaik adalah jika proses *reentry*-nya bisa dikendalikan sehingga jatuh di tempat yang aman yakni di tengah samudera yang luas. Sebagai contoh adalah stasiun ruang angkasa MIR milik Rusia yang berbobot 120 ton yang dijatuhkan ke Samudera Pasifik pada 23 Maret 2001.

Risiko jatuhnya benda antariksa pada pesawat terbang pun perlu diwaspadai. Alasannya bukan hanya karena meningkatnya jumlah benda jatuh antariksa akan tetapi juga karena meningkatnya jumlah penerbangan pesawat (*air traffic*). Berdasarkan informasi yang dikeluarkan oleh *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, pada 25 Desember 1996 sebuah benda sebesar kelereng yang diduga merupakan pecahan dari sampah antariksa yang mengalami *reentry* menabrak kaca depan (*whindshield*) sebuah pesawat Boeing 757 yang sedang berada di ketinggian 30 ribu kaki. Insiden ini menyebabkan retaknya kaca bagian luar dan akhirnya dilakukan pendaratan darurat. Kekhawatiran atas dampak jatuhnya benda antariksa yang sering kali tidak dikendalikan terhadap keselamatan penerbangan mendorong dikeluarkannya *Montreal Recommendations on Aviation Safety and Uncontrolled Space Object Reentries* pada bulan Maret 2023.

Masih terkait dengan dampak jatuhnya benda antariksa adalah pengaruhnya pada atmosfer Bumi. Hal ini mulai menarik perhatian dunia semenjak terjadinya lonjakan jumlah benda jatuh dalam 5 tahun terakhir (lihat kembali Gambar 4.8). Para peneliti mengkhawatirkan efek buruk pada stratosfer setelah adanya penemuan bahwa 10% dari partikel aerosol yang ada di lapisan tersebut mengandung aluminium dan logam lain yang berasal dari *reentry* benda-benda antariksa buatan (Murphy et al, 2023). Menanggapi fenomena ini, ESA mengadakan workshop berjudul *Understanding the Atmospheric Effects of Spacecraft Re-entry* pada Januari 2024 dengan tujuan untuk menemukan kekosongan pengetahuan dalam *reentry modeling* dan untuk menjawab tantangan-tantangan berat yang muncul pada *reentry* benda-benda antariksa di atmosfer.

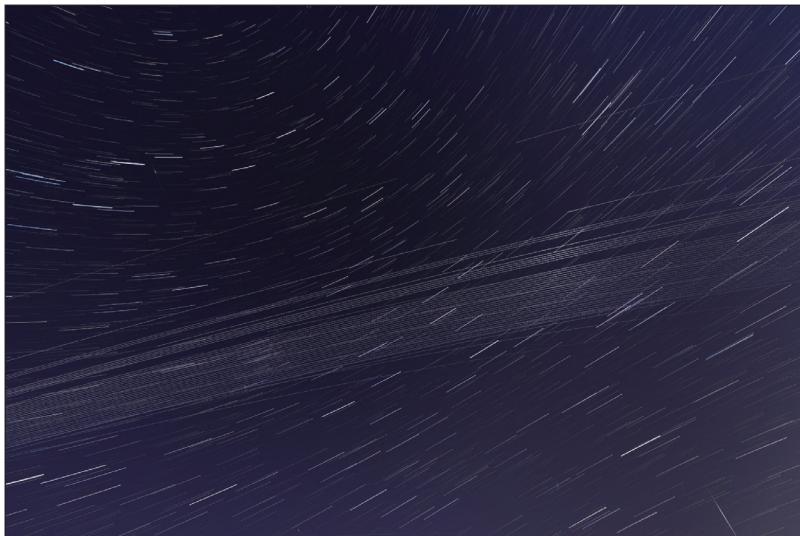


Sumber: Huwaida dan Rachman (2023)

Gambar 4.8 Jumlah benda jatuh antariksa sejak awal peluncuran satelit hingga tahun 2024. Payload menandakan satelit bekas, rocket body menandakan roket bekas, dan debris menandakan serpihan. Data diperoleh dari Space Track.

Dampak lain yang sudah terasa sejak lebih dari 30 tahun yang lalu adalah gangguan sampah antariksa pada pengamatan astronomi (Shara dan Johnston, 1986). Sampah antariksa dan satelit yang masih beroperasi bisa lewat di depan medan pandang kamera dan, jika kondisinya tepat, bisa memantulkan sinar matahari sehingga tampak berbahaya oleh pengamat di Bumi. Dalam citra yang direkam oleh kamera, cahaya tersebut akan tampak berupa jejak (*streak*) yang berupa garis lurus yang bisa mengurangi kualitas citra. Jejak-jejak sampah antariksa di citra-citra astronomi semakin banyak bermunculan apalagi setelah dimulainya proyek mega-konstelasi satelit⁵ pada tahun 2019 yang menargetkan puluhan ribu satelit di orbit rendah untuk layanan internet. Gambar 4.9 memperlihatkan salah satu citra astronomi yang dipenuhi oleh jejak satelit dan sampah antariksa. Selain itu, seperti sudah dibahas sebelumnya, sampah antariksa bisa bertabrakan dengan teleskop ruang angkasa yang jika itu terjadi, dampaknya bisa fatal. Di samping pengamatan optik, pengamatan radio astronomi pun bisa terganggu lewat derau elektromagnetik

⁵ Beberapa di antaranya adalah Starlink, OneWeb, Kuiper, SatNet.



Sumber: Möller (2020)

Gambar 4.9 Foto Angkasa yang Dipenuhi Konstelasi Satelit Starlink

yang mungkin muncul tanpa disengaja dari mega-konstelasi satelit sehingga menjadi sumber interferensi radio yang baru (Vruno et al, 2023).

Dampak lain pada pengamatan astronomi yang baru dibahas dalam beberapa tahun terakhir ini adalah meningkatnya kecerlangan langit akibat peningkatan drastis jumlah benda-benda antariksa buatan (satelit dan sampah antariksa). Penyebabnya adalah cahaya matahari yang dipantulkan dan dihamburkan oleh kumpulan besar benda-benda antariksa buatan menimbulkan efek *skyglow*⁶ baru. Bahkan sebelum dimulainya era mega-konstelasi satelit, Kocifaj et al (2021) menemukan bahwa dampak baru ini bisa mengakibatkan adanya peningkatan sekitar 10% pada kecerlangan langit yang hanya dipengaruhi oleh sumber-sumber cahaya alami. Nilai 10% tersebut adalah batas kritis tingkat polusi cahaya yang masih bisa diterima di sebuah observatorium astronomi menurut *International Astronomical*

⁶ *Skyglow* adalah cahaya di langit malam yang terlihat menyebar ke segala arah dan biasanya menjadi tanda tingginya tingkat polusi cahaya di suatu tempat.

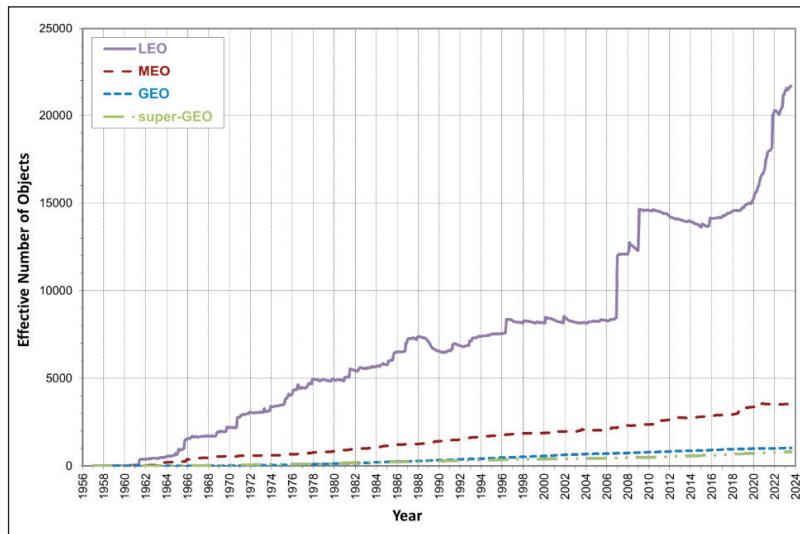
Union (IAU). Setelah dimulainya era mega-konstelasi satelit, investigasi yang dilakukan oleh Barentine et al (2023) menunjukkan bahwa peningkatan jumlah satelit dan sampah antariksa di berbagai ukuran akan mengakibatkan hilangnya data astronomi dan mengurangi peluang ditemukannya penemuan-penemuan baru dari pengamatan landas bumi akibat hilangnya sinyal-sinyal astrofisika di tengah derau pengamatan. Fenomena ini patut diwaspadai termasuk oleh bangsa Indonesia yang sedang membangun sebuah observatorium nasional di kaki Gunung Timau di Kab. Kupang, Nusa Tenggara Timur (Mumpuni et al, 2017). Fasilitas bernama Observatorium Nasional Timau yang ditargetkan mulai beroperasi pada tahun 2025 ini akan dilengkapi dengan sebuah teleskop dengan cermin berukuran 3,8 meter sebagai instrumen utamanya. Ketika selesai dibangun, teleskop tersebut akan menjadi teleskop terbesar di Asia Tenggara.

C. Perkembangan Populasi Sampah Antariksa

Sebelum membahas tentang bagaimana perkembangan populasi sampah antariksa dari waktu ke waktu, mari kita lihat bagaimana para peneliti bisa mengetahui kondisi populasi tersebut pada suatu saat. Populasi dan karakteristik sampah antariksa diperoleh dari beragam teknik pengamatan dan pengukuran (dikarenakan lebarnya rentang ukuran dan ketinggian sampah antariksa) dan pemodelan. Secara umum, pengamatan dengan radar digunakan untuk benda-benda di ketinggian rendah (orbit LEO), sedangkan pengamatan dengan teleskop optik digunakan untuk benda-benda di orbit tinggi (MEO dan GEO). Adapun untuk benda-benda yang sangat kecil, pengukuran dilakukan secara *in situ* dengan mengirim alat pengukur ke antariksa lalu alat tersebut dipulangkan ke Bumi untuk dianalisis. Sebagai contoh, Departemen Pertahanan Amerika Serikat memakai radar dan teleskop optik dalam *U.S. Space Surveillance Network* (SSN) untuk membuat katalog benda-benda antariksa buatan berukuran minimal 5 hingga 10 cm di LEO dan 1 m di GEO sedangkan Badan Antariksa Amerika Serikat (NASA) mengirim satelit khusus ke luar angkasa untuk mengukur dimensi dan distribusi orbit benda-benda yang lebih kecil (NASA, 2008).

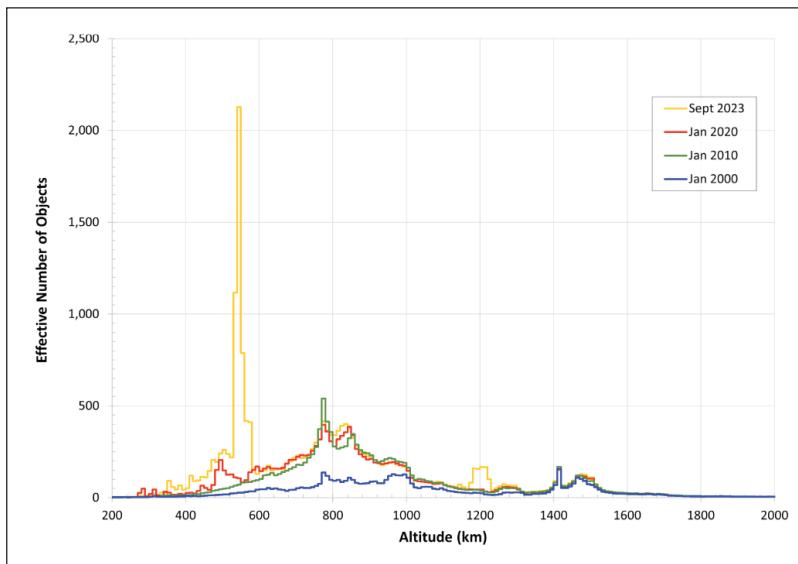
Dibandingkan dengan daerah orbit lain, LEO adalah daerah yang paling padat dan paling dinamis seperti terlihat pada Gambar 4.10. Pada gambar tersebut, LEO mencakup benda-benda dengan ketinggian lebih rendah atau melewati 2000 km; MEO mencakup benda-benda dengan ketinggian di antara atau melewati dari 2000 km hingga 35586 km; GEO mencakup benda-benda dengan ketinggian di antara atau melewati dari 35586 km hingga 35986 km; super-GEO mencakup benda-benda dengan ketinggian di antara atau melewati 35986 km hingga 600 ribu km. Jumlah efektif yang digunakan pada gambar berarti bahwa nilainya juga memperhitungkan berapa nilai fraksi orbit suatu benda di dalam rentang daerah orbit yang disebutkan sebelumnya. Dua lonjakan besar setelah tahun 2006 menandakan kasus fragmentasi yang disengaja pada Januari 2007 dan kasus insidental pada Februari 2009. Efek proyek mega-konstelasi satelit di orbit LEO yang dimulai tahun 2019 jelas terlihat pada gambar tersebut.

Gambar 4.11 menunjukkan secara lebih detail bagaimana dinamisnya daerah orbit LEO itu sejak tahun 2000. Peningkatan



Sumber: NASA ODPO (2023)

Gambar 4.10 Jumlah efektif benda antariksa buatan di orbit bumi dalam katalog SSN. LEO menandakan orbit rendah, MEO orbit menengah, GEO orbit geosinkron.



Sumber: NASA ODPO (2023)

Gambar 4.11 Jumlah efektif benda antariksa buatan yang per ketinggian 10 km antara 200 hingga 2000 km pada empat waktu yang berbeda yang ada dalam katalog SSN.

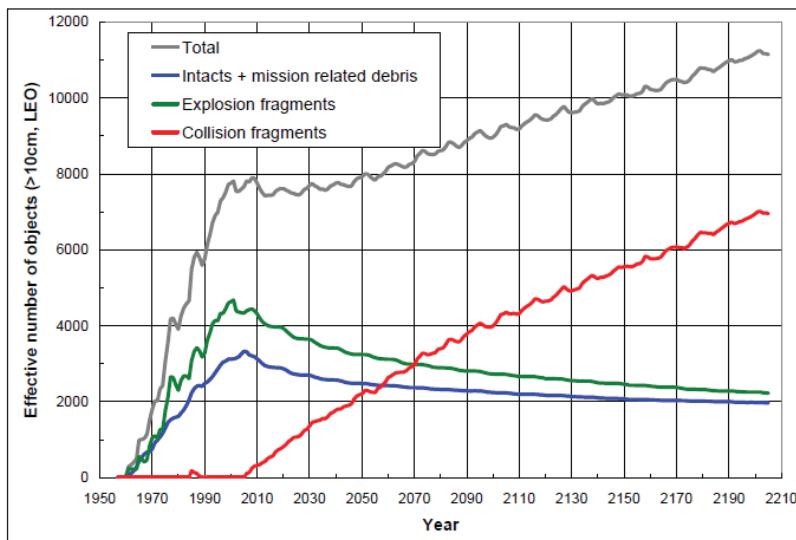
sejak 2000 ke 2010 didominasi oleh serpihan yang berasal dari kasus FENGYUN-1C pada Januari 2007 dan kasus COSMOS 2251 vs IRIDIUM 33 pada Februari 2009. Peningkatan sejak 2010 ke 2020 dikarenakan mulainya proyek konstelasi satelit Starlink dan proliferasi satelit CubeSat⁷ di bawah ketinggian sekitar 650 km. Peningkatan sejak 2020 hingga 2023 disebabkan oleh hal yang sama yaitu konstelasi satelit Starlink dan proliferasi satelit CubeSat di bawah ketinggian 650 km ditambah dengan peningkatan baru di sekitar 1200 km akibat konstelasi OneWeb.

Katalog SSN hanya berisi benda-benda berukuran di atas 10 cm dan itu pun tidak lengkap karena banyak benda yang tidak bisa dimasukkan ke dalam katalog karena keterbatasan akurasi orbit yang bisa didapat dari pengamatan. Untuk data yang lebih lengkap

⁷ CubeSat adalah suatu klas satelit kecil dengan *form factor* berupa kubus dengan panjang sisi 10 cm. Satelit-satelit ini memiliki bobot kurang dari 2 kg per unit.

dan untuk populasi sampah berukuran di bawah 10 cm kita bisa memakai data yang disediakan oleh ESA di situs web-nya (www.esa.int). Berdasarkan situs itu, hingga Desember 2023, jumlah benda yang ukurannya di atas 10 cm diperkirakan sebanyak 36500; antara 1 hingga 10 cm diperkirakan sebanyak 1 juta; antara 1 mm hingga 1 cm diperkirakan sebanyak 130 juta. Jumlah benda-benda kecil ini diketahui dari pengukuran dan pemodelan.

Adanya lonjakan jumlah benda buatan di orbit rendah dalam 5 tahun terakhir semakin menambah kekhawatiran akan dampak sampah antariksa. Apalagi mengingat riset yang dilakukan oleh Liou dan Johnson (2010) menunjukkan bahwa jumlah benda antariksa di LEO akan terus bertambah sekalipun tidak ada peluncuran baru sejak 2008 (Gambar 4.12). Meningkatnya kepadatan benda di LEO secara terus menerus ini akhirnya akan memicu terjadinya tubrukan berantai antar benda-benda antariksa buatan (*cascading effect of collision*) yang dinamakan *Kessler Syndrome* (Kessler dan Cour-Palais, 1978).



Sumber: NASA (2008)

Gambar 4.12 Jumlah efektif benda antariksa buatan di orbit LEO berukuran di atas 10 cm yang diperoleh dari simulasi komputer berdasarkan asumsi tidak ada peluncuran baru

D. Upaya Internasional untuk Memitigasi Dampak Sampah Antariksa

Dunia telah melakukan berbagai upaya untuk meminimalkan dampak negatif berupa kerugian dan kerusakan yang dimungkinkan oleh sampah antariksa dan untuk menjamin bahwa misi keantariksaan akan terus bisa berlangsung di masa depan. Upaya-upaya tersebut dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori yakni melakukan mitigasi (pencegahan), remediasi (pengobatan), dan pemantauan (*monitoring*) pada populasi sampah antariksa. Sejak tahun 1994 sampah antariksa telah menjadi agenda khusus di *Scientific and Technical Subcommitte* (STSC) PBB yang bersidang sekali setiap tahun. Sidang terakhir STSC adalah sidang ke-61 yang berlangsung pada 29 Januari hingga 9 Februari 2024.

1. Pedoman-Pedoman Mitigasi (*Mitigation Guidelines*)

Mitigation guidelines berisi seperangkat pedoman mitigasi yang pembahasannya sudah dimulai sejak tahun 1980an. Sejauh ini beberapa negara dan organisasi telah menempuh cara ini di antaranya Amerika Serikat, Rusia, Jepang, dan European Space Agency (ESA). PBB pun membuat pedoman sendiri yang diterima secara resmi pada tahun 2007 untuk secara sukarela diimplementasikan oleh negara-negara anggotanya. Pedoman ini berdasarkan pedoman-pedoman yang sudah dikembangkan oleh berbagai negara dan organisasi dengan memperhitungkan perjanjian-perjanjian dan prinsip-prinsip PBB di bidang antariksa.

Pedoman yang dibuat oleh PBB terdiri dari tujuh poin (UNOOSA, 2010) sebagai berikut.

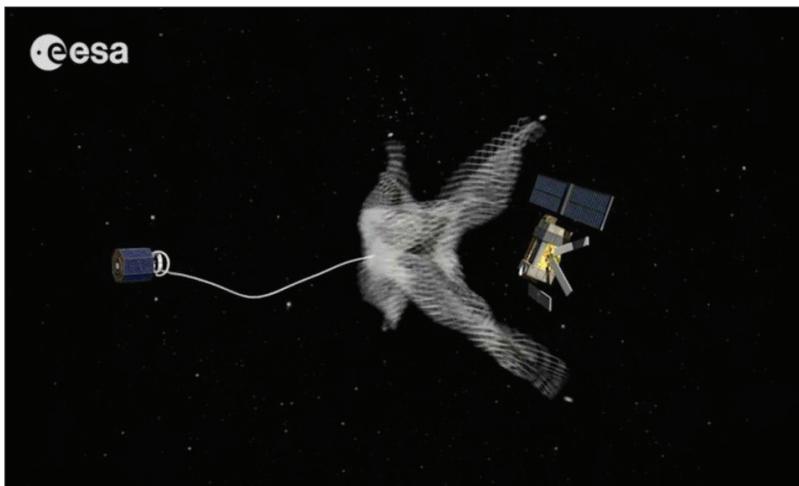
- 1) membatasi sampah yang dihasilkan dari operasi normal (*mission-related debris*);
- 2) meminimalkan potensi terjadinya ledakan (*break-ups*) selama benda beroperasi;
- 3) membatasi peluang terjadinya tabrakan yang tidak disengaja di orbit;

- 4) menghindari penghancuran benda antariksa dan aktivitas lain yang membahayakan di orbit;
- 5) meminimalkan potensi terjadinya ledakan (*break-ups*) setelah benda beroperasi;
- 6) membatasi jangka waktu satelit dan roket bekas berada di orbit rendah (LEO) setelah benda-benda tersebut selesai beroperasi; dan
- 7) membatasi jangka waktu satelit dan roket bekas berada di orbit geosinkron (GEO) setelah benda-benda tersebut selesai beroperasi.

Hingga kini, mitigasi sampah antariksa sudah memberikan banyak hasil. Ini tampak dari jumlah *mission-related debris* yang cenderung tetap sejak tahun 1986 kendati jumlah satelit terus bertambah.

2. Remediasi (*Remediation*)

Namun, studi teoritis yang dilakukan sejak tahun 2005 menunjukkan bahwa mitigasi saja tidak akan cukup untuk menstabilkan pertumbuhan jumlah sampah antariksa karena jumlahnya akan terus meningkat bahkan sekalipun tidak ada peluncuran satelit baru lagi. Oleh karena itu, tindakan lain perlu dilakukan yakni melalui remediasi (pengobatan) pada populasi sampah antariksa. Hal itu dilakukan dengan cara mengambil sampah (khususnya di orbit rendah) yang menjadi target untuk dijatuhkan ke Bumi. Tindakan tersebut penting untuk dilakukan karena bersifat lebih nyata dan tegas sehingga dinamakan juga *active debris removal* (ADR). Hingga saat ini sudah banyak konsep yang diusulkan untuk misi ADR, misalnya dengan menggunakan satelit khusus yang memiliki lengan robotik untuk menangkap sampah yang ditarget lalu menariknya ke atmosfer. Metode lain adalah menggunakan jaring yang dilemparkan ke target untuk membungkusnya kemudian satelit yang terhubung dengan tali (*tether*) menariknya ke atmosfer (Gambar 4.13). Akan tetapi, berbeda dengan mitigasi sampah antariksa yang sudah berjalan selama puluhan tahun



Sumber: European Space Agency (2013)

Gambar 4.13 Ilustrasi remediasi dengan menggunakan jaring dan tali untuk menjatuhkan sampah antariksa.

dan sudah memberikan hasil yang signifikan, remediasi masih dalam tahap percobaan hingga saat ini.

Sebagaimana umumnya penyakit, remediasi sampah antariksa lebih sulit dilakukan daripada mitigasi. Setiap konsep yang ditawarkan untuk ADR bukan hanya harus layak secara teknis tapi juga terjangkau secara ekonomi dan bisa diterima secara politis oleh masyarakat internasional. Aspek politis ini penting diperhitungkan karena kemampuan mengambil sampah bisa saja disalahgunakan misalnya dengan diam-diam mengambil satelit pihak lain atau mengacaukan misinya.

3. Pemantauan Sampah Antariksa (*Monitoring*)

Mitigasi dan remediasi hanya bisa dilakukan secara efektif jika populasi dan karakteristik sampah antariksa kita ketahui dengan baik. Untuk itu, kemampuan untuk melakukan pengamatan dan pemantauan perlu selalu diperkuat. Saat ini semakin banyak institusi yang mampu melakukan pengamatan sendiri satelit dan sampah antariksa di berbagai negara, termasuk Indonesia (diterangkan di

bagian akhir bab ini). Dengan demikian maka jaringan pengamatan sampah antariksa internasional pada dasarnya bisa diwujudkan. Hal ini akan sangat mendukung kelengkapan dan akurasi data orbit dan sikap benda-benda antariksa buatan yang diperlukan dalam rangka *space situational awareness*⁸.

E. Sampah Antariksa yang Jatuh di Indonesia

Setiap benda antariksa yang mengitari Bumi selalu melewati ekuator dalam satu kali revolusinya. Dengan demikian maka otomatis Indonesia yang memiliki wilayah terpanjang di ekuator (lebih dari 5000 km) menjadi negara yang secara umum berpeluang besar untuk kejatuhan benda antariksa yang mengalami *reentry*. Hingga saat ini ada tujuh buah sampah antariksa yang ditemukan jatuh di wilayah Indonesia (Djamaluddin, 2021). Dua di antaranya ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Sumber: Sumber: Djamaluddin (2021)

Gambar 4.14 Sampah antariksa bekas tabung bahan bakar roket Uni Sovyet/Rusia yang jatuh di Gorontalo 1981 (kiri) dan di Lampung 1988 (kanan).

⁸ *Space situational awareness* (SSA) adalah pengetahuan, karakterisasi, dan praktik penjejakan benda-benda antariksa dan lingkungan tempatnya beroperasi.

Berikut daftar sampah antariksa yang ditemukan di Indonesia dan telah diidentifikasi.

1. Sampah antariksa yang jatuh di Gorontalo tahun 1981

Tabung bahan bakar roket jatuh di Gorontalo pada 16 Maret 1981. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa objek tersebut adalah bagian roket SL-8 milik Uni Sovyet/Rusia dengan nomor katalog 11610. Roket ini digunakan untuk meluncurkan satelit INTERCOSMOS 20 pada 1 November 1979.

2. Sampah antariksa yang jatuh di Lampung tahun 1988

Tabung bahan bakar bekas roket jatuh di lampung pada 16 April 1988. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa benda jatuh tersebut adalah bagian roket SL-4 milik Uni Sovyet/Rusia dengan nomor katalog 19042. Roket ini digunakan untuk meluncurkan satelit COSMOS 1938 pada 11 April 1988.

3. Sampah antariksa yang jatuh di Bengkulu tahun 2003

Pada 13 Oktober 2003 ada laporan benda jatuh di Bengkulu. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa benda jatuh tersebut adalah pecahan roket CZ-3 milik RRT dengan nomor katalog 23416. Roket ini digunakan untuk meluncurkan satelit DFH-3 1 pada 29 November 1994.

4. Sampah antariksa yang jatuh di Madura tahun 2016

Beberapa objek antariksa jatuh di perairan Madura pada 26 September 2016. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa benda jatuh tersebut adalah bagian roket Falcon 9 dengan nomor katalog 41730 milik Space X Amerika Serikat. Roket itu digunakan untuk meluncurkan satelit JCSAT 16 pada 14 Agustus 2016.

5. Sampah antariksa yang jatuh di Sumatera Barat tahun 2017

Pada 18 Juli 2017 ada dua objek antariksa jatuh di dua lokasi berbeda di Sumatera Barat. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa kedua objek tersebut berasal dari pecahan roket CZ-3A dengan nomor katalog 31116 milik RRT. Roket digunakan untuk meluncurkan satelit Beidou M1 pada 13 April 2017.

6. Sampah antariksa yang jatuh di Kalimantan Tengah tahun 2021
Sebuah objek berlogo CNSA (*Chinese National Space Administration*) ditemukan warga pada 4 Januari 2021. Semula objek tersebut diduga bagian roket RRT yang melintas wilayah tersebut saat jatuh awal Januari. Namun, setelah gambar lengkap diperoleh dan didukung konfirmasi dari CNSA, disimpulkan bahwa objek tersebut adalah *payload fairing* (pelindung muatan satelit) roket Long March/CZ-8 milik RRT. Roket LM/CZ-8 diluncurkan pada 22 Desember 2020 dan bagian *fairing* dilepaskan sebelum roket mencapai orbit dan jatuh di perairan dekat Selat Karimata. Arus laut membawa objek yang relatif ringan tersebut ke Selat Karimata lalu Laut Jawa dan terdampar di pantai Kalimantan Tengah.
7. Sampah antariksa yang jatuh di Sanggau, Kalimantan Barat tahun 2022
Pada 30 Juli 2022 dikabarkan sampah antariksa berkode CZ-5B milik RRT akan segera jatuh. CZ-5B adalah bekas roket peluncur modul stasiun antariksa RRT yang diluncurkan pada 24 Juli 2022. Malam itu Tim Pusat Riset Antariksa BRIN terus memantau lintasan akhir orbit CZ-5B yang melalui Indonesia. Akhirnya diperoleh konfirmasi dari USSPACECOM di Space-Track bahwa objek telah jatuh di samudera Hindia pada pukul 23.45 WIB.

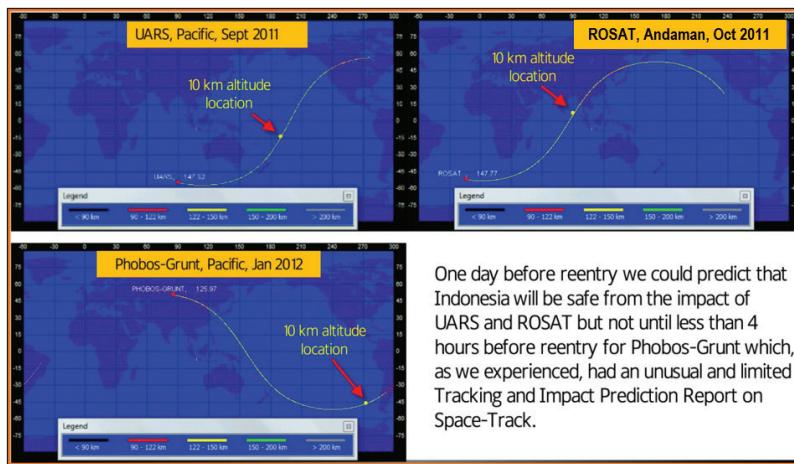
F. Peran Indonesia

1. Peran Pemerintah dan Swasta

Pemerintah melalui Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)⁹ telah melakukan pemantauan dan identifikasi benda jatuh antariksa yang berpotensi jatuh di Indonesia sejak awal milenium ini (Djamaluddin, 2004). Hal itu dilakukan dengan mengidentifikasi benda-benda yang ditemukan di beberapa lokasi di Indonesia dan memantau jatuhnya beberapa sampah antariksa. Pada awal tahun 2000-an hingga 2008 pemantauan dilakukan menggunakan data dan program komputer yang tersedia di internet. Pada tahun 2009 LAPAN

⁹ Sejak 2021 LAPAN bersama beberapa badan dan lembaga negara yang lain berintegrasi ke Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

mula mengembangkan program komputer sendiri yang dinamakan Track-it memakai data orbit dari Space-Track dan SGP4 Pascal Library dari Celestrak¹⁰ yang berisi kode program untuk mengolah data orbit yang telah diperoleh (Rachman, 2010). Track-it digunakan sejak 2010 untuk melakukan pemantauan virtual secara otomatis terhadap benda-benda antariksa buatan yang diperkirakan berpotensi jatuh di wilayah Indonesia. Meskipun demikian, Track-it sebenarnya mampu memantau potensi jatuh benda di seluruh dunia. Track-it juga mendukung pengoperasian secara manual seperti umumnya program-program penjejak satelit yang tersedia di internet. Situs web pun dikembangkan sebagai media diseminasi hasil pemantauan dan informasi-informasi mendasar tentang benda jatuh antariksa dan bagaimana peran pemerintah dalam menanggapi isu itu (Neflia et al, 2010). Gambar 4.15 menunjukkan beberapa kasus pemantauan yang menggunakan Track-it.



Sumber: Rachman (2014)

Gambar 4.15 Pemantauan benda jatuh antariksa yang dilakukan pemerintah Indonesia setelah tahun 2010. Ketiga benda antariksa yang dipantau ini berbobot beberapa ton ketika *reentry*.

¹⁰ Celestrak adalah situs web yang menyediakan data dan sumber daya lainnya secara gratis dan beralamat di www.celestrak.org.

Riset untuk pengamatan satelit pertama kali dilakukan pada tahun 2014 dengan tujuan untuk mengurangi ketergantungan data orbit dari pihak luar dan meningkatkan akurasi hasil analisis orbit yang dilakukan oleh pemerintah terkait dengan isu benda jatuh antariksa. Pada riset yang diarahkan pada aspek astrometri dan fotometri ini, pengamatan medan lebar dilakukan dengan binokuler dan kamera digital, sedangkan pengamatan medan sempit dilakukan memakai teleskop dengan dudukan ekuatorial. Dari penelitian tersebut, diperoleh hasil yang cukup memuaskan pada sistem dengan kamera digital, berbeda halnya dengan sistem dengan binokuler dan teleskop (Dani et al, 2015).

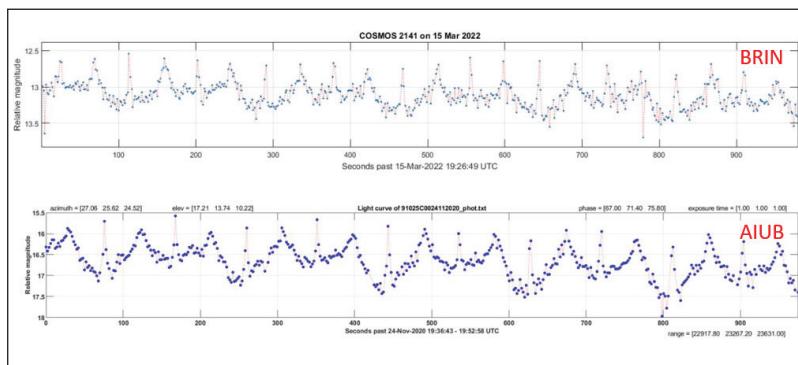
Riset yang memakai teleskop untuk mengamati satelit dan sampah antariksa kembali dilakukan setelah tahun 2020 menggunakan teleskop-teleskop yang dipasang di Kab. Kupang, NTT. Teleskop-teleskop ini adalah bagian dari Observatorium Nasional Timau. Diperoleh hasil yang cukup memuaskan baik dari aspek astrometri (Dio et al, 2022) maupun fotometri (Rachman et al, 2023). Teleskop-teleskop yang dipakai berukuran 10 hingga 50 cm dan diletakkan di dalam sebuah kubah dengan model *clamshell* (Gambar 4.16). Dari astrometri diperoleh prototipe untuk *pipeline* yang bisa dipakai untuk



Foto: Koleksi BRIN Kupang

Gambar 4.16 Sebagian dari instrumen yang digunakan untuk pengamatan satelit dan sampah antariksa oleh pemerintah Indonesia sejak tahun 2020.

mendeteksi secara otomatis jejak satelit yang terdapat di citra lalu mengidentifikasi objeknya dan selanjutnya menentukan bagaimana orbit awalnya. Adapun dari fotometri, telah berhasil diperoleh kurva cahaya¹¹ yang cukup representatif sebab profilnya bersesuaian dengan kurva cahaya yang diperoleh dari sistem yang sudah mapan dengan ukuran teleskop yang jauh lebih besar seperti terlihat pada Gambar 4.17. Kurva cahaya selanjutnya dianalisis untuk mengetahui sikap (*attitude*) benda yang diamati yang informasinya penting dalam upaya mitigasi maupun *on-orbit servicing*. Rencananya, teleskop 3.8 meter di Observatorium Nasional Timau juga akan digunakan untuk pengamatan khusus satelit dan sampah antariksa. Pengamatan rutin akan dilakukan memakai teleskop-teleskop yang lebih kecil. Dengan keunikan lokasi dan langitnya yang tergolong sangat cerah, Observatorium Nasional Timau diharapkan akan melengkapi observatorium-observatorium astronomi lainnya di permukaan bumi (Priyatikanto et al, 2023).



Keterangan: Menggunakan teleskop berukuran 20 cm milik BRIN di Kupang (atas); teleskop berukuran 1 meter milik Astronomical Institute of University of Bern (AIUB) di Swiss (bawah).

Sumber: Rachman et al. (2023)

Gambar 4.17 Perbandingan kurva cahaya satelit COSMOS 2141

¹¹ Kurva cahaya adalah grafik perubahan kecerlangan suatu benda terhadap waktu.

Selain melalui pemantauan dan pengamatan sampah antariksa, para operator satelit geostasioner di Indonesia yang sebagian adalah perusahaan swasta juga turut berperan dalam mitigasi melalui disposisi satelit-satelit mereka yang sudah habis masa kerjanya. Secara keseluruhan, meskipun ada beberapa kasus kegagalan, operator satelit di Indonesia umumnya berupaya untuk mematuhi pedoman internasional dan meningkatkan praktik manajemen satelit mereka.

2. Potensi Perguruan Tinggi

Dengan dimungkinkannya penggunaan teleskop kecil untuk pengamatan satelit dan sampah antariksa, maka diharapkan akan banyak perguruan tinggi-perguruan tinggi di Indonesia yang bisa turut berkontribusi. Selain itu, teleskop kecil lebih fleksibel dalam pengoperasian dan pemeliharaannya yang membuatnya ideal untuk institusi pendidikan yang memiliki sumber daya terbatas. Dewasa ini telah cukup banyak perguruan tinggi di Indonesia yang memiliki teleskop dengan dudukan yang mampu menjelak bintang dengan baik dan dilengkapi dengan kamera astronomi bersensor CCD atau CMOS.

Di masa depan bisa dibangun sebuah jaringan pengamatan yang terdiri dari stasiun-stasiun pengamatan antariksa milik pemerintah (dalam hal ini BRIN) yang didukung oleh teleskop-teleskop kecil milik perguruan tinggi. Dengan lokasi perguruan tinggi yang tersebar di berbagai daerah di Indonesia, maka teleskop-teleskop ini pun bisa berada di tiga zona waktu yang berbeda (WIB-WITA-WIT) seperti halnya stasiun-stasiun milik pemerintah sehingga bisa saling menguatkan. Penempatan teleskop-teleskop di ketiga zona waktu di Indonesia akan memperbesar peluang keberhasilan pengamatan terhadap target tertentu yang bergerak cepat di orbit rendah (Gambar 4.18). Selain itu hal tersebut akan memungkinkan untuk melakukan pengamatan secara simultan atas suatu target dari lokasi yang berbeda hingga ribuan kilometer.

Penggunaan jejaring teleskop ini juga memungkinkan perguruan tinggi untuk berpartisipasi dalam proyek penelitian global dan kolaboratif. Mahasiswa dan peneliti dapat terlibat langsung dalam proses



Sumber: Rachman (2023)

Gambar 4.18 Wilayah geografis Indonesia yang lebar di sepanjang ekuator memungkinkan dilakukannya pengamatan dalam tiga periode orbit secara berturut-turut atas suatu benda di orbit rendah yang melintasi Indonesia.

pengumpulan dan analisis data, memberikan mereka pengalaman praktis yang berharga dalam bidang astronomi dan sains antariksa. Hal ini juga membuka peluang untuk penelitian antardisiplin, menggabungkan keahlian dari berbagai bidang studi untuk memahami lebih baik tentang sampah antariksa dan dampaknya. Dengan meningkatnya jumlah sampah antariksa, penting untuk mengembangkan metode yang efektif untuk memantau dan melacak objek-objek ini. Jejaring teleskop kecil dapat memberikan data penting yang diperlukan untuk mendukung upaya mitigasi risiko tumbukan antara sampah antariksa dengan satelit aktif di orbit Bumi. Data ini tidak hanya berguna untuk kepentingan ilmiah tetapi juga untuk keamanan satelit komersial dan misi antariksa berawak seperti sudah dibahas sebelumnya.

Pendidikan dan kesadaran tentang sampah antariksa juga dapat ditingkatkan melalui penggunaan jejaring teleskop ini. Perguruan tinggi dapat mengintegrasikan pengamatan sampah antariksa ke dalam kurikulum mereka dengan memberikan mahasiswa pemahaman yang lebih mendalam tentang isu-isu lingkungan antariksa dan tanggung jawab kita dalam menjaga keberlanjutan ruang angkasa. Perguruan tinggi di Indonesia yang mencetak calon guru, atau yang dikenal sebagai Lembaga Pendidikan Tenaga Kependidikan (LPTK) seperti halnya Universitas Pendidikan Indonesia di Bandung Jawa Barat, memiliki peran penting dalam mendidik generasi mendatang tentang pentingnya pengamatan sampah antariksa. Melalui kurikulum yang dirancang dengan baik, calon guru dapat dibekali dengan pengetahuan dan keterampilan untuk mengajarkan topik ini kepada para siswa kelak. Ini akan menciptakan kesadaran sejak dini tentang dampak sampah antariksa dan pentingnya upaya global dalam mengatasi masalah ini, yang pada gilirannya akan membentuk sikap bertanggung jawab terhadap lingkungan antariksa bagi generasi mendatang.

Terbukanya peluang untuk melakukan pengamatan dengan teleskop kecil juga bisa menginspirasi perguruan tinggi-perguruan tinggi untuk merancang dan membangun sistem pengamatan sendiri. Salah satu perguruan tinggi yang telah memperoleh hasil awal adalah Institut Teknologi Sumatera (ITERA). Observatorium Astronomi ITERA Lampung (OAIL) berkomitmen untuk memajukan penelitian astronomi di Indonesia melalui pengembangan instrumen pemantau langit yang mumpuni. Berikut adalah beberapa instrumen yang telah dan sedang dikembangkan di OAIL.

1. Allsky Camera (Gambar 4.19)

- OAIL memiliki dua *allsky camera*; satu terletak di OZT-ALTS dan satu lagi di ITERA Robotic Telescope (IRT).
- Kamera di OZT-ALTS dilengkapi dengan lensa *fisheye* 180 derajat dan kamera DSLR, yang dipantau menggunakan komputer berbasis Windows.

- Kamera di IRT memiliki lensa *fisheye* 170 derajat dan kamera CMOS, yang dipantau menggunakan komputer berbasis Raspberry Pi. Instrumen ini juga dilengkapi dengan peralatan tambahan untuk mengukur kondisi atmosfer, termasuk kecerlangan langit, kelembapan, suhu udara dan langit, arah dan kecepatan angin, serta sensor hujan.
- Kedua kamera ini merupakan bagian dari jaringan allskycam.or.id yang memungkinkan pertukaran data pemantauan langit antar anggota.



Foto: Dok. OAIL (2024)

Gambar 4.19 Allsky camera yang dikembangkan di ITERA.

2. ITERA Robotic Telescope (IRT) (Gambar 4.20)

- IRT adalah teleskop yang dikembangkan sistem otomasinya untuk mengamati objek langit dengan kemampuan penjejakan (*tracking*) satelit atau sampah antariksa.
- IRT menggunakan teleskop jenis Ritchey-Chretien yang memiliki cermin utama diameter 25 cm dengan panjang fokus 2000mm. IRT menggunakan kamera CMOS yang memiliki resolusi tinggi dan rentang dinamis yang lebar sehingga mampu melakukan pengamatan fotometri dan astrometri yang akurat.



Foto: Dok. OAIL (2023)

Gambar 4.20 ITERA Robotic Telescope (IRT).

3. Ultra Compact ITERA Robotic Telescope III (Utopia III) (Gambar 4.21)
 - Utopia III adalah generasi ketiga dari seri Utopia yang dirancang sebagai *portable mount* sehingga mudah dibawa dan digunakan.
 - Dengan dudukan teleskop yang dapat bergerak cepat (12° per detik), sensor CMOS sensitif, dan teleskop kecil dan ringan (refraktor berdiameter 80 mm, panjang fokus 300mm), Utopia III efektif untuk penjejakan satelit yang cukup terang.
 - Utopia III juga telah berhasil melakukan pengamatan fotometri dengan hasil yang memuaskan.
4. Asteroid Sky Survey ITERA (ASTI)
 - ASTI adalah instrumen yang masih dalam tahap pengembangan dengan tujuan melakukan survei langit secara luas.

- Dengan teleskop 8 inci dan kamera CMOS sensitif, serta program *pipeline* pengamatan terintegrasi, ASTI diharapkan dapat menyediakan data fotometri dan astrometri asteroid yang akurat.
- Pengembangan *pipeline* dan database pengamatan menjadi fokus utama untuk mendukung misi ini.

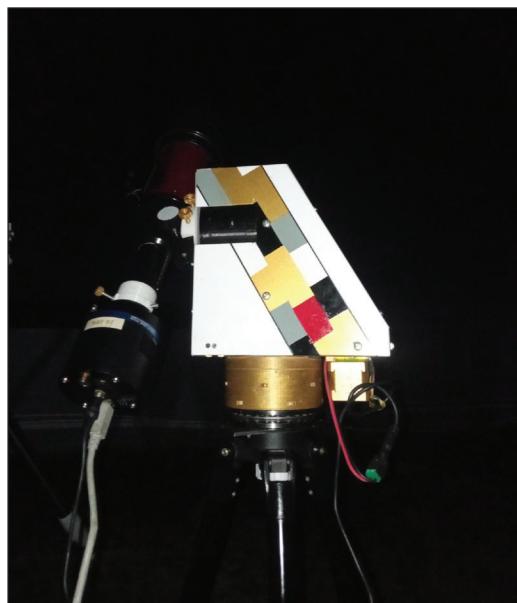


Foto: Dok. OAIL (2024)

Gambar 4.21 Utopia III untuk pengamatan satelit.

Pada 9 Mei 2024 Utopia III berhasil dipakai untuk mengamati 2nd *stage booster* dari salah satu roket FALCON 9. Salah satu citra yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.22. Gambar 4.23 menunjukkan kurva cahaya yang dihasilkan. Hasil ini adalah hasil awal sehingga belum bisa dipandang sebagai representasi kondisi benda yang diamati.

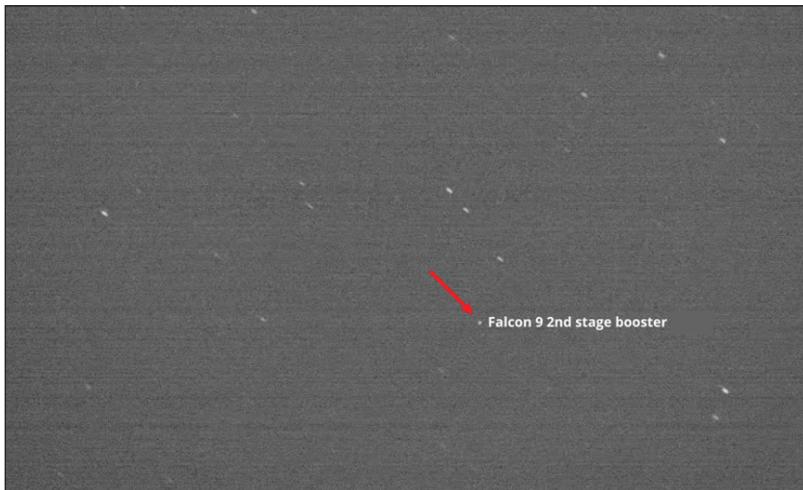
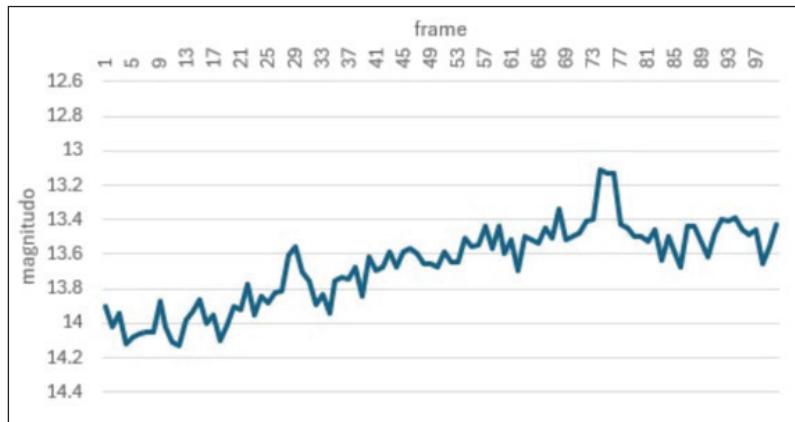


Foto: Dok. OAIL (2024)

Gambar 4.22 Contoh citra hasil pengamatan sampah antariksa dengan Utopia III yang diamati pada 9 Mei 2024. Terlihat benda yang diamati dan diikuti geraknya yakni 2nd stage booster dari salah satu roket FALCON 9 berbentuk titik sedangkan bintang-bintang berbentuk garis. Waktu paparan yang digunakan adalah 1 detik.



Sumber: Dok. OAIL (2024)

Gambar 4.23 Kurva cahaya 2nd stage booster dari FALCON 9 yang diamati pada 9 Mei 2024 dengan Utopia III. Durasi pengamatan adalah 100 detik.

OAIL berharap agar instrumen-instrumen di atas tidak hanya akan meningkatkan kapasitas penelitian astronomi di ITERA tetapi juga dapat menjadi model bagi institusi lain untuk bergabung dalam usaha pemantauan langit bersama. Keberhasilan ini akan membuka jalan bagi kolaborasi ilmiah yang lebih luas dan kontribusi signifikan pada komunitas astronomi global.

G. Penutup

Sampah antariksa menjadi isu internasional akibat dampaknya pada misi luar angkasa, keselamatan penerbangan, keselamatan manusia dan properti di permukaan bumi, serta pengamatan astronomi. Dampak utamanya adalah risiko yang ditimbulkan jika bertabrakan dengan satelit-satelit yang masih beroperasi dan risiko pada keselamatan astronot terutama yang sedang melakukan misi di luar wahana. Dampak lainnya adalah risiko yang ditimbulkan jika jatuh ke Bumi yang bisa menimbulkan kerusakan pada pesawat terbang, properti, dan ancaman pada jiwa selain potensi kerusakan pada atmosfer. Dampak lainnya lagi adalah gangguan sampah antariksa (dan satelit) pada pengamatan astronomi baik yang dilakukan di antariksa (melalui potensi tabrakan) maupun yang dilakukan di permukaan bumi (melalui jejak yang ditimbulkannya pada citra hasil pengamatan maupun melalui efeknya pada kejernihan langit serta derau elektromagnetik yang mungkin muncul).

Pengetahuan kita tentang populasi dan karakteristik sampah antariksa diperoleh melalui pengamatan menggunakan radar dan teleskop optik serta alat pengukur yang diluncurkan ke luar angkasa. Dari pemantauan yang dilakukan selama ini diketahui adanya kecenderungan bahwa jumlah sampah antariksa dan satelit aktif yang mengorbit Bumi selalu meningkat. Orbit rendah (ketinggian di bawah 2000 km) adalah daerah orbit yang paling padat dan paling dinamis dibanding daerah orbit lainnya yang lebih tinggi. Belakangan ini, maraknya peluncuran satelit-satelit CubeSat dan proyek mega-konstelasi satelit LEO yang dimulai sejak 2019 sangat berpengaruh pada dinamika tersebut. Diperkirakan bahwa berbagai dampak akibat

sampah antariksa akan terus meningkat seiring dengan semakin bertambahnya jumlah satelit dan akibat sampah antariksa itu sendiri. Hingga Desember 2023, jumlah benda antariksa berukuran di atas 10 cm diperkirakan telah mencapai 36500; antara 1 hingga 10 cm mencapai 1 juta; dan antara 1 mm hingga 1 cm mencapai 130 juta.

Dunia tentu saja tidak tinggal diam dalam menghadapi isu sampah antariksa. Oleh karena itu, berbagai upaya, baik dengan membuat pedoman-pedoman mitigasi maupun merencanakan remediasi melalui *active debris removal* serta pemantauan populasi sampah antariksa serta studi karakterisasinya, telah banyak dilakukan. Langkah mitigasi telah memberikan hasil yang signifikan dalam mengurangi laju pertambahan jumlah sampah antariksa. Namun, langkah remediasi masih dalam tahap studi dan percobaan. Di bidang pemantauan, telah semakin banyak institusi di berbagai negara yang mampu melakukan pengamatan sendiri satelit dan sampah antariksa. Indonesia telah beberapa kali terdampak oleh sampah antariksa yang jatuh ke permukaan bumi dan sudah turut berperan aktif melakukan pengamatan sampah antariksa melalui pemerintah dan swasta. Diharapkan kelak peran ini dilakukan juga oleh perguruan tinggi yang tersebar di seluruh Indonesia yang saat ini telah mulai memperlihatkan hasil.

Berdasarkan pemaparan yang sudah diberikan dalam tulisan ini, penulis memberikan beberapa rekomendasi.

1. Semua negara yang melakukan aktivitas keantariksaan, terutama yang terdaftar sebagai anggota PBB, sedapat mungkin mematuhi pedoman-pedoman mitigasi yang sudah dibuat oleh lembaga tersebut.
2. Sebagai negara yang makin banyak terlibat dengan aktivitas keantariksaan, Indonesia perlu mempelajari dan aktif berperan dalam pemantauan populasi sampah antariksa dan karakterisasinya. Agar lebih efektif, kegiatan ini sebaiknya dilakukan melalui kerja sama dengan negara-negara lain terutama yang sudah lebih maju dalam bidang ini. Berbagai alat pengamatan di Observatorium Nasional Timau termasuk instrumen utamanya (berupa teleskop dengan cermin berdiameter 3.8 m) dapat digunakan dalam kerja sama tersebut.

3. Pemerintah Indonesia perlu lebih aktif mendorong pihak swasta dan perguruan tinggi di Indonesia untuk terus berperan dan meningkatkan kompetensinya dalam rangka memitigasi dampak sampah antariksa. Isu kurangnya periset terampil yang sering kali dihadapi dalam riset keantariksaan di dalam negeri diharapkan bisa teratasi melalui kerja sama yang erat antara pemerintah, swasta, dan perguruan tinggi.

Daftar Pustaka

- Barentine, J. C., Venkatesan, A., Heim, J., Lowenthal, J., Kocifaj, M., & Bará, S. (2023). Aggregate effects of proliferating low-Earth-orbit objects and implications for astronomical data lost in the noise. *Nature Astronomy*, 7(3), 252-258.
- Cohen, A. F. (1984). Cosmos 954 and the international law of satellite accidents. *Yale Journal of International Law*, 10(1), 78.
- Danarianto M. D., Maharani A. M., Falah B. M. and Rohmah F. (2022). Proc. The Int. Symp. on Space Science (Indonesia) (IOP Publishing).
- Dani, T., Rachman, A., Priyatikanto, R., & Religia, B. (2015). Instrumentation development for space debris optical observation system in Indonesia: Preliminary results. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1677, No. 1). AIP Publishing.
- Djamaruddin, T. (2004). Analisis Orbit dan Identifikasi Benda Jatuh Antariksa di Indonesia, Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa II, hlm. 297-301, 2004.
- Djamaruddin, T. (2021). Dokumentasi Benda Jatuh Antariksa di Indonesia, <https://tdjamaruddin.com/2021/01/10/dokumentasi-benda-jatuh-antariksa-di-indonesia/>, diakses pada Juni 2024.
- European Space Agency. (2013, 25 April). Global experts agree action needed on space debris. https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Global_experts_agree_action_needed_on_space_debris
- Huwaida F. A & A. Rachman (2023). *Understanding the pattern of space objects number of reentries since the beginning of the space age*, Prosiding ICMNS 2023.
- Kelso, T.S. (2024). Celestrak. <http://celestrak.org/>
- Kessler, D. J., dan B. G. Cour-Palais (1978). Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 83 (A6), 2637-2646.

- Kocifaj, M., Kundracik, F., Barentine, J. C., & Bará, S. (2021). The proliferation of space objects is a rapidly increasing source of artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 504(1), L40–L44.
- Liou, J.-C., dan N. L. Johnson (2008), Instability of the present LEO satellite populations, *Advances in Space Research*, 41 (7), 1046–1053.
- Möller, A. (2020, 210 April). Überflug der Starlink 5 Satelliten am 20.04.2020 aufgenommen aus Berlin. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Starlink-5.jpg>
- Mumpuni, E. S., Admiranto, A. G., Priyatikanto, R., Puspitarini, L., Nurzaman, M. Z., Mumtahana, F., ... & Tanesib, J. L. (2017). Selayang Pandang Observatorium Nasional Timau.
- Murphy, D. M., et al. (2023). Metals from spacecraft reentry in stratospheric aerosol particles, *PNAS* Vol. 120, No. 43.
- NASA. (t.t.). Photo gallery. Orbital Debris Program Office. Diakses pada 21 Oktober 2025 dari <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photo-gallery/>
- NASA ODPO (1996a). Major satellite breakup in June, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 1, Issue 2.
- NASA ODPO (1996b). First natural collision of cataloged earth satellites, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 1, Issue 2.
- NASA ODPO (2007). Chinese anti-satellite test creates most severe orbital debris cloud in history, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 11, Issue 2.
- NASA (2008). Handbook for Limiting Orbital Debris, NASA, Washington, DC 20546, NASA-Handbook 8719.14.
- NASA. (2012). Hubble space debris damage. USGS. <https://www.usgs.gov/media/images/hubble-space-debris-damage>
- NASA ODPO (2022). History of on-orbit satellite fragmentations - 16th edition, tech. report.
- NASA ODPO (2023). Monthly effective number of objects in earth orbit, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 27, Issue 4.
- NASA ODPO (2023). Effective number of catalog objects per 10-km altitude bin, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 27, Issue 4.
- National Research Council (1995). *Orbital Debris: A Technical Assessment*, The National Academies Press, Washington, DC.

- Neflia, A. R., Rachman, A., Dani, T., & Djamaruddin, T. (2010). Upgrading on Dissemination System for Spacecraft Reentry. In Proceeding of International Workshop on Space Weather in Indonesia (IWSWI).
- Priyatikanto, R., Mumpuni, E. S., Hidayat, T., Saputra, M. B., Murti, M. D., Rachman, A., & Yatini, C. Y. (2023). Characterization of Timau National Observatory using limited in situ measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518(3), 4073–4083.
- Rachman, A. (2021). Space debris flux on LAPAN satellites during Solar Cycle 25, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2214 012020.
- Rachman, A. dan T. Dani (2010). Pengembangan perangkat lunak pemantau otomatis benda jatuh antariksa, Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa V.
- Rachman, A. (2014). Space debris mitigation activities in Indonesia, presentasi pada sidang ke-51 Subkomite Ilmiah dan Teknis UNCOPUOS, Wina, 2014.
- Rachman, A. (2023). Monitoring Space Debris from Indonesia, presentasi pada APRSAF-29, Jakarta, September 2023.
- Rachman, A., T. Djamaruddin, dan A. Vananti (2023). Photometric Observation of Defunct Satellites Using Small Telescopes: Preliminary Results, Prosiding ICMNS 2023.
- Shara, M. M., & Johnston, M. D. (1986). Artificial Earth satellites crossing the fields of view of, and colliding with, orbiting space telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98(606), 814.
- Space Mission Analysis and Design (2005). Microcosm Press & Kluwer Academic Publishers.
- UNOOSA (2010). Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space.
- Vruno, F.D. et al. (2023). Unintended electromagnetic radiation from Starlink satellites detected with LOFAR between 110 and 188 MHz, *A&A* 676, A75. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346374>